



**FARKLI KESME YÖNTEMLERİ İLE ÜRETİLEN SİLİSLİ SAC
PAKETLERİNİN ELEKTRİK MAKİNALARININ PERFORMANSI
ÜZERİNE ETKİSİ**

Şenol BAYRAKTAR

**DOKTORA TEZİ
İMALAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ARALIK 2015

Şenol BAYRAKTAR tarafından hazırlanan “FARKLI KESME YÖNTEMLERİ İLE ÜRETİLEN SİLİSLİ SAC PAKETLERİNİN ELEKTRİK MAKİNALARININ PERFORMANSI ÜZERİNE ETKİSİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi İmalat Mühendisliği Anabilim Dalında DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Yrd.Doç.Dr.Yakup TURGUT

İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

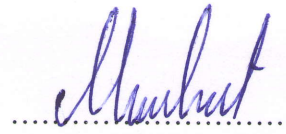
Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum



Başkan : Prof. Dr. Mahmut GÜLESİN

İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

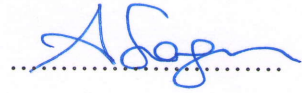
Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum



Üye : Yrd.Doç.Dr. Ali SAYGIN

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

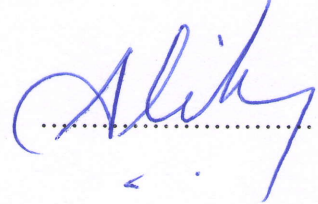
Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum



Üye : Prof. Dr. Adem ÇİÇEK

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Yıldırım Beyazıt Üniversitesi

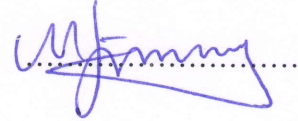
Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum



Üye : Doç.Dr. Mustafa GÜNAY

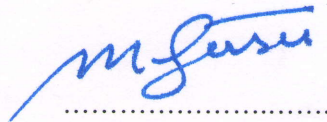
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Karabük Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum



Tez Savunma Tarihi: 08/12/2015

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Doktora Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.



Prof. Dr. Metin GÜRÜ

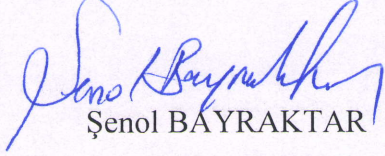
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.


Şenol BAYRAKTAR

08.12.2015

FARKLI KESME YÖNTEMLERİ İLE ÜRETİLEN SİLİSLİ SAC PAKETLERİNİN ELEKTRİK MAKİNALARININ PERFORMANSI ÜZERİNE ETKİSİ

(Doktora Tezi)

Şenol BAYRAKTAR

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Aralık 2015

ÖZET

Bu çalışmada, silisli saclar; lazer, aşındırıcılı su jeti, tel erezyon ve kesme kalıbı ile kesilerek, kesme yöntemlerinin asenkron elektrik motorunun performansı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. 5,5 kW asenkron elektrik motoru referans alınarak, her bir kesme yöntemi ile 255'er adet stator sacı kesilmiş, bu saclar üst üste dizilerek sıkıştırılmış ve elektrik ark kaynağı ile birleştirilerek paketlenmiştir. Daha sonra, asenkron motora ait, gövde, rulman, pervane gibi mekaniksel elemanların montajı yapılarak motorlar verimlilik testlerine tabi tutulmuştur. Verimlilik testleri, kayıpların toplanması ve doğrudan ölçme yöntemleri dikkate alınarak yapılmıştır. Kayıpların toplanması yöntemi ile motor verimliliğinin belirlenmesinde, sabit 50 Hz frekans ve altı farklı yükleme (% 25-50-75-100-115-125) değerleri kullanılmıştır. Doğrudan ölçme yöntemi ile verimliliğin belirlenmesinde ise frekans konvertörü vasıtası ile dört farklı frekans (50-75-100-125 Hz) ve beş farklı yükleme (% 25-50-75-100-125) değerleri kullanılmıştır. Yapılan testler sonucunda, kayıpların toplanması metoduna göre en yüksek motor verimliliği, tel erezyon kesme yöntemi ile üretilen motorda nominal yükleme değerinde % 85,61 olarak ölçülmüştür. Yükleme oranının artması ile toplam kayıpların arttığı buna bağlı olarak motor verimliliğinin azaldığı gözlenmiştir. Doğrudan ölçme yönteminde ise frekans değerinin yanı sıra motor yükleme oranının artması ile toplam kayıpların arttığı ve buna bağlı olarak motor verimliliğinin azaldığı belirlenmiştir. En yüksek motor verimliliği, 50 Hz frekans ve nominal yükleme değerlerinde % 89,68 ile tel erezyon kesme yönteminde, en düşük motor verimliliği ise % 48,76 ile 125 Hz frekans ve % 25 yükleme değerlerinde aşındırıcılı su jeti kesme yöntemi ile üretilen motorda ölçülmüştür. Her iki ölçme yönteminde motor verimlilikleri, en yüksek sırasıyla; tel erezyon, kesme kalıbı, lazer ve aşındırıcılı su jeti olduğu tespit edilmiştir. Doğrudan ölçme yönteminde toplam kayıplar ve motor verimliliği için YSA ile tahmini matematiksel modeller geliştirilmiştir. Matematiksel modelleme sonucunda gerçek deney sonuçlarının YSA'da tahmin edilen sonuçlarla örtüştüğü belirlenmiştir. ANOVA (Analysis of variance) sonuçlarına göre, motor verimliliği ve toplam kayıpları etkileyen en önemli bağımsız değişkenin, frekans olduğu belirlenmiştir. Ansys Maxwell Electromagnetic Design yazılımı ile entegreli çalışabilen RMXprt modülü ile farklı frekans (50-75-100-125 Hz) ve nominal yükleme değerleri kullanılarak, çıkış gücü ve motor hızının verimlilik üzerindeki etkileri belirlenmiştir. Ayrıca, yüksek adetlerde motor üretimi için kesme kalıbı ile üretim yöntemi diğerlerine göre maliyetinin daha az olduğu, prototip veya özel amaçlı motorların üretiminde tel erezyon ve lazer kesme yönteminin kullanılabileceği belirlenmiştir. Tel erezyon ve aşındırıcılı su jeti ile üretilen motorun verimlilikleri arasındaki % 2,51'lik fark, bir motor için 487 TL'lik yıllık enerji tasarrufu yapılabileceğini ortaya koymuştur.

Bilim Kodu : 916.1.033
Anahtar Kelimeler : Elektrik motoru, Verimlilik, Silisli sac paketi, Lazer kesim, Aşındırıcılı su jeti, Tel erezyon, Kesme kalıbı, Yapay sinir ağları
Sayfa Adedi : 190
Danışman : Yrd.Doç.Dr. Yakup TURGUT

EFFECT ON TO PERFORMANCE OF ELECTRICAL MACHINES OF SILICON SHEET PACKAGES MANUFACTURED WITH DIFFERENT CUTTING METHODS

(Ph. D. Thesis)

Şenol BAYRAKTAR

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

December 2015

ABSTRACT

In this study, silicon stator sheets were cut by laser, abrasive water jet, wire electrical discharge machining and mechanic cutting and the effects of cutting methods on the performance of induction electrical motor were investigated. 5,5 kW induction electrical motor was taken as a reference and 255 pieces of stator sheets were cut by each cutting method, then the sheets were stacked on top of each other and packaged by joining using electrical arc welding. Then, mounting of mechanical parts such as housing, bearing, rotor belonging to induction motor was carried out and subjected to efficiency tests. Efficiency tests were made by considering summation of losses (indirect) and direct measuring methods. In the determination of motor efficiency by the method of summation of losses, constant 50 Hz frequency and six different loading (25-50-75-100-115-125%) values were used. In the determination of efficiency by direct measurement method, four different frequency (50-75-100-125 Hz) and five different loading (25-50-75-100-125%) values were used by frequency convertor. At the end of the tests, the highest motor efficiency according to the method of summation of losses was measured as 85,61% (at nominal loading) on the motor produced by wire electrical discharge machining cutting method. It was observed that the total losses increased with the increase of loading ratio and consequently the motor efficiency decreased. In the direct measuring method, with the increasing frequency value and motor loading ratio, total losses increased and the motor efficiency decreased accordingly. The highest motor efficiency was measured in the wire electrical discharge machining method at 50 Hz frequency and nominal loading values as 89,68% whereas the lowest motor efficiency was measured on the motor produced by abrasive water jet cutting method at 125 Hz frequency and 25% loading values as 48,76%. The motor efficiencies in both of the measuring methods were determined to be (starting from the highest); wire erosion discharge machining, mechanic cutting, laser and abrasive water jet respectively. In the direct measuring, estimated mathematical models were developed with YSA for the total losses and motor efficiency. At the end of mathematical modelling it was seen that actual test results matched with the estimated results in YSA. According to ANOVA (Analysis of variance) results, the most important independent variable affecting the motor efficiency and total losses came out to be the frequency. The effects of output power and motor speed on frequency were determined by using RMxpert module (integrated with Ansys Maxwell Electromagnetic Design software), different frequencies (50-75-100-125 Hz) and nominal loading values. Besides, It was also determined that for a large number of motor production, cost of production method by mechanic cutting was lower and wire electrical discharge machining and laser cutting method could be used in the production of prototype or special purpose motors. Difference of 2,51% between the efficiencies of motor produced by wire electrical discharge machining and abrasive water jet cutting method put forward a 487 TL of annual energy saving for one motor.

Science Code : 916.1.033

Key Words : Electrical motor, Efficiency, Silicon sheet package, Laser cutting, Abrasive water jet, Wire electrical discharge machining, Cutting die, Artificial neural network (ANN)

Page Number : 190

Supervisor : Assist.Prof. Dr. Yakup TURGUT

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren danışman hocam Yrd. Doç.Dr. Yakup TURGUT'a saygı ve şükranlarımı sunarım.

Kıymetli tecrübelerinden faydalandığım değerli hocalarım, Yrd.Doç.Dr. Ali SAYGIN, Prof.Dr. İsmail Hakkı BOYACI ve deneysel çalışmalarında katkı sağlayan değerli arkadaşlarım Öğr. Gör. Dr. Cemil OCAK'a, Araş.Gör.Dr. Gültekin UZUN'a ve maddi, manevi destekleri ile beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan aileme teşekkür ederim.

Ayrıca, 214M610 No'lu 1002-Hızlı Destek Projesinin yanı sıra 2211-Yurtiçi Doktora Burs Programı kapsamında sağladığı destekten ötürü TÜBİTAK Bilim İnsanı Destekleme Daire Başkanlığı birimine ve çalışmalarda kullandığım cihaz ve teçhizatları ile bana katkıda bulunan Elsan Elektrik Sanayii ve Ticaret A.Ş'ye de teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xiii
RESİMLERİN LİSTESİ	xvii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xix
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	7
3. ELEKTRİK MOTORLARI	23
3.1. Elektrik Motorlarının Sınıflandırılması	23
3.1.1. Sabit mıknatıslı doğru akım (DA) motorları.....	23
3.1.2. Alan sargılı DA motorları.....	24
3.1.3. Asenkron motorlar	25
3.1.4. Anahtarlama relüktans motorlar	26
4. ELEKTRİK MAKİNALARINDA KAYIPLAR	29
4.1. Mekanik Kayıplar	29
4.2. Sarım Kayıpları.....	31
4.3. Demir Kayıpları	31
5. ELEKTRİK MAKİNALARINDA DEMİR KAYIPLARI.....	35
5.1. Demir Kayıplarının Belirlenmesi	35
5.2. Demir Kayıplarını Etkileyen Faktörler	36

	Sayfa
5.2.1. Mekanik kesme yöntemi.....	36
5.2.2. Lazer kesme yöntemi	40
5.2.3. Aşındırıcılı su jeti kesme yöntemi.....	51
5.2.4. Tel erezyon kesme yöntemi	61
5.3. Motor Verimliliği Ölçümünde Test Düzenekinin Hazırlanması	65
5.3.1. Doğrudan ölçme metodu ile verimliliğin belirlenmesi	65
5.3.2. Kayıpların toplanması ile verimliliğin belirlenmesi	66
6. YAPAY SİNİR AĞLARI	73
6.1. Biyolojik Sinir Sisteminin Yapısı.....	73
6.2. Yapay Sinir Ağı Hücresi.....	75
6.2.1. Aktivasyon fonksiyonları	76
6.3. Yapay Sinir Ağlarının Sınıflandırılması.....	80
6.3.1. Tek katmanlı ileri beslemeli ağlar	80
6.3.2. Çok katmanlı ileri beslemeli ağlar	80
6.3.3. Tekrarlı sinir ağları.....	81
6.4. Yapay Sinir Ağlarında Öğrenme	82
6.4.1. Danışmanlı öğrenme	82
6.4.2. Danışmansız öğrenme	83
6.4.3. Takviyeli öğrenme	84
6.5. Eğitim, Doğrulama ve Test Veri Kümeleri	84
7. MATERYAL VE METOT.....	87
7.1. Kullanılan Silisli Sac ve Kesim Öncesi Hazırlık	87
7.2. Lazer ile Kesme	90
7.3. Aşındırıcılı Su Jeti ile Kesme	92

	Sayfa
7.4. Tel Erezyon ile Kesme	95
7.5. Kesme Kalıbı ile Kesme	98
7.6. Kesilen Stator Saclarının Paket Haline Getirilmesi	101
7.7. Rotor Saclarının Paket Haline Getirilmesi	104
7.8. Elektrik Motorlarının Montajının Yapılması	106
7.9. Test Düzeneginin Hazırlanması	110
8. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA	113
8.1. Kayıpların Toplanması Yöntemi ile Sonuçların Değerlendirilmesi	113
8.2. Doğrudan Ölçme Yöntemi ile Sonuçların Değerlendirilmesi	124
8.3. Elektrik Motor Test Sonuçlarının YSA ile Analizi ve Değerlendirilmesi	131
8.3.1. Ağ yapısının oluşturulması	131
8.3.2. Elektrik motor test sonuçlarının YSA ile karşılaştırılması	141
8.3.3. Elektrik motor test sonuçlarının ANOVA ile değerlendirilmesi	155
8.4. Ansys Maxwell RMXprt ile Sonuçların Değerlendirilmesi	158
8.5. Maliyet Analizi	164
8.5.1. Motor maliyeti	164
8.5.2. Enerji sarfiyatının hesaplanması	167
9. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	169
KAYNAKLAR	173
ÖZGEÇMİŞ	189

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 1.1. CEMEP ile gönüllü anlaşma yapan ve yapmayan AB ülkeleri ile Türkiye sanayisinde verim sınıflarına göre motor kullanım oranları	3
Çizelge 7.1. M400-50A Silisli sac malzemenin kimyasal yüzde bileşimi	87
Çizelge 7.2. M400-50A Silisli sac malzemenin mekanik ve elektriksel özellikleri	87
Çizelge 7.3. Lazer kesme parametreleri	91
Çizelge 7.4. Aşındırıcılı su jeti kesme ve makina parametreleri	93
Çizelge 7.5. Aşındırıcı tanecik ağırlıkça yüzde bileşimi	95
Çizelge 7.6. Tel erezyon kesme parametreleri	97
Çizelge 7.7. Tel erezyon kesme işleminde kullanılan elektrot tel kimyasal bileşimi	98
Çizelge 7.8. Elektrik ark kaynak parametreleri	104
Çizelge 7.9. 5,5 kW asenkron motora ait montaj elemanları	108
Çizelge 7.10. 5,5 kW asenkron motor için yapılan işlemler	109
Çizelge 7.11. Doğrudan ölçme yöntemine göre test parametreleri	111
Çizelge 7.12. Kayıpların toplanması ile ölçme yöntemine göre test parametreleri	111
Çizelge 8.1. Lazer kesme yöntemine göre elde edilen sonuçlar	114
Çizelge 8.2. Aşındırıcılı su jeti ile kesme yöntemine göre elde edilen sonuçlar	114
Çizelge 8.3. Tel erezyon kesme yöntemine göre elde edilen sonuçlar	115
Çizelge 8.4. Kesme kalıbı ile kesme yöntemine göre elde edilen sonuçlar	116
Çizelge 8.5. Kesme yöntemlerine göre yüzey pürüzlülükleri	121
Çizelge 8.6. Öğrenme algoritmaları ve MATLAB programında kısa yazılışı	134
Çizelge 8.7. Lazer kesme yönteminde toplam kayıplar ve motor verimliliği için her bir nörona ait ağırlık ve eşik değerleri	135
Çizelge 8.8. Aşındırıcılı su jeti kesme yönteminde toplam kayıplar ve motor verimliliği için her bir nörona ait ağırlık ve eşik değerleri	136

Çizelge	Sayfa
Çizelge 8.9. Tel erezyon kesme yönteminde toplam kayıplar ve motor verimliliği için her bir nörona ait ağırlık ve eşik değerleri	136
Çizelge 8.10. Kesme kalıbı yönteminde toplam kayıplar ve motor verimliliği için her bir nörona ait ağırlık ve eşik değerleri	137
Çizelge 8.11. Lazer kesme yönteminde toplam kayıplar ve motor verimliliği deney sonuçları ve ağırlık eğitilmesi sonucu elde edilen YSA sonuçları	141
Çizelge 8.12. Lazer kesme yönteminde toplam kayıplar ve motor verimliliği deney sonuçları ve ağırlık test edilmesi sonucunda elde edilen YSA sonuçları	143
Çizelge 8.13. Aşındırıcılı su jeti ile kesme yönteminde toplam kayıplar ve motor verimliliği deney sonuçları ve ağırlık eğitilmesi sonucu elde edilen YSA sonuçları	144
Çizelge 8.14. Aşındırıcılı su jeti ile kesme yönteminde toplam kayıplar ve motor verimliliği deney sonuçları ve ağırlık test edilmesi sonucunda elde edilen YSA sonuçları	146
Çizelge 8.15. Tel erezyon kesme yönteminde toplam kayıplar ve motor verimliliği deney sonuçları ve ağırlık eğitilmesi sonucu elde edilen YSA sonuçları	147
Çizelge 8.16. Tel erezyon kesme yönteminde toplam kayıplar ve motor verimliliği deney sonuçları ve ağırlık test edilmesi sonucunda elde edilen YSA sonuçları	149
Çizelge 8.17. Kesme kalıbı yönteminde toplam kayıplar ve motor verimliliği deney sonuçları ve ağırlık eğitilmesi sonucu elde edilen YSA sonuçları	150
Çizelge 8.18. Kesme kalıbı yönteminde toplam kayıplar ve motor verimliliği deney sonuçları ve ağırlık test edilmesi sonucunda elde edilen YSA sonuçları	151
Çizelge 8.19. Farklı kesme yöntemlerine göre YSA’da elde edilen modele ait veriler..	154
Çizelge 8.20. Lazer ve aşındırıcılı su jeti ile kesme yöntemi için ANOVA sonuçları ...	156
Çizelge 8.21. Tel erezyon ve kesme kalıbı yöntemi için ANOVA sonuçları	157
Çizelge 8.22. Lazer kesme yöntemi ile üretilen motor maliyeti	165
Çizelge 8.23. Aşındırıcılı su jeti kesme yöntemi ile üretilen motor maliyeti	166
Çizelge 8.24. Tel erezyon kesme yöntemi ile üretilen motor maliyeti	166
Çizelge 8.25. Kesme kalıbı ile üretilen motor maliyeti	166

Çizelge	Sayfa
Çizelge 8.26. Tel erezyon kesme yöntemi ile üretilen motor için yıllık enerji sarfiyatı	168
Çizelge 8.27. Aşındırıcılı su jeti kesme yöntemi ile üretilen motor için yıllık enerji sarfiyatı	168

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. Elektrik motorlarının sınıflandırılması	23
Şekil 3.2. Sabit mıknatıslı doğru akım motorları	24
Şekil 3.3. Sargılı tip DA motorları.....	25
Şekil 3.4. Sincap kafesli asenkron motor	26
Şekil 3.5. Anahtarlamaalı relüktans motor	27
Şekil 4.1. Elektrik makinalarında oluşan kayıpların sınıflandırılması.....	29
Şekil 4.2. Ferromanyetik malzeme için 10 ve 200 Hz’de oluşan B-H Hysteresis eğrisi	32
Şekil 5.1. Demir kayıplarını etkileyen faktörler	36
Şekil 5.2. Kalıp kesme boşluğunun iyi seçilmemesi durumunda kesme aşamalarının gösterilişi.....	37
Şekil 5.3. Kalıp kesme boşluğunun iyi seçilmesi durumunda kesme aşamalarının gösterilişi.....	38
Şekil 5.4. Optimum kırılma açısı ve yayılma açısının gösterilişi	38
Şekil 5.5. Mekanik kesme işlemi sonucunda oluşan bölgeler	39
Şekil 5.6. Lazer kesme yönteminin şematik gösterimi	41
Şekil 5.7. Aşındırıcılı su jeti kesme prosesinin şematik gösterimi	51
Şekil 5.8. Tel erezyon kesme yönteminin şematik gösterimi	62
Şekil 5.9. Kayıpların toplanması yöntemine ait işlem basamakları.....	66
Şekil 5.10. Artık kayıpların belirlenmesi	71
Şekil 6.1. Biyolojik sinir sistemine ait blok diyagram.....	74
Şekil 6.2. İnsana ait sinir hücre yapısı	74
Şekil 6.3. Lineer olmayan yapay sinir ağ yapısı	75
Şekil 6.4. Doğrusal aktivasyon fonksiyonunun grafiği.....	77

Şekil	Sayfa
Şekil 6.5. Eşik aktivasyon fonksiyonunun grafiği	78
Şekil 6.6. Sigmoid aktivasyon fonksiyonunun grafiği	78
Şekil 6.7. Hiperbolik tanjant aktivasyon fonksiyonunun grafiği	79
Şekil 6.8. Tek ve çok katmanlı ileri beslemeli ağ yapısı	80
Şekil 6.9. Gizli nörona sahip olmayan ve sahip olan tekrarlı geri beslemeli ağ yapısı ..	81
Şekil 6.10. Danışmanlı öğrenme	83
Şekil 6.11. Danışmansız öğrenme	83
Şekil 6.12. Takviyeli öğrenme	84
Şekil 7.1. Asenkron motor stator sac malzemesine ait teknik resim ölçüleri, Stator oluk ölçüleri	88
Şekil 7.2. Asenkron motor silisli stator sacının önden görünümü ve b) Stator sac paketine ait izometrik katı model görüntüsü	88
Şekil 7.3. Asenkron motor rotor sac malzemesine ait teknik resim ölçüleri	89
Şekil 7.4. Stator saclarının lazer ile kesilmesi için sac yerleşim planının oluşturulması	91
Şekil 7.5. Stator saclarının aşındırıcılı su jeti ile kesilmesi için sac yerleşim planının oluşturulması	93
Şekil 7.6. Tel erezyon kesme yönteminde stator sac yerleşim planı	97
Şekil 7.7. Stator sac kesme kalıbının ön görünüşü, ilk baskıda kalıptan çıkan stator sac	99
Şekil 7.8. Stator sacı içerisinden rotor sacının ayrılması, rotor sacı üzerindeki olukların açılması	100
Şekil 7.9. Stator sac paketine ait bağlama kalıbının kesit görünümü, bağlama kalıbının katı model görünümü	102
Şekil 7.10. Silisli rotor sacının katı modeli, rotor sac paketinin izometrik katı modeli..	105
Şekil 7.11. 5,5 kW Asenkron elektrik motorunun montaj görüntüsü	108
Şekil 7.12. Asenkron motor test düzeneğinin şematik görünümü (doğrudan ölçme).....	110
Şekil 8.1. Kesme yöntemlerine göre motor verimlilikleri	117

Şekil	Sayfa
Şekil 8.2. Kesme yöntemlerine göre toplam kayıplar	117
Şekil 8.3. Farklı kesme yöntemlerine göre motorlarda oluşan demir kayıpları.....	118
Şekil 8.4. Aşındırıcılı su jeti kesme yönteminde kesme yüzeyine ait EDS analizi	121
Şekil 8.5. Tel erezyon kesme yönteminde kesme yüzeyine ait EDS analizi	122
Şekil 8.6. Farklı yükleme değerlerinde frekansa bağlı motor verimlilikleri.....	125
Şekil 8.7. Farklı yükleme değerlerinde frekans değişimine bağlı toplam kayıplar	128
Şekil 8.8. Lazer kesme yöntemine ait ağ yapısı.....	132
Şekil 8.9. Aşındırıcılı su jeti kesme yöntemine ait ağ yapısı	132
Şekil 8.10. Tel erezyon kesme yöntemine ait ağ yapısı	133
Şekil 8.11. Kesme kalıbı yöntemine ait ağ yapısı	134
Şekil 8.12. Lazer kesme yönteminde toplam kayıplar ve motor verimliliği değerlerinin eğitilmesi	142
Şekil 8.13. Lazer kesme yönteminde toplam kayıplar ve motor verimliliği değerlerinin test edilmesi	143
Şekil 8.14. Aşındırıcılı su jeti ile kesme yönteminde toplam kayıplar ve motor verimliliği değerlerinin eğitilmesi.	145
Şekil 8.15. Aşındırıcılı su jeti ile kesme yönteminde toplam kayıplar ve motor verimliliği değerlerinin test edilmesi	146
Şekil 8.16. Tel erezyon kesme yönteminde toplam kayıplar ve motor verimliliği değerlerinin eğitilmesi	148
Şekil 8.17. Tel erezyon kesme yönteminde toplam kayıplar ve motor verimliliği değerlerinin test edilmesi	149
Şekil 8.18. Kesme kalıbı yönteminde toplam kayıplar ve motor verimliliği değerlerinin eğitilmesi	150
Şekil 8.19. Kesme kalıbı yönteminde toplam kayıplar ve motor verimliliği değerlerinin test edilmesi	152
Şekil 8.20. Farklı kesme yöntemlerine göre YSA eğitim, YSA test ve deney sonuçları.....	153
Şekil 8.21. Ansys Maxwell RMxprt yazılımında elektrik motorunun tasarımı	158

Şekil	Sayfa
Şekil 8.22. Çıkış gücüne bağlı olarak motor verimliliğindeki değişim ($f=50$ Hz).....	159
Şekil 8.23. Hıza bağlı olarak motor verimliliğindeki değişim ($f=50$ Hz).....	160
Şekil 8.24. Çıkış gücüne bağlı olarak motor verimliliğindeki değişim ($f=75$ Hz).....	160
Şekil 8.25. Hıza bağlı olarak motor verimliliğindeki değişim ($f=75$ Hz).....	161
Şekil 8.26. Çıkış gücüne bağlı olarak motor verimliliğindeki değişim ($f=100$ Hz).....	162
Şekil 8.27. Hıza bağlı olarak motor verimliliğindeki değişim ($f=100$ Hz).....	162
Şekil 8.28. Çıkış gücüne bağlı olarak motor verimliliğindeki değişim ($f=125$ Hz).....	163
Şekil 8.29. Hıza bağlı olarak motor verimliliğindeki değişim ($f=125$ Hz).....	164

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 5.1. Kesme zımbası kenarında oluşan aşınmanın gösterimi.....	39
Resim 5.2. Lazerde darbe süresinin etkisi.....	43
Resim 5.3. Isıdan etkilenen bölge, kerf genişliği, erimiş malzeme, yanma ve çapak oluşumunun gösterimi	49
Resim 5.4. Kesme işlemi esnasında kenarda aşırı erime ve çiziklerin oluşumu.....	50
Resim 5.5. Nozul yapısının gösterimi.....	54
Resim 5.6. Çoklu paso ile aşındırıcılı su jeti kesme yönteminde çentik profili (soldan sağa: üç paso, iki paso, tek paso)	55
Resim 7.1. Rulo haldeki silisli sacın makara üzerinde döndürülerek açılması, silisli sac malzemenin 1000x2000 mm ölçülerinde giyotin makas ile kesilmesi ..	89
Resim 7.2. 250x250 mm ölçülerinde sac plakaların üst üste dizilmesi, tel erezyon kesim yöntemi için sac plakaların sıkıştırılarak paketlenmesi.....	90
Resim 7.3. Stator saclarının lazer kesme yöntemi ile kesilmesi.....	92
Resim 7.4. Aşındırıcı parçacıkların toz haldeki görüntüsü, b) Aşındırıcı parçacıkların optik mikroskop altında büyütülmüş görüntüsü	94
Resim 7.5. Aşındırıcılı su jeti ile stator saclarının kesilmesi, b) Sac plaka üzerinde kesilen stator saclarının görünümü	95
Resim 7.6. Silisli sacların preslenmesi, sac paketinin kenarlardan kaynak yapılması...	96
Resim 7.7. Sac paketinin tel erezyon tezgahına bağlanması, stator sac paketinin kesilmesi	98
Resim 7.8. Stator sacın kesme kalıbı ile kesilmesi.....	100
Resim 7.9. Stator sac içerisinden rotor sacının ayrılması, rotor sacı üzerindeki olukların kesme kalıbı ile kesilmesi	101
Resim 7.10. Stator sac paketin demonte halde üstten görünüşü, stator sac paketin demonte halde önden görünüşü, stator sac paketin preslenmesi, stator sac paketinin bağlama kalıbı ile sabitlenmesi	103
Resim 7.11. Kaynak dikişinin önden görünüşü, kaynak dikişinin üstten görünüşü.....	104
Resim 7.12. Rotor sac paketinin yandan görünüşü, rotor sac paketinin önden görünüşü	105

Resim	Sayfa
Resim 7.13. Rotor sac paketinin üzerine alüminyum enjeksiyon döküm yöntemi ile çubukların dökülmesi, rotor sac paketinin döküm kalıbı içerisinde çıkartılması, alüminyum çubukları konulmuş rotor sac paketi, üretimi tamamlanmış rotor paketi	106
Resim 7.14. Stator oluklarının izolasyonu, bobinaj işleminin yapılması, bobinaj işleminden sonra bağlantıların düzenlenmesi, vernikleme işleminin yapılması	107
Resim 7.15. Üretimi tamamlanmış asenkron motor, motor bağlantı kutusu	109
Resim 7.16. Asenkron motor deney düzeneği (doğrudan ölçme)	111
Resim 8.1. Lazer, aşındırıcılı su jeti, tel erezyon ve kesme kalıbı ile silisli stator saclarının kesilmesi esnasında kesme kenarında oluşan yüzey durumu	119
Resim 8.2. Silisli stator sacların paketlenmesi ile oluşan yüzey durumları	120

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
A_{cond}	İletken kesit alanı, m^2
B	Manyetik akı yoğunluğu, T
b_k	Eşik değeri
C_{hyst}	Hysteresis kayıp katsayısı
C_{ec}	Eddy akım kayıp katsayısı
C_{exc}	Demir kayıp faktörü
c	Kalıp kesme boşluğu, %
$D_{bearing}$	Yataklama çapı, m
D_m	Kalıp boşluk çapı, mm
D_p	Kalıp zımba çapı, mm
f	Frekans, Hz
$F_{bearing}$	Eşdeğer dinamik yataklama yükü, N
G	Boyutsuzluk katsayısı
H	Manyetik alan gerilimi, A/m
h_l	İlk gizli katmandaki nöron sayısı
I	Sargı akım değeri, A
l_{cond}	Tek sarım için iletken uzunluğu, m
$k_{friction}$	Hava boşluğundaki sürtünme katsayısı
$k_{velocity}$	Akışkan hız faktörü, m/s
k_0	Stator sargısı düzeltme faktörü
l_m	Manyetik akı yol uzunluğu, m
M_{fr}	Mekanik kayıplar, Kw
M_Φ	Faz sayısı
m	Düğüm sayısı
η_{exc}	Bilinmeyen kayıplar için amprik düzeltme faktörü
n	Devir sayısı, dev/dak

Simgeler

Açıklamalar

η	Motor verimliliği, %
p	Spesifik direnç, Ωm
P_{bearing}	Rulmanlı yatakta sürtünme kayıpları, kW
P_{windage}	Rüzgâr kayıpları, kW
P_{cu}	Bakır kayıpları, kW
P_{Fe}	Demir kayıpları, kW
P_{hyst}	Hysteresis kayıpları, kW
p_{ec}	İlave kayıplar, kW
P_s	Stator sargı kayıpları, kW
$P_{s,0}$	Nominal yükte stator sargı kayıpları, kW
P_r	Rotor sargı kayıpları, kW
p	Kutup sayısı
$P_{1,0}$	Düzeltilmiş giriş gücü, kW
P_0	Yüksüz durumdaki giriş gücü, kW
P_{fw}	Sürtünme ve rüzgâr kayıpları, kW
P_c	Sabit kayıplar, kW
P_{Lr}	Artık kayıplar, kW
P_{LL}	İlave yük kayıpları, kW
$P_{1,0}$	Nominal giriş gücü, kW
P_2	Çıkış gücü, kW
P_T	Toplam kayıplar, kW
q_m	Hava boşluğundaki akış oranı, m^3/dak
q	Çıkış katmanındaki nöron sayısı
r_{rotor}	Rotor yarıçapı, m
R_{phase}	Tek faz sarım direnci, Ωm
R_{II}	Her bir gerilim noktasındaki sargı direnci, Ωm
R^2	Korelasyon katsayısı
s	Kayma miktarı, %
T	Tesla
t	Sac kalınlığı, mm
T	Tork, Nm
U_p	Kırılma noktası yüksekliği, mm

Simgeler**Açıklamalar**

U_i	İç gerilim değeri, Volt
V	Kesme hızı, m/dak
v_k	Giriş sinyali
w_k	Kerf genişliği, mm
ω_k	Ağırlıklar
ω_m	Açısal hız, rad/san
y_k	Çıkış
β	Optimum kırılma açısı
α_{cu}	Sıcaklık katsayısı
μ_{fr}	Sürtünme katsayısı
γ	Akışkan yoğunluğu, kg/m ³
ρ_{cu}	Sargı direnci, Ω m
θ	Yayılma açısı
μs	İki darbe arasındaki süre, mikron saniye
γ	Korelayon katsayısı
φ	Aktivasyon fonksiyonu

Kısaltmalar**Açıklamalar**

AC	Alternating Current (Alternatif Akım)
ANN	Artificial Neural Network
ANOVA	Analysis of Variance (Varyans Analizi)
AWJ	Abrasive Water Jet
CEMEP	(European Committee of Manufacturers of Electrical Machines and Power Electronics)
CNC	Computer Numerical Control (Bilgisayarlı Sayısal Kontrol)
DC	Direct Current (Doğru Akım)
EDS	Energy-Dispersive X-Ray Spectroscopy (X Işını Enerji Dağıtım Analizi)
EFF	Efficiency
EN	European Norm (Avrupa Standartları)
Grain-Oriented	Tane Yapısı Yönlendirilmiş
GW	GigaWatt
HAZ	Heat Affected Zone (Isıdan Etkilenen Bölge)
Hz	Hertz
IEC	International Electrotechnical Commission
kW	Kilowatt
MAPE	Mean Absolute Percentage Error (Ortalama Mutlak Yüzdelik Hata)
MPa	Megapascal
MSE	Mean Squared Error (Ortalama Kareler Hatası)
<i>M_v</i>	Motor Verimliliği
<i>M_y</i>	Motor Yükleme Oranı
N₂	Azot
PVD	Physical Vapour Deposition (Fiziksel Buhar Çökeltme)
Re	Reynolds Number
RMS	Root Mean Square (Ortalama Karekök)
SEM	Scanning Electron Microscope (Tarama Elektron Mikroskobu)

Kısaltmalar**TiN*****T_k*****TS****YAG****YSA** **μm** **Açıklamalar**

Titanyum Nitrür

Toplam Kayıplar

Türk Standartları

Yttrium-Aliminum Garnet

Yapay Sinir Ağları

Mikrometre

1. GİRİŞ

Enerji politikalarının genel çerçevesini, küresel ısınmanın etkileri ve dünya çapında enerji tüketimini azaltma çabaları belirlemektedir. Günümüz enerji politikalarında talep edilen stratejiler arasında, fosil yakıtlardan kaynaklanan CO₂ emisyonlarını azaltmak ve yenilenebilir enerji üretiminin artırılması yer almaktadır. Dünya genelinde toplam enerji tüketimi çarpıcı bir şekilde artacağı tahmin edildiği için [1] özellikle Asya ve üçüncü dünya ülkelerinde enerji tüketimi yüksek olan işletmelerdeki tesislerin verimliliğinin artırılması gerekmektedir. Yakın gelecekte, farklı formlarda enerjinin ne kadar önemli olduğu daha da ortaya çıkacaktır. Taşıma sistemlerinde, özellikle otomotiv sektöründe ihtiyaç duyulan enerjinin üretilmesi ve bu enerjinin ekonomik bir şekilde tüketilmesi son derece önem taşımaktadır. Dolayısı ile gelecekteki enerji ihtiyaçlarını karşılamak amacıyla jeneratörlerin ve elektrik makinalarının verimliliğinin geliştirilmesi gerekmektedir. 2035 yılına kadar, elektrik makinalarında enerji tasarrufu ile ilgili verimlilik iyileştirmelerinin geliştirileceği beklenmektedir. Bu öngörü, üretilen tüm elektrik enerjisinin 3/4'ünün yine bu makinalar tarafından tüketileceği gerçeğine dayanmaktadır [2]. Değişik hızlarda, yüksek verimliliğe sahip elektrik makinalarının veriminin optimizasyonu, bu makinalar üzerindeki enerji kayıpları ile ilgili çalışmaların geliştirilmesine bağlıdır [3]. Elektrik makinalarındaki kayıplar üzerinde daha fazla araştırmaların yapılması, dünya standartlarında verimlilik sınıflarının belirlenmesinde rol oynamaktadır [4, 5].

Son yıllardaki araştırmalarda, elektrik makinalarındaki kayıpların etkisi üzerinde hala bilinmeyen faktörlerin olduğu belirtilmektedir. Bu faktörleri belirlemek, ölçmek ve her bir kayıp etkeninin değerini tam olarak ifade etmek zordur. Elektrik makinalarında oluşan farklı kayıpları daha derin ve detaylı bir şekilde anlamak için, bu makinaların verimliliğini geliştirme üzerinde çalışmaların yapılması zorunlu olmuştur. Bu nedenle, günümüzde karmaşık analitik elektrik makina modelleri geliştirilmiş ve sonlu elemanlar simülasyon metodları yardımıyla, elektrik makinalarının çalışma karakteristiklerinin ve bu makinalardaki kayıpların belirlenmesi ile verimlilikleri üzerindeki çalışmaların geliştirilmesi sağlanmaktadır [6].

Elektrik enerjisinin maliyetinin diğer enerji türlerine göre yüksek olması, tasarruf oranının küçük olduğu durumlarda bile tasarruf maliyeti açısından büyük rakamları bulmaktadır.

Elektrik enerjisi, fabrikalardaki işlemlere bağlı olarak toplam enerjinin %10-25'ine karşılık gelirken, bazı durumlarda toplam enerji maliyetinin % 50'ye yakını, elektrik enerjisi için ödenir. Bu sebeple, elektrik enerjisinde uygulanabilecek tasarruf yöntemleri toplam maliyeti çok düşürecektir. Endüstride elektrik enerjisi tüketiminin %10'u aydınlatmaya ve ısıtmaya, % 90'ı da elektrik motorları için harcanmaktadır. Bu motorların % 95'i alternatif akım kısa devre rotorlu motorlardır [7]. Elektrik motorları, elektriksel gücün mekanik güce çevrilmesi amacıyla kullanılır. Sanayide elektrik enerjisinin çoğu, motorlarda harcandığı için; motor seçimi, çalıştırılması ve bakımı enerji tasarrufu için önem arz etmektedir.

Elektrik motorları, 1998 yılında CEMEP (European Committee of Manufacturers of Electrical Machines and Power Electronics) tarafından hazırlanan verilere göre 1,1 kW ile 90 kW arasında üç temel verimlilik sınıfında üretilmekte ve değerlendirilmektedir. Bunlar;

- EFF1 Sınıfı: En verimli,
- EFF2 Sınıfı: Orta verimli,
- EFF3 Sınıfı: En verimsiz olarak sınıflandırılmaktadır.

Yeni hazırlanan IEC 60034-30:2008 standartlarına göre elektrik motorları için verimlilik sınıfları 0,75 kW ile 375 kW arasına genişletilmiş olup tanımlamaları şöyle olmuştur;

- IE1 Sınıfı: Standart motor
- IE2 Sınıfı: Yüksek verimli motorlar (1 Haziran 2011'de uygulamaya geçilmiştir)
- IE3 Sınıfı: Premium verimli motorlar (0,75 kW–375 kW arası 1 Ocak 2015'te uygulamaya geçilmiştir)
- IE4 Sınıfı: Süper premium verimli motorlar (1 Ocak 2017'de tamamı uygulamada olacak)

Çizelge 1.1'de CEMEP üyesi ülkeler ile üye olmayan ülkeler ve Türkiye'de elektrik motorlarının verimlilik sınıflarına göre kullanım oranları verilmiştir. Çizelge 1.1'de görüldüğü gibi CEMEP üyesi ülkelerde en fazla EFF2 sınıfı (orta verimli) motorlar kullanılırken, ülkemizde en yaygın kullanım alanını EFF3 sınıfı (verimi düşük) motorlar oluşturmaktadır. Buradan da anlaşılabacağı gibi ülkemizde elektrik makinalarında kullanılan motor sınıfı sebebi ile ciddi anlamda enerji israf edilmektedir [8, 9].

Çizelge 1.1. CEMEP ile gönüllü anlaşma yapan ve yapmayan AB ülkeleri ile Türkiye sanayisinde verim sınıflarına göre motor kullanım oranları

VERİM SINIFI	CEMEP İÇİ	CEMEP DIŞI	TÜRKİYE
EFF1	% 7	% 6	% 7
EFF2	% 85	% 66	% 28
EFF3	% 8	% 28	% 65

Ekonomik ve çevresel sebepler, yüksek verime sahip elektrik motorları üzerinde daha fazla araştırma yapılmasını gerekli kılmaktadır. Elektrik motorlarında kullanılan silisli saclarda oluşan kayıpların azaltılması, bu soruna çözüm bulmak için en önemli adımlardan biridir. Teknolojinin gelişmesine bağlı olarak, elektrik motorlarının yapısındaki manyetik malzemelerin, yüksek akı yoğunluklarında ve az kayıpla çalıştırılmasını mümkün kılmaktadır. Manyetik akı yoğunluğunun yanı sıra frekans değerinin artması, manyetik kayıpların artmasına neden olmaktadır. Buna bağlı olarak, yüksek verime sahip elektrik motoru üretmek için araştırmacıların manyetik malzemelerin kayıplarını, daha geniş frekans ve akı yoğunluğu bölgesinde değerlendirmesi gerekmektedir. Bu açıdan, manyetik indükleme altında elektrik motorlarında oluşan güç kayıplarını azaltmak için silisli sacların özelliklerinin incelenmesi ve verimliliği arttırmak için daha gerçekçi verilerin hesaplanması, motor tasarımcıları açısından deneysel çalışmalar sonucunda ortaya çıkmaktadır [10].

Elektrik motorlarında en çok Si-Fe alaşımlı sac malzemesi tercih edilmektedir. Tanecikleri yönlendirilmiş (grain-oriented) %3 Si-Fe saclar, trafo nüvelerinde kullanılmaktadır. Yönlendirilmemiş Si-Fe saclar ise motor ve jeneratör uygulamalarında kullanılmaktadır [11]. Yüksek verime sahip elektrik motorlarının üretilmesi için nüvelerde meydana gelen kayıpların çok iyi bilinmesi gerekmektedir [12].

Elektrik motorlarının stator ve rotor yapıları, lamine halde ince silisli saclardan üretilmektedir. Bu saclar, lamine halde istenilen stator ve rotor yapısında uygun geometride üretildikten (mekanik, lazer kesim v.b.) sonra saclar, üst üste dizildikten sonra preslenerek kaynak işlemi yapılır ve böylece stator ve rotor paketlenmiş hale getirilir. Bu imalat prosesleri, demir kayıplarının artmasına, dolayısı ile elektrik motorlarının verimliliğinin azalmasına neden olmaktadır [13-15].

Tezin Amacı ve Kapsamı

Farklı kuruluşların öngörülerine göre; dünya enerji talebi, 2030 yılına kadar mevcut tüketim seviyesinden %40 daha fazla olması beklenmektedir. Bu talebi karşılama çabası, gerekli enerjinin temini dışında iki ayrı risk unsurunu beraberinde getirmektedir. Bunlardan birincisi, artan çevresel riskler ile enerji arz ve talebinin coğrafi olarak aynı yerde olmamasıdır. İkincisi ise, talebi karşılayacak kaynakların sınırlı sayıda ülkede bulunmasından kaynaklanan enerji arz güvenliği riskleridir. Enerji ihtiyacındaki artışlara bağlı olarak elektrik makinalarının enerji üretiminde, enerjinin dönüşümünde, iletim ve dağıtımındaki kullanım oranı giderek artmaktadır. Günümüzde üretilen tüm enerjinin yaklaşık % 60'ı yine elektrik makinaları tarafından tüketilmektedir. Artan enerji ihtiyacı ve elektrik makinalarının (elektrik motorları, jeneratörler, transformatörler, endüktörler vb.) enerjinin üretiminden tüketimine kadar sahip olduğu rol, bu makinaların önemini ortaya koymaktadır. Bu makinalarda, verim artışını sağlamayı amaçlayan çalışmaların çoğu, makinaların elektromanyetik ve elektromekanik tasarımlarının iyileştirilmesi üzerine olduğu görülmektedir. Makina verimini etkileyen önemli faktörlerden, elektrik makinalarının mekanik imalatı ve üretim yöntemleri üzerinde detaylı çalışma yapılmamıştır. Örneğin, dönel makinalarda sürtünme-rüzgâr kayıpları ile tüm dönel ve hareketsiz makinalarda demir kayıpları elektrik makinalarının verimliliğini belirlemede önemli etkiye sahiptir. Bu çalışmada, elektrik motorlarında kullanılan silisli saclar; kesme kalıbı, tel erozyon, lazer ve aşındırıcılı su jeti ile kesilerek, kesim yöntemlerinin elektrik motorların verimliliğine etkisi araştırılmıştır. Elektrik motorlarının verimliliklerinde çok küçük artışlar bile enerji kayıplarını azaltacağı, yerli firmaların rekabet gücünü arttıracacağı ve ülke ekonomisine katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

Bu tez ile daha verimli elektrik motoru imalatı gerçekleştirilmesi, milli şirketlerin dış rekabet gücünün artırılarak ülke ekonomisine katkı sağlanması ve önümüzdeki yıllarda düşük verimli motorların ihraç edilmesinde yaşanabilecek problemlerin önlenmesine yardımcı olması amaçlanmıştır.

Bu tez çalışmasından elde edilen sonuçlar, elektrik makinası tasarımcılarına ve imalatçılarına daha verimli elektrik motoru üretmede yol gösterici olacaktır. Bu tez çalışmasını önemli kılan noktalardan bir diğeri de, bir veya iki kesim yönteminin değil, birbirinden farklı özellikler taşıyan dört kesim yönteminin, elektrik motorlarının verimi

üzerindeki etkilerinin bir arada araştırılmasıdır. Yerli ve yabancı çalışmalarda daha önce bu şekilde çalışmanın yapılmadığı da dikkate alındığında, bu çalışma ile düşük verim değerlerine sahip elektrik motorları üreten sanayi kuruluşlarının rekabet gücünün ve üretim kalitesinin artırılması amaçlanmıştır. Bunun sonucunda elde edilecek daha verimli elektrik motorları ile sanayi kuruluşları, ulusal pazarın yanı sıra uluslararası pazarda kendisine yer bularak pazar ve ihracat potansiyelini artıracakları düşünülmektedir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Bu bölümde, elektrik motorlarının verimliliğini etkileyen üretim süreçleri ile ilgili literatürde yapılan çalışmalara değinilmiştir. Yapılan bu çalışmalar aşağıdaki gibi özetlenebilir;

Wenmin ve diğerleri; silisli sacların farklı kesme prosesleri ile kesilmesinin sacların manyetik özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Çalışmada, Epstein ölçüm yöntemi referans alınarak, 30x300 mm ölçülerinde yönlendirilmemiş 35W270 silisli sac, mekanik, lazer, tel erezyon ve su jeti kesim yöntemleri kullanılmıştır. Çalışma sonucunda, sabit 1,5 T ve 50 Hz frekans değerlerinde yapılan ölçümlerde, termal gerilmelerden dolayı en fazla demir kayıplarının lazer kesim yöntemi ile kesilen silisli saclarda oluştuğunu ve en az demir kayıplarının ise su jeti kesim yönteminde olduğu belirtilmiştir. Ayrıca, silisli saclar üzerinde tavlama işlemi uygulandığında, demir kayıplarında önemli miktarda azalma olduğunu ve frekansın artırılması ile demir kayıplarında artış olduğunu da belirtmişlerdir [16].

Emura ve diğerleri; silisli sacların farklı kesme yöntemleri ile kesilmesine bağlı olarak elektrik ileten çeliklerin manyetik özellikler üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Çalışmada, % 2 silisyum oranına sahip yönlendirilmemiş lamine sac ve 1,5 T (Tesla) indükleme değeri kullanılmıştır. Kesme yöntemi olarak, kesme kalıbı, giyotin ve lazer kesme yöntemleri kullanılmıştır. Kesme kalıbı ve giyotin kesme yöntemiyle yapılan çalışmada, kesilen kenarda plastik deformasyonun oluştuğu ve bu deformasyonun tane yapısını olumsuz etkilediği belirtilmiştir. Lazer kesme işleminde, kesme esnasında malzemedeki ısınmadan dolayı termal gerilmelerin meydana geldiği ve bunun da manyetik özellikler üzerinde olumsuz etki yaptığı belirtilmiştir. Sonuç olarak, kesme kalıbı ile kesme yöntemiyle yapılan çalışmada, lazer ve giyotin yöntemine göre daha az manyetik kayıpların gerçekleştiği belirtilmiştir [17].

Belhadj ve diğerleri; lazer ve mekanik kesme yöntemlerinin, yönsüz (Non-oriented) tane yapısına sahip silisli saclar üzerinde oluşturduğu manyetik özellikler üzerine araştırma yapmışlardır. Çalışma sonucunda en iyi manyetik özelliklerin mekanik kesme yöntemi ile elde edildiği belirtilmiştir. Lazer kesme yönteminin, silisli sac üzerinde oluşturduğu termal

etkiden dolayı iç gerilmelere neden olduğu ve bunun da silisli sacın manyetik özelliklerini olumsuz etkilediğini belirtmişlerdir [18].

Ossart ve diğerleri; kesme kalıbı ile üretilen silisli sac paketlerinin manyetik alan üzerindeki etkilerini deneysel olarak inceleyerek, elde edilen verileri sonlu elemanlar metodunu kullanarak test etmişlerdir. Çalışmada, yönsüz Fe-Si M330-50A sac kullanılmıştır. Kesme esnasında oluşan plastik deformasyondan kaynaklanan kesme gerilmeleri, indükleme sonucunda bu gerilmenin silisli sacın manyetik alan ve mikro sertliği üzerinde olumsuz etki yaptığı belirtilmiştir. Elde edilen veriler, sonlu elemanlar metoduyla modellenerek, yapılan çalışmanın doğruluğu test edilmiştir [15].

Nakata ve diğerleri; silisli sacın kesilmesi esnasında oluşan gerilmelerin manyetik özellikler üzerine olan etkilerini araştırmışlardır. Çalışma, mekanik kesme yöntemi kullanılarak, 0,35 mm kalınlığında ve 35A250 yönsüz tane yapılı silisli sac ile gerçekleştirilmiştir. 50 Hz frekans ve 1,49 T (Tesla) indükleme şiddeti kullanılarak yapılan çalışma sonucunda, kesme boyundaki artışa paralel olarak, kesme gerilmesinden dolayı akış yoğunluğunda azalma meydana geldiği belirtilmiştir [13].

Dickmann ve diğerleri; yönsüz silisli saclar üzerinde, mekanik (kesme kalıbı) ve lazer kesme yöntemiyle oluşan gerilmelerin manyetik özellikler üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Çalışma sonucunda, lazer kesme yöntemi, mekanik kesme yöntemine göre kıyaslandığında lazer kesme yönteminde termal gerilmelerden oluşan manyetik kayıpların daha fazla olduğunu belirtmişlerdir [19-20].

Liu ve diğerleri; sonlu elemanlar metodunu kullanarak M400-50A silisli sac malzemenin kesme kalıbı ile kesilmesi esnasında oluşan demir kayıpları üzerine araştırma yapmışlardır. Çalışma sonucunda, demir kayıplarının, stator çekirdek geometrisine, stator üzerindeki kanalların tasarımına, kutup sayısına ve kesme boyuna bağlı olduğu belirtilmiştir. Kesme boyundaki artış ile demir kayıplarının arttığı belirtilirken, küçük motorlarda oluşan kayıpların % 2-3, büyük motorlarda ise bu kayıpların % 4-6 arasında değiştiği belirtilmiştir [21].

Lebouc ve diğerleri; indüksiyon motoru kullanarak M330-65A silisli sacın kesme kalıbı ile kesilmesinde oluşan kesme gerilmelerinin malzemenin manyetik özellikler üzerindeki

etkisini araştırmışlardır. Referans olarak, aynı stator geometrisine sahip üç fazlı indüksiyon motoru (SST) kullanılmıştır. Çalışma sonucunda, silisli sac ile SST örneği üzerinde indükleme yapıldığında, kesme kalıbı yöntemiyle kesilen silisli saclarda, kesme gerilmelerinden dolayı manyetik kayıpların oluştuğu, ancak SST statora göre daha iyi verim elde edildiği belirtilmiştir. Ayrıca, çalışma sonuçları, sonlu elemanlar metodu ile modellenerek sonuçların güvenilirliği test edilmiştir [22].

Boglietti ve diğerleri; silisli sac malzemenin kesme kalıbı ile kesilmesi sonucunda, kesme yönteminin manyetik özellikler üzerine olan etkisini araştırmışlardır. Çalışmada, dört farklı çekirdek tipi, halka sayısı ve kesme boyu kullanılmıştır. Çalışma sonucunda, stator çekirdek halka sayısının artması ile manyetik kayıpların arttığı ve dolayısı ile manyetik geçirgenliğin azaldığı tespit edilmiştir [23].

Oka ve diğerleri; silisli sacların kesme kalıbı ve laminasyon yöntemiyle üretilen iki farklı statorun dönel makineler üzerindeki manyetik etkisini araştırmışlardır. Çalışma sonucunda, lamine ve kesme kalıbı ile üretilen stator çekirdeğine 0,4-1,3 T aralığında indükleme yapıldığında, lamine çekirdekte oluşan demir kayıplarının % 4,7 daha fazla olduğunu belirtmişlerdir [24].

Smith ve Edey; silisli sac malzemelerin kesme yöntemlerinin demir kayıpları üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Araştırmada, kesme esnasında oluşan ısıdan dolayı termal gerilmelerin oluştuğu ve bunun da 1,5 T ve 50 Hz indükleme ile manyetik kayıplar üzerinde olumsuz etkiye sebep olduğu belirtilmiştir. Ayrıca, kesme kalıbı ile yapılan kesme işlemi esnasında oluşan kesme gerilmelerinden dolayı manyetik geçirgenliklerde azalma meydana geldiği de belirtilmiştir [25].

Moses ve diğerleri; silisli saclarda akı yoğunluğunun dağılımı ve güç kaybı üzerinde kesme kenarında oluşan kesme gerilmelerinin etkisini araştırmışlardır. Yaptıkları çalışmada, 300x100x0,48 mm ölçülerinde 400-50AP yönsüz silisli sac kullanmışlardır. Giyotinle kesme yöntemi kullanılarak 100 mm genişliğinde (12,5x8 mm), (50x2 mm) ve (25x4 mm) ölçülerinde üç farklı şerit malzeme kullanmışlardır. Çalışma sonucunda toplam kesilen kenar uzunluğunun (12,5x8 mm) artması ile motor güç kaybında (w/kg) ve manyetik alan geriliminde (A/m) artış olduğunu belirtmişlerdir [14].

Gomes ve diğerleri; mekanik ve lazer kesme yöntemini kullanarak, bu kesim yöntemlerinin Fe-Si içerikli çeliklerin manyetik özellikleri üzerine olan etkilerini araştırmışlardır. Yaptıkları çalışmada, 30, 15, 10 ve 5 mm genişliğinde ve 0,5 mm kalınlığında orta düzeyde silisyum içeren sac malzeme kullanmışlardır. Çalışma sonucunda, lazer ile kesme yönteminde mekanik kesme yöntemine göre malzemenin mikro sertliğinde azalma olduğu ve termal şoklardan kaynaklanan artık gerilmelerden dolayı lazer ile kesim yönteminde hysteresis kayıplarının daha fazla olduğu gözlenirken 5 mm genişliğindeki şerit malzemede kayıpların daha fazla olduğunu gözlemişlerdir. Ayrıca, kayıpların en aza indirgenmesi için malzeme mikroyapısının optimum seçilmesi gerektiğini de vurgulamışlardır [26].

Loisos ve Moses; yönsüz silisli sacların lazer ve mekanik kesme yöntemleri ile kesilmesinin manyetik akı dağılımı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Yaptıkları çalışmada, 300x100x0,5 mm ölçülerinde M250-50A, M400-50A, M800-50A ve M940-50A malzeme kullanmışlardır. Çalışma sonucunda, YAG lazer ile kesme yönteminin mekanik kesme yöntemine göre manyetik özellikler üzerinde daha az etkiye sahip olduğu, bunun da lazer ile kesme yönteminde hızlı ısınma ve soğumanın malzemenin tane yapısının kesme kenarında olumlu bir etki oluşturduğunu belirtmişlerdir [27].

Howard ve Rhett; elektrik makinalarında kullanılan silisli sacların farklı kesim parametreleri kullanarak su jeti kesim yöntemi ile kesilmesi esnasında oluşan çapak durumunu ve sacların manyetik geçirgenliği üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Çalışmada, 60x20 mm ölçülerinde M-19 silisli sac kullanmışlardır. Orta kalitede kesim AWJ3 için 16,3 mm/dak ilerleme hızı ve 18,7 mm/dak doğrusal hız, yüksek kalitede kesim AWJ5 için 10,1 mm/dak ilerleme hızı ve 10,4 mm/dak doğrusal hız, çok yüksek kalitede kesim (HTPM-High Throughput Profile Milling) için ilerleme hızı 68,4 mm/dak ve doğrusal hız 85,3 mm/dak olarak kullanmışlardır. Çalışma sonucunda, HTPM kesim yönteminde en az çapağın olduğu, AWJ5 kesim yönteminde ise en fazla çapağın olduğu gözlenmiştir. Ayrıca, ortalama demir kaybının en fazla 3,23 w/kg ile AWJ3 kesim işleminde gerçekleştiği, ortalama manyetik geçirgenliğin 1350,1 (Henries/m) ile en fazla AWJ5 kesim işleminde gerçekleştiğini belirtmişlerdir [28].

Gmyrek ve diğerleri; kesme kalıbı ile silisli sacların kesilmesinin, kesilen bölgenin hasar genişliği ve manyetik özellikler üzerindeki etkisini modelleyerek ve deneysel olarak araştırmışlardır. Çalışma sonucunda, kesme esnasında hasar bölgesinin artması ile malzemenin kristalografik yapısında iç gerilmelere bağlı olarak deformasyonların olduğu,

bunun da malzemenin manyetik özellikler üzerinde olumsuz etkiye neden olduğunu belirtmişlerdir [29].

Vandenbosshe ve diğerleri; yüksek doygunluğa sahip elektrik motorlarında kullanılan silisli sacların, kesme kalıbı ile kesilmesi esnasında oluşan demir kayıplarının belirlenmesi üzerine araştırma yapmışlardır. Çalışmada, geleneksel (A) ve otomobillerde kullanılan start/stop uygulamaları (B) için iki farklı malzeme kullanmışlardır. Çalışma sonucunda, frekansın artmasına bağlı olarak A malzemesi kullanılarak oluşturulan rotorlarda demir kayıplarının daha fazla olduğu ve ölçülen demir kayıpları ile hesaplanan demir kayıpları arasında %30 fark olduğu ve ölçülen demir kayıp değerinin daha fazla olduğunu belirtmişlerdir [30].

Siebert ve diğerleri; yönsüz silisli sacların lazer (disk ve CO₂) ve giyotin yöntemi ile kesilmesi esnasında oluşan demir kayıplarının ve manyetik alan gerilmelerinin belirlenmesi üzerine araştırma yapmışlardır. Çalışma sonucunda, lazer ile kesme sonucunda pik değerinin artması ile manyetik alan gerilimi ve çekirdek kayıplarının daha fazla oluştuğunu gözlemişlerdir. CO₂ lazer kesme yönteminin disk lazer kesme yöntemine göre daha olumsuz sonuçlara neden olduğunu belirtmişlerdir [31].

Kurosaki ve diğerleri; yönsüz silisli saclar üzerinde uygulanan kesme kalıbı ve tel erezyon kesme yönteminin manyetik özellikler üzerine olan etkilerini araştırmışlardır. Çalışmada, 300x30 mm ölçülerinde geleneksel tavlanmamış ve tavlanmış olarak (750 °C x 2 Saat x N₂) 50A470JIS silisli saclar kullanmışlardır. Çalışma sonucunda, tel erezyonla kesme yöntemi ile daha iyi sonuçlar elde edildiği gözlenirken, malzeme olarak tavlanmış silisli sac malzemenin daha iyi performans gösterdiğini belirtmişlerdir [32].

Arshad ve diğerleri; silisli sacların giyotin, lazer ve kesme kalıbı yönteminin manyetik özellikler üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Çalışmada, 0,5 mm kalınlığında, 10 ve 15 mm genişliğinde yönsüz şerit halde M400-50A ve M680-50A silisli sac malzemeler kullanmışlardır. Çalışma sonucunda, 10 ve 15 mm genişliğe sahip M680-50A malzemenin giyotin ve lazer yöntemi ile kesildiğinde, şerit genişliğinin artması ile manyetik kayıplarda artış olduğunu gözlemişlerdir. Lazer kesme yönteminin, giyotin ile kesme yöntemine göre düşük indüklemeye değerlerinde daha fazla manyetik kayıpların oluştuğu ve yüksek indüklemeye değerlerinde ise daha az manyetik kayıpların olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca, malzemenin anizotropik yapısından dolayı her iki sac arasındaki manyetik kayıpların % 5-20 arasında

olduğu ve stator paketinin preslendikten sonra bir arada tutulması için yapılan kaynak işleminin % 0,5-1 aralığında manyetik kayıplarda artışa neden olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca, yalıtım işlemine rağmen, presleme işlemi sonrasında eddy akım kayıplarının oluştuğunu da belirtmişlerdir [33].

Schoppa ve diğerleri; yönsüz silisli sacların farklı kesim yöntemleri kullanılarak, bu kesim yöntemlerinin manyetik özellikler üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Çalışma, mekanik kesme, lazer ve su jeti kesim yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda, su jeti ile kesme yönteminin manyetik özellikler açısından daha olumlu sonuçlar verdiği belirtilmiştir [34].

Rygal ve diğerleri; yönsüz silisli saclar üzerinde akı yoğunluğu dağılımı ve manyetik alan üzerinde kesme gerilmelerinin etkisini araştırmışlardır. Çalışmada, 300x100x0,5 mm ölçülerinde, 940-50A (S1), 530-50A (S2), M800-50A (S3), 700-50AP (S4), 400-50AP (S5), M250-35A (S6) ve M330-50A (S7) farklı silisyum ve tane boyutuna sahip şerit malzemeler kullanmışlardır. S1 malzemesi en düşük silisyum içeriği ve tane boyutuna (15-20 μm) sahipken, S7 malzemesi en yüksek silisyum içeriği ve tane boyutuna (135-150 μm) sahip olduğunu belirtmişlerdir. Çalışma sonucunda, kesim işleminden önce ve sonra elde edilen verilere göre manyetik alan ve akı yoğunluğunun dağılımı üzerinde en önemli faktörün malzemenin tane boyutunun olduğu, silisyum içeriğinin ve kesme gerilmelerinin tane boyutuna göre etkisinin daha az olduğunu belirtmişlerdir [35].

Boehm ve Hahn; farklı indükleme değerleri üzerinde kesme kenarındaki deformasyonun ve geometrik parametrelerin etkisini sonlu elemanlar metodu ile araştırmışlardır. Kesme kalıbı yöntemine göre çalışma sonucunda, kesme kenarındaki deformasyonların manyetik alan üzerinde olumsuz sonuçlara neden olduğu gözlenirken, stator bağ yüksekliği ve bağ genişliğindeki ölçülerdeki azalmanın manyetik alan dağılımında düzensizlikleri arttırdığı ve bunun da büyük ölçülere sahip mıknatıslar kullanılarak azaltılabileceği belirtilmiştir. Ayrıca, kesme kenarındaki deformasyonların oluşturduğu olumsuz etkinin, geometrik parametrelerden daha az olduğunu da belirtmişlerdir [36].

Crevecoeur ve diğerleri; silisli sacların kesilmesi esnasında kesme kenarında oluşan malzeme hasarının malzemenin manyetik özellikleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Çalışmada, yönsüz ve 0,5 mm kalınlığında %2 Si oranına sahip M350-50A sac

kullanmışlardır. CO₂ lazer kesim yöntemi için 20 ve 100 mm/s olmak üzere iki farklı kesme hızı değerleri kullanmışlardır. Çalışma sonucunda, 5 Hz frekans değerinde, 100 mm/s kesme hızında manyetik geçirgenliğin daha iyi olduğunu ve kesme kenarında plastik deformasyona bağlı oluşan artık gerilmelerin artması ile manyetik geçirgenliğin azaldığını belirtmişlerdir [37].

Siebert ve diğerleri; silisli sacların, giyotin ve lazer kesme yöntemi ile kesilmesinin manyetik özellikler üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Çalışmada, 0,35 mm kalınlığında M330-35A silisli sac, 5-10 ve 30 mm genişlik ölçülerinde şerit olarak kullanmışlardır. Çalışma sonucunda, 50 Hz frekans değerinde, lazer kesme yönteminde oluşan hysteresis kayıplarının mekanik kesme (giyotin) yöntemine göre daha fazla olduğunu ve şerit genişliğinin azalması ile her iki kesim yönteminde de hysteresis kayıplarının arttığını belirtmişlerdir. Ayrıca, saclara gerilim giderme tavlama uygulandığında, hysteresis kayıplarında önemli derecede azalma olduğunu da gözlemişlerdir [38].

Klimczyk ve diğerleri; silisli sacların farklı kesme yöntemleri ile kesilmesi sonucunda oluşan gerilmelerin (çekme-basma) sacların manyetikleşme özellikleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Çalışmada, 305x30x0,3 mm ölçülerinde silisli sac kullanarak, gerilme sonucundaki manyetik özelliklerdeki değişim, mekanik, lazer ve tel erezyon kesim yöntemi ve gerilim giderme tavlama işlemi yapılarak değerlendirmelerde bulunmuşlardır. Çalışma sonucunda, aynı basma gerilmesi değerlerinde kesme sonrası yapılan tavlama işlemi ile silisli saclarda manyetikleşme özelliğinin azaldığı ve aynı indükleme değerlerinde (T), tel erezyon ile kesildikten sonra tavlama işlemi yapılmış saclarda daha az hysteresis kayıplarının oluştuğunu gözlemişlerdir [39].

Takahashi ve diğerleri; sabit mıknatıslı motorların demir kayıpları üzerinde kesme yönteminin ve stator sabitleyici mekanizmanın etkisini araştırmışlardır. Çalışmada, 5x26 mm ölçülerinde tel erezyonda, 3,5x28 mm ölçülerinde mekanik kesme yöntemi ile kesilmiş yönsüz silisli sac kullanmışlardır. Tel erezyon kesim yöntemi ile kesilmiş saclarda oluşan demir kayıplarının, alüminyum çerçeve içerisinde sıkı geçme yöntemi ile birleştirilmesi sonucunda mekanik kesme yöntemine göre daha fazla olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca, sıkı geçme işleminden dolayı motor üzerindeki demir kayıplarında % 10 artış olduğunda, bu kayıplar üzerinde, kesme gerilmelerinin % 4 ve eddy akımlarının ise % 2 etkisinin olduğunu da belirtmişlerdir [40].

Gaworska-Koniarek ve diğerkleri; lazer (azot ve hava) ve mekanik kesme yöntemleri ile silisli sacların kesilmesinin manyetik özellikler üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Çalışmada, 0,5 mm kalınlığında M330-50A silisli sacdan tek sac test yöntemi için 500x500x0,5 mm'den 2 adet, 250x250x0,5 mm'den dört adet, 125x125x0,5 mm'den sekiz adet, 62,5x62,5x0,5 mm'den 16 adet, 31,25x31,25x0,5 mm'den 32 adet silisli sac kesilerek lazer ve mekanik kesme yöntemlerinin manyetik özellikler üzerindeki etkileri üzerine değerlendirmelerde bulunmuşlardır. Çalışma sonucunda, sabit indüklemeye değerde lazer kesim yönteminde 31,25x31,25x0,5 mm şerit malzemelerde oluşan manyetik alanın daha fazla olduğu ve hava ile lazer kesim yönteminde azot ile yapılan lazer kesim yöntemine göre daha fazla manyetik alanın oluştuğunu belirtmişlerdir. Ayrıca, hava ile lazer kesim işlemi sonucunda oluşan oksitlenmeden dolayı, azot ile lazer kesme işleminin manyetik özellikler açısından daha iyi sonuçlar verdiğini ifade etmişlerdir. Aksi takdirde, manyetik özelliklerde kayıpların oluşacağını belirtmişlerdir. Mekanik kesme işlemi sonucunda, lazer kesim yöntemine göre manyetik özelliklerde oluşan kayıpların daha az olduğunu da belirtmişlerdir [41].

Bali ve Muetze; lazer ve mekanik kesme yöntemlerinin silisli saclar üzerindeki manyetik etkilerini araştırmışlardır. Çalışma, CO₂ ve FKL (Solid state laser cutting-katı hal lazer kesimi) lazer, giyotin ve kesme kalıbı yöntemleri kullanarak M270-35A, M400-50A ve M800-65A silisli sac malzemelerle gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda, Epstein ölçüm yöntemi dikkate alınarak düşük manyetik gerilme şartları altında CO₂ lazer ile kesilen saclarda oluşan manyetik geçirgenliğin, katı hal lazer (FKL) kesim yöntemi ile kesilen örneklere göre daha düşük olduğu belirtmişlerdir. Ayrıca, stator sac paketlerinde oluşan çekirdek kayıplarının CO₂ ve FKL lazer kesim yöntemlerinde yaklaşık olarak aynı olduğu, ancak mekanik kesme yönteminde ise çekirdek kayıplarının daha düşük olduğunu da belirtmişlerdir [42].

Mucha, kesme kalıbı ile silisli sacların kesilmesi esnasında oluşan çapak oluşumu üzerinde, kesici takım malzemesinin etkisini araştırmışlardır. Çalışmada, kesme kalıbı malzemesi olarak tungsten karbür, sinterlenmiş çelik ve yüksek hız çeliği kullanılmıştır. Bu malzemelere ilave olarak, PVD yöntemi ile 550 C°de TiN kaplanmış ve 3,5-4 µm kaplama kalınlığına sahip yüksek hız çeliği ve sinterlenmiş çelik kesme kalıbı ile 0,5 mm kalınlığında M530-50A silisli sac malzemeleri kullanılmıştır. Çalışmada, 500.000 kesme sonucunda, kaplanmamış yüksek hız çeliği ile kesilen silisli saclarda oluşan ortalama çapak miktarının diğerk kesme kalıbı malzemeleri ile yapılan örneklere göre daha fazla olduğu belirtilmiştir.

Kaplama açısından değerlendirme yapıldığında, TiN kaplı yüksek hız çeliği ile kesilen saclarda daha az ortalama çapak yüksekliğinin oluştuğu gözlenmiştir. Tungsten karbür kesici takımın minimum çapak yüksekliği ve maksimum aşınma direnci açısından daha iyi sonuçlar verdiği belirtilmiştir [43].

Clerc ve Muetze; stator çekirdeklerinin farklı imalat prosesleri ile üretilmesinin, bu çekirdeklerin manyetik özellikleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Çalışmada, M700-65A silisli sac malzeme ve mekanik kesme yöntemi kullanılarak, manyetik özellikler, sacların preslenmesi ve kaynaklı birleştirilmesi açısından değerlendirilmiştir. Çalışma sonucunda, kaynak prosesinin çekirdek kayıplarında artışa neden olduğunu ve elde edilen çalışma sonuçlarını da sonlu elemanlar yöntemi ile doğrulamışlardır [44].

Steentjes ve diğerleri; silisli saclar üzerinde yapılan imalat proseslerinin, mikroyapı ve manyetik özellikler üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Çalışmada, tavlama prosesinin ($900\text{ }^{\circ}\text{C}$ - 60 sn ve $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ - 60 sn) etkisini görmek için 2 mm kalınlığında ve %2,4 silisyum içeren sıcak şekillendirilmiş malzeme kullanmışlardır. 50 Hz frekans ve 1,5 T indükleme değerlerinde yapılan ölçümlerde, tavlama sıcaklığının artması ($1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ - 60 sn) ile demir kayıplarının azaldığını belirtmişlerdir. Mekanik kesme işlemi için, $120\times 120\times 0,3$ mm ölçülerinde M230-30A malzemeden bir adet, 30 adet $4\times 4\times 0,3$ mm ölçülerinde, yirmi adet $6\times 6\times 0,3$ mm ölçülerinde, onaltı adet $7,5\times 7,5\times 0,3$ mm ölçülerinde, sekiz adet $15\times 15\times 0,3$ mm ölçülerinde, dört adet $30\times 30\times 0,3$ mm ölçülerinde, iki adet $60\times 60\times 0,3$ mm ölçülerinde saclar hazırlanmıştır. Tek sac ölçüm yöntemi kullanılarak, farklı indükleme ve frekans değerlerinde demir kayıpları ile ilgili değerlendirmelerde bulunmuşlardır. Buna göre, şerit malzeme genişliğinin azalması ile demir kayıplarında artış olduğunu ve artan frekans değerleri ile de demir kayıplarının arttığını belirtmişlerdir [45].

Krings ve diğerleri; sabit mıknatıslı kanalsız senkron motor stator çekirdeğinin manyetik özellikleri üzerinde kaynak işleminin etkisini araştırmışlardır. Çalışmada, 0,2 mm kalınlığında silisli sac ile dış çapı 31 mm, iç çapı 23,2 mm ve stator paket yüksekliği 64,5 mm olarak kullanmışlardır. İki adet kaynaklı ve iki adet kaynaklı olmayan üzere toplam dört adet stator paketi oluşturmuşlardır. Çalışma sonucunda, manyetik alan direncine bağlı olarak manyetik alan geçirgenliği ve manyetik akı yoğunluğunun kaynaklı stator çekirdeklerinde daha fazla oluştuğu, 1 T indükleme değerinde, frekans hızına bağlı olarak kaynaklı stator

çekirdeklerinde, demir kayıplarının kaynaksız stator çekirdeklerine göre daha fazla olduğunu belirtmişlerdir [46].

Harstick ve diğerleri; yönsüz silisli sacların manyetik özellikleri üzerinde kesme kalıbının aşınması ve mekanik kesme yönteminin etkisi üzerine araştırma yapmışlardır. Çalışmada, 0,3 mm kalınlığında yönsüz silisli sac kullanarak, 40 mm dış ve 30 mm iç çapa sahip stator paketi oluşturmuşlardır. Ayrıca, keskin, orta derecede körlenmiş, tamamen körlenmiş ve yeniden bilenmiş olmak üzere dört farklı kesici formu ile kesme işlemi yapılarak, bu kesici takım formlarının silisli sacların manyetik özellikleri üzerindeki etkisi ile ilgili değerlendirmelerde bulunulmuştur. Çalışma sonucunda, kesici takımın aşınması sonucunda silisli saclarda oluşan demir kayıplarının arttığını belirtmişlerdir [47].

Takezawa ve diğerleri; 12 kutuplu küçük fırçasız DC motorda kullanılan ve 9 adet kanala sahip stator çekirdeği için kullanılan yönlendirilmemiş silisli sac üzerinde, mekanik kesme yüklerinin, manyetik özellikler üzerindeki etkisini araştırmışlardır. 0,35 mm kalınlığında silisli sac kullanılarak, 20,2 mm dış ve 8,2 mm iç çapa sahip stator paketi oluşturmuşlardır. Çalışma sonucunda, kesme kenarına yakın bölgede manyetik geçirgenliklerde azalma olduğu ve saclara 700 C° de 2 saat uygulanan tavlama işleminin mekanik kesme gerilmelerini azaltıcı etkiye neden olduğunu belirtmişlerdir [48].

Hamzehbahmani ve diğerleri; silisli sacların kesilmesinden kaynaklanan çapağın girdap veya fuko akım kayıpları üzerindeki etkisini sonlu elemanlar metodu kullanarak araştırmışlardır. Çalışmada, %3 silisyum içeren 0,3 mm kalınlığında silisli sac kullanmışlardır. Çalışma sonucunda, akı yoğunluğu ve manyetikleşme frekansına bağlı olarak çekirdekteki girdap akım kayıplarının, çekirdekteki tabaka içi çapak hatalarından kaynaklandığını belirtmişlerdir. Bu durumu etkileyen en önemli faktörlerin, çekirdek yüzey etkisi, uniform olmayan akı yoğunluğundaki dağılım ve manyetik geçirgenliklerdeki düzensizliklerin olduğunu ifade etmişlerdir [49].

Maurel ve diğerleri; silisli sacların mekanik kesme yöntemi ile kesilmesinin manyetik özellikler üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Çalışmada, 0,5 mm kalınlığında %3 silisyum içeren yönsüz silisli sac kullanarak, kesme kenarında oluşan artık gerilmeler ile kesme kenarından uzaklık kriteri baz alınarak değerlendirmelerde bulunmuşlardır. Buna göre,

kesme bölgesinde plastik deformasyondan kaynaklanan artık gerilmelerin, manyetik geçirgenlikler üzerinde olumsuz etkilere neden olduğunu belirtmişlerdir [50].

Vandenbossche ve diğerleri; yüksek verime sahip indüksiyon makinalarındaki stator ve rotor çekirdeklerinin mekanik kesme yöntemi ile üretilmesi esnasında oluşan demir kayıplarının modellenmesi ile ilgili araştırma yapmışlardır. Çalışmada, 0,5 mm kalınlığında yüksek verimliliğe sahip silisli saclar kullanmışlardır. Çalışma sonucunda, kesme kenarında plastik deformasyondan kaynaklanan bozulmalar, toplam demir kayıplarının %33'ünü oluşturduğu, kayıpların azaltılması için stator ve rotor sac paketlerinin montajının ve kaynak proseslerinin daha hassas yapılması gerektiğini belirtmişlerdir. Ayrıca, kesme bölgesini farklı bölgelere ayırarak sonlu elemanlar metodu ile çalışma sonuçlarını test etmişlerdir [51].

Senda ve diğerleri; yönsüz silisli sacların mekanik kesme yöntemi ile kesilmesi sonucunda, manyetik özellikler üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Çalışmada, JIS50A400 tane yapısına sahip 0,5 mm kalınlığında ve 750 C° de tavllanmış silisli sac kullanmışlardır. Çalışma sonucunda, kesme bölgesindeki plastik deformasyondan kaynaklanan hasar arttıkça, akı yoğunluğunda azalmanın olduğu ve bunun sonucunda da demir kayıplarında artışa neden olduğunu belirtmişlerdir [52].

Wilczynski; silisli saclar üzerinde uygulanan imalat proseslerinin, rotor ve stator sac paketlerinin manyetik özellikler üzerindeki etkileri üzerine araştırma yapmışlardır. Çalışmada, %2 silisyum içeren 0,5 mm kalınlığında EP530-50A silisli sac kullanılarak, 120 mm dış, 80 mm iç çap ve 12 mm paket yüksekliğine sahip stator sac paketi oluşturmuşlardır. Ayrıca, EP650-50 silisli sac malzeme ile 106 mm dış, 58 mm iç çap ve 11 mm paket yüksekliğine sahip ikinci bir stator sac paketi oluşturmuşlardır. Oluşturulan bu stator sac paketleri, imalat prosesleri açısından dört aşamada değerlendirilmiştir. Birinci aşamada, saclar lamine halde kesildikten sonra tavlama işlemine tabi tutulmuş, ikinci aşamada, stator sacları kendi içerisinde sabitlenerek paket oluşturulmuştur. Oluşturulan bu paket üçüncü aşamada, alüminyum içerisine preslenmiş ve son aşamada ise bu paket alüminyum ile kaplanmıştır. Çalışma sonucunda, EP530-50A silisli sac malzeme ile üretilen paketlerde, aynı indükleme değerlerinde oluşan demir kayıplarının daha fazla olduğu ve alüminyum içerisine preslenmiş stator paketinde, diğer proseslere göre en fazla demir kayıplarının olduğu belirtilmiştir [53].

Kut ve diğerleri; silisli sacların mekanik kesme yöntemi ile kesilmesinde, kesme zımbası üzerine uygulanan farklı yüzey işlemlerinin çapak üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Çalışmada, 0,5 mm kalınlığında EP470-50A silisli sac ve 63 HRc sertliğe ve yüksek aşınma direncine sahip SW7M kesici takım zımbası, 66 HRc sertliğe sahip sinterlenmiş ASP23 kesici takım zımbası ve bu kesici takımlara TiN kaplama yapılmak suretiyle toplam dört farklı kesici takım özelliği kullanılmıştır. Çalışma sonucunda, kesici takımların TiN ile kaplanması ile silisli sacda oluşan çapak yüksekliğinin azaldığı ve en az çapak yüksekliğinin ASP+TiN kesici takım ile yapılan kesme işlemi sonucunda olduğu gözlenmiştir [54].

Hug ve diğerleri; ferromanyetik silisli sacların mekanik kesme yönteminde oluşan deformasyon üzerinde kesme hızı, kesme boşluğu ve kesme kuvvetlerinin etkisini araştırmışlardır. Çalışmada, %3 Si-Fe içeren 0,65 mm kalınlığında yönsüz silisli sac kullanılmıştır. Çalışma sonucunda, kesme boşluğunun artması ile mekanik kesme kuvvetinde azalma olduğu, kesme hızının artması ile dislokasyonlara bağlı olarak çatlak başlangıcının gerçekleştiği gözlenmiştir. Ayrıca, kesme kenarında çatlak başlangıcının, silisli sacların manyetik özellikleri üzerinde olumsuz etkilere neden olduğunu belirtmişlerdir [55].

Landgraf ve Emura; mekanik kesme ve gerilim giderme tavlama proseslerinin silisli sacların manyetik özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Çalışmada, % 2,2 silisyum içeren ve 60 µm tane boyutuna sahip 400x2000x0,485 mm ölçülerinde soğuk şekillendirilmiş silisli sac kullanmışlardır. Silisli sac kesme kenarında, plastik deformasyonun oluşmasında dolayı, 1,5 T indükleme değerinde toplam demir kayıplarında artış olduğunu gözlemişlerdir. Ayrıca, 700 C° de yapılan tavlama işlemi sonucunda, tane yapısında kayda değer bir değişiklik olmadığı, ancak manyetik geçirgenlikler üzerinde olumlu etkiye sahip olduğunu belirtmişlerdir [56].

Scutaru ve diğerleri; mekanik kesme yönteminin silisli sacların manyetik özellikleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Çalışma, 30x300 mm ölçülerinde M400-65 silisli sac referans alınarak 30x300 mm ölçülerinde bir adet, 15x300 mm ölçülerinde iki adet, 10x300 mm ölçülerinde üç adet, 7,5x300 mm ölçülerinde dört adet ve 5x300 mm ölçülerinde altı adet olmak üzere malzemeler, beş farklı grupta mekanik kesme yöntemi ile kesilerek bu malzemelerde oluşan demir kayıpları üzerinde değerlendirmelerde bulunmuşlardır. Çalışma sonucunda, manyetik indükleme değerinin artmasına bağlı olarak malzemelerin tümünde

demir kayıplarının arttığı ve en fazla demir kaybının 5x300 mm ölçülere sahip malzemelerde oluştuğunu belirtmişlerdir [57].

Krings ve diğerleri; Si-Fe ve Ni-Fe stator laminasyon sacları kullanarak kanalsız sabit mıknatıslı motorların performansı üzerinde stator saclarının kaynak işlemi ile paketlenmesinin etkisini araştırmışlardır. Çalışmada, 0,2 mm kalınlığında Si-Fe ve 0,1 ve 0,2 mm kalınlığında Ni-Fe sac kullanmışlardır. Çalışma sonucunda, Ni-Fe sacların kaynak işlemi sonrasında stator paketi haline getirilmesi ile Si-Fe saclara göre manyetik özellikler açısından daha fazla olumsuz etkilendiğini belirtmişlerdir. Ayrıca, stator paketlerinin kaynak prosesi ile paketlenmesinde, sac kalınlığının artması ile manyetik özelliklerde azalma meydana geldiğini ve çalışma sonuçlarını sonlu elemanlar metodu ile test etmişlerdir [58].

Jeong ve diğerleri; indüksiyon motorunun stator yapılarının oluşturulmasında kullanılan imalat proseslerinin, manyetik özellikler üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Çalışmada, 0,5 mm kalınlığında silisli sac ile 260 mm dış, 163 mm iç çap ve 105 mm paket yüksekliğine sahip stator oluşturulmuştur. Proses olarak, mekanik kesme ile üretilmiş laminasyon sacı, laminasyon saclarından oluşan stator paketleme işlemi, vernikleme ve montaj yapılmış stator ve motor gövdesine montajlanmış stator olmak üzere dört proses kullanılmıştır. Çalışma sonucunda, laminasyon saclar ile oluşturulan stator paketlerindeki demir kayıplarının sabit manyetik akı yoğunluğu değerlerinde, diğer proseslere göre daha fazla olduğunu belirtmişlerdir [59].

Marouani ve diğerleri; silisli sacların mekanik kesme yöntemi ile kesilmesi esnasında oluşan gerilmeler ve kesme kuvvetleri ile ilgili değerlendirmelerde bulunmuşlardır. Çalışmada, %3 Fe-Si oranına sahip 0,65 mm kalınlığında yönlendirilmemiş silisli sac kullanmışlardır. Çalışma sonucunda, kesme hızının artması ile kesme kuvvetlerinde artış olduğu ve kesmeye başlama noktasında kuvvetlerin maksimum değerlere ulaştığı gözlenirken, kesme boşluğunun artması ile kesme kuvvetlerinde azalma olduğunu belirtmişlerdir. Çalışma sonuçları ile ilgili sayısal modelleme yapılarak çalışma sonuçlarının doğruluğunu test etmişlerdir. Ayrıca, kesme kenarında plastik deformasyondan kaynaklanabilecek hasarların, dönel elektrik motorların stator çekirdekleri üzerinde manyetik kayıplara ve manyetik geçirgenliklerde azalmalara neden olabileceğini belirtmişlerdir [60].

Oka ve diğerleri; indüksiyon motorunun stator çekirdeği üzerinde uygulanan gerilim giderme tavlama sürecinin, demir kayıpları üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Çalışmada, 1,5 kW gücünde (200 V, 50 Hz) ve 157 mm dış, 95 mm iç çapa ve 65 mm paket kalınlığına sahip indüksiyon motor stator çekirdeği kullanılmıştır. Stator çekirdeği 8 dakika süreyle 800 °C'de tavlama işlemi yapıldıktan sonra oda sıcaklığına ulaşınca kadar soğumaya bırakılmıştır. Bu tavlama işlemi sonucunda yapılan ölçümlerde, sabit 1,5 T indükleme değerinde demir kayıplarında % 4,9 azalma olduğunu belirtmişlerdir [61].

Yapılan literatür araştırması sonucunda, silisli sacların yüksek manyetik geçirgenliğe sahip olmaları sebebi ile elektrik makinalarının imalatında sıklıkla kullanıldığı ve silisli sac olarak genellikle M330-50A, 35A250, M400-50A, M330-65A, 400-50AP, M250-50A, M800-50A, M940-50A, 50A470JIS, M680-50A, M350-50A, M330-35A, M700-65A, JIS50A400, EP530-50A, EP650-50 ve kalınlık olarak 0,2-0,3-0,35-0,48-0,5-0,65 mm kalınlığında saclar kullanıldığı gözlenmiştir. Dönel elektrik makinelerinin en önemli bileşenlerinden olan stator ve rotor yapılarının oluşturulmasında kullanılan silisli sacların ağırlıklı olarak, kesme kalıbı, giyotin ve lazer kesim yöntemi ile kesildiği tespit edilmiştir. Ancak, üretim maliyetleri açısından değerlendirme yapıldığında, stator ve rotor yapılarının kesme kalıbı ile üretildiği gözlenirken, prototip ve özel amaçlı üretim için lazer ve tel erezyon kesim yöntemlerinin sıklıkla kullanıldığı tespit edilmiştir.

Mekanik kesme yöntemi ile ilgili yapılan çalışmalarda çoğunlukla, kesme kenarında oluşan plastik deformasyona bağlı kesme gerilmelerin oluştuğu ve bu kesme gerilmelerinin ise silisli sacların manyetik özelliklerinin bozulmasına neden olduğu gözlenmiştir. Lazer ve tel erezyon kesim yönteminde ise, kesme kenarında ısıdan kaynaklı termal gerilmelerin oluştuğu ve bu gerilmelerin de manyetik özellikler üzerinde yine olumsuz etkilere neden olduğu gözlenmiştir. Silisli sacların, su jeti kesim yöntemi kullanılarak kesilmesi ile ilgili literatürde fazla çalışmanın olmadığı, ancak yapılan birkaç çalışmada ise soğutucu akışkan kullanılarak kesme yapıldığından, diğer kesim yöntemlerine göre silisli sacların manyetik özellikleri üzerinde daha az olumsuz etkilere neden olduğu fakat aşırı çapak oluşması sonucu paketlenmeyi olumsuz etkilediği için kayıp artışına sebep olduğu tespit edilmiştir.

Stator ve rotor yapılarının paket haline getirilmesi için silisli saclar, farklı kesme yöntemleri ile kesildikten sonra preslenerek, kaynaklı birleştirme yöntemiyle paket haline getirildiği

gözlenirken, kaynak işleminin silisli sacların mikroyapısında bozulmalara neden olduğu ve manyetik özelliklerde kayıpların olduğu belirtilmiştir.

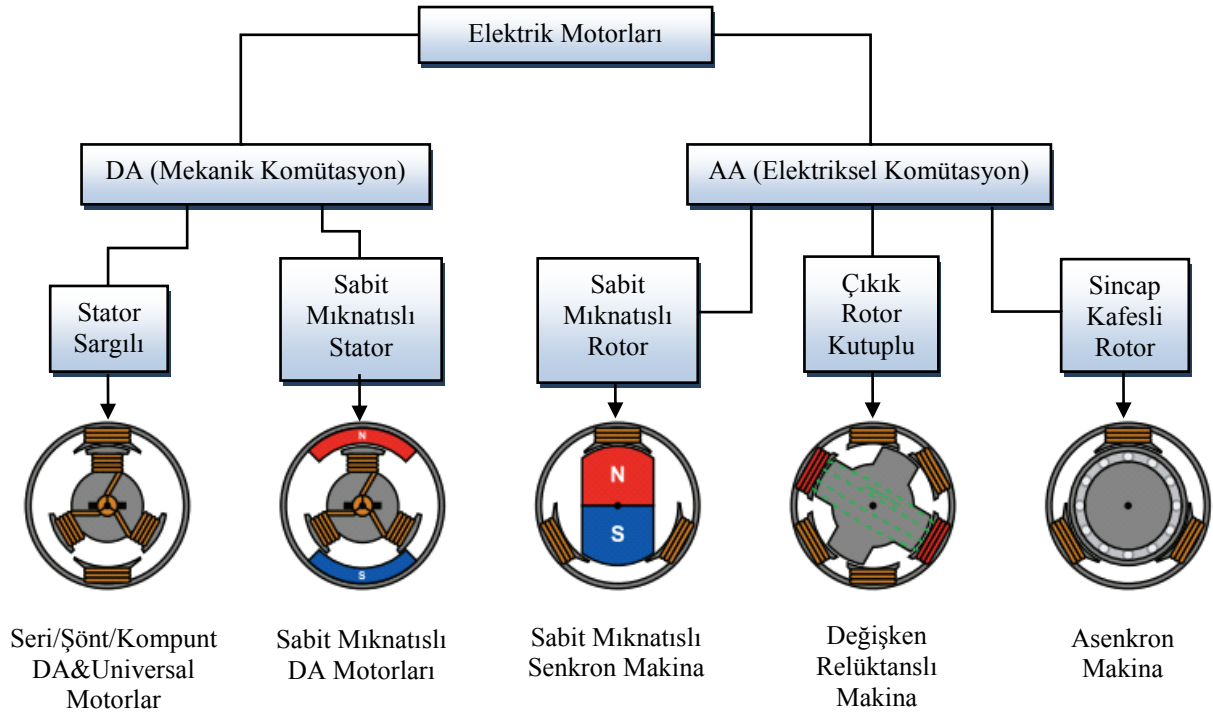
Manyetik özellikler genellikle, manyetik alan gerilimi, manyetik indüklemeye, manyetik akı yoğunluğu, spesifik çekirdek kayıpları, demir kayıpları ve frekans gibi kriterler dikkate alınarak değerlendirildiği tespit edilmiştir. Ayrıca, sayısal analiz ve sonlu elemanlar metodu gibi yöntemler kullanılarak çalışma sonuçlarının etkinliğinin test edildiği gözlenmiştir.

Yapılan bu çalışmada, silisli sac paketlerinin farklı kesme yöntemleri ile üretilerek, bu kesim yöntemlerinin, 5,5 kW gücündeki asenkron elektrik motorunun performansı üzerindeki etkileri deneysel olarak araştırılmıştır. Deneylerde giriş parametreleri olarak, frekans ve yükleme oranı, çıkış parametreleri ise toplam kayıplar ve motor verimliliği olarak seçilmiştir. Ayrıca, deneyler sonucunda, toplam kayıplar ve motor verimliliği üzerindeki en etkili parametreler, ANOVA ile belirlenmiştir. YSA ile toplam kayıplar ve motor verimliliği için tahmini matematiksel modeller geliştirilmiştir. Ansys Maxwell RMXprt yazılımı ile çıkış gücü ve motor hızına bağlı olarak motor verimliliğindeki değişim analiz edilerek çalışma sonuçlarının doğruluğu test edilmiştir. Ayrıca, herbir kesme yöntemi için motorların üretim maliyetleri de detaylı bir şekilde yapılmıştır.

3. ELEKTRİK MOTORLARI

3.1. Elektrik Motorlarının Sınıflandırılması

Elektrik motorları, endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Elektrik enerjisinin dönüşümünde anahtar role sahip olmaları açısından farklı hareket sistemlerinin ana parçasını oluşturmaktadır. Özel uygulamalar için elektrik motorunun doğru seçilmesi enerji verimliliği açısından zorunlu hale gelmiştir. Farklı kullanım alanlarına göre elektrik motorları farklı gruplara ayrılmaktadır. Şekil 3.1’de komütasyon tiplerine veya manyetik alanın oluşumuna göre elektrik motorlarının sınıflandırılması gösterilmiştir [62].

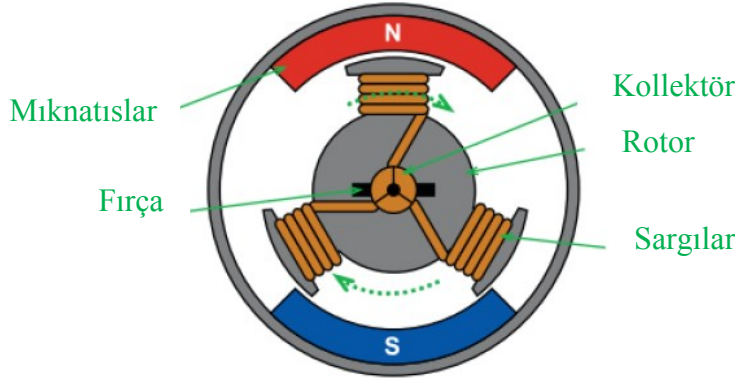


Şekil 3.1. Elektrik motorlarının sınıflandırılması [62].

3.1.1. Sabit mıknatıslı doğru akım (DA) motorları

Sabit mıknatıslı doğru akım motorları bilinen en eski motorlardan biridir. Sabit manyetik alanın oluşturulması ve rotor üzerinde tork ve dönmenin gerçekleşmesi için stator üzerine sabit mıknatıslar kullanılmaktadır. Kollektör yardımı ile sürekli dönme işlemi gerçekleştirilir. Kollektör, her bir sargı yardımıyla elektriksel bağlantıların yapılması ve döner halkalı silindirik iletken ile temas halindeki sabit mıknatıslardan oluşmaktadır.

Böylelikle, komütator her bir rotor sargısıyla iletkenliği sağladığı için rotor dönmeye başlar [62].

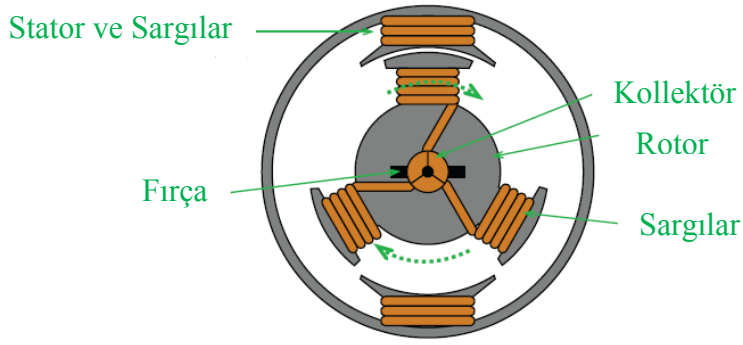


Şekil 3.2. Sabit mıknatıslı doğru akım motorları [62].

Bu motorlarda, alan sargıları olmadığı için serbest uyarımlı diğer elektrik motorlarına göre daha yüksek verime sahiptirler. Ayrıca, bu motorların oluşturulmasında gerekli malzemenin az olması daha düşük maliyette imal edilebilmelerine olanak sağlamaktadır. Küçük boyutlardaki sabit mıknatıslı DA motorları otomobillerde yaygın olarak kullanılır. Ayrıca, yol verme motorları, cam sileceği motorları, pencere motorları, havalı direksiyon motorları ve pervane motorları olarak ta kullanılmaktadır.

3.1.2. Alan sargılı DA motorları

Çift sargılı motor olarak bilinen ve stator-rotor alanlarının oluşturulması için bu motorlarda, elektromıknatıslar kullanılmaktadır. Seri, şönt ve kompunt makine olarak üç gruba ayrılmaktadır. Ayrıca universal motorlar olarak hem DA hem de AA'da kullanılma özelliklerine sahiptirler. Sargılarda oluşan kayıpların fazla olmasından dolayı sabit mıknatıslı DA motorlara göre verimleri daha düşüktür. Elektrikli araçlar ve ev aletleri gibi birçok alanda kullanılmaktadır [63].

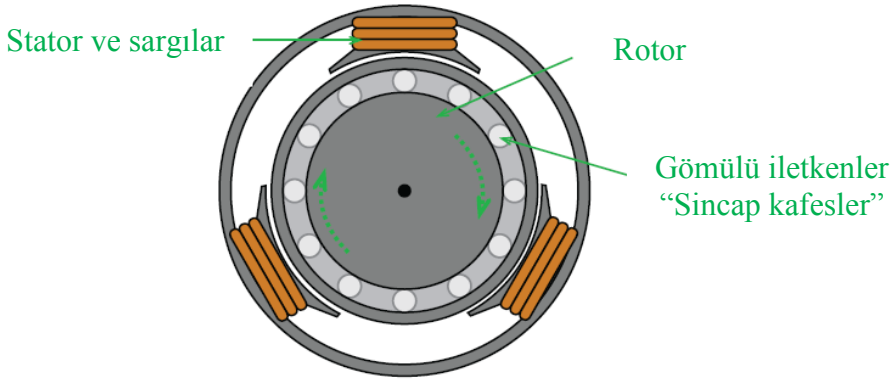


Şekil 3.3. Sargılı tip DA motorları [62].

DA motorları, uyarım şekillerine göre seri, şönt ve kompunt olmak üzere üçe ayrılır. Şönt motorlarda, uyarım sargısı endüviye paralel şekilde bağlanmıştır. Motorun kutup sargıları, ince kesite sahip olduğundan dolayı, uyarım sargısında kullanılacak gerilim değerinin düşük olması yeterlidir. İlk kalkış anındaki moment değerleri düşük olduğu için aşırı yüklerde verimli değildir. Devir sayılarında yüke bağlı olarak fazla değişiklik olmadığından devir sayıları sabit olarak kabul edilirler. Seri motorlarda, uyarım sargısı endüviye seri olarak bağlanmıştır. Akımının tamamı uyarım sargısından geçtiğinden endüvi akımı yükselmesine bağlı olarak uyarı akımında artış olur. Seri motorlar, yol alma anında moment değerleri çok yüksek olduğundan momentin yüksek olması istenen alanlarda kullanılırlar. Kompunt motorlar, ana kutuplar üzerine bir seri sargı ve bir şönt sargı yapılması ile oluşmaktadır. Motor içerisindeki yol verici ve alan ayarlayıcı dirençler ile istenilen devir sayısı ayarlanabilir. Bileşkelendirilmiş bir motorda, seri ve şönt sargının manyetik alanı aynı yönde olacak şekilde seri sargılar düzenlenmektedir.

3.1.3. Asenkron motorlar

AC indüksiyon motorları, statora sağlanan AC akımı ile çalışır. Ayrıca rotor akımı ise indüksiyon yoluyla oluşturulmaktadır. Bu motorlar, çalışma yöntemi açısından transformatörlere benzemektedir. Bu sebeple, asenkron motorlar transformatörlerle sıklıkla kıyaslanmaktadır. Asenkron motorlar, endüstriyel uygulamalarda genellikle üç faz olarak kullanılmaktadır [64].

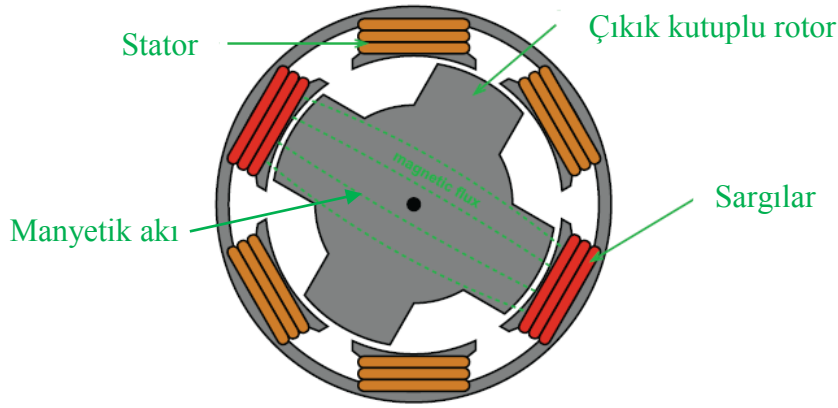


Şekil 3.4. Sincap kafesli asenkron motor [62].

Komutatorsuz olarak kolaylıkla üretilibilmelerinin yanı sıra, DA ve universal motorlara göre daha güvenli ve daha verimlidirler [62]. Yapısal olarak, stator ve rotor olmak üzere iki bölümden oluşmaktadırlar. Stator, asenkron motor içerisindeki sabit kısmı oluştururken, rotor ise sabit stator içerisindeki dönen kısmı oluşturmaktadır. Rotor bölümü, kısa devreli rotor (sincap kafesli rotor) ve sargılı rotor (bilezikli rotor) olmak üzere iki çeşittir. Kafesli tip rotorlar, üretimi kolay, dayanıklı, işletme güvenliği yüksek ve bakım ihtiyacının az olmasından dolayı sanayide ve birçok alanda sıklıkla kullanılmaktadır. Ancak, sincap kafesli asenkron motorlarda, kalkış momentinin kısmen küçük, gerekli kalkış akımının büyük olması dezavantajdır [63].

3.1.4. Anahtarlamalı relüktans motorlar

Anahtarlamalı relüktans motorlar (ARM), stator ve rotorun her ikisi de çıkık kutuplu olmasından dolayı çift çıkıklı relüktans motorları olarak bilinmektedir. Sadece statorunda sargı bulunduran ARM'lerin rotorlarında herhangi bir sargı ya da sürekli mıknatıs yoktur. Rotor ve statordaki kutup sayıları çift sayıda olması kaydıyla sayıca birbirinden az, fazla ya da birbirine eşit olabilir. Genellikle, statordaki kutup sayısı rotor kutup sayısına göre daha fazladır. Yüksek hız gerektiren uygulamalarda genelde rotor kutup sayısı, stator kutup sayısına göre küçük seçilirken, yüksek moment gerektiren uygulamalarda ise rotor kutup sayısı, stator kutup sayısına oldukça yakın seçilmektedir.



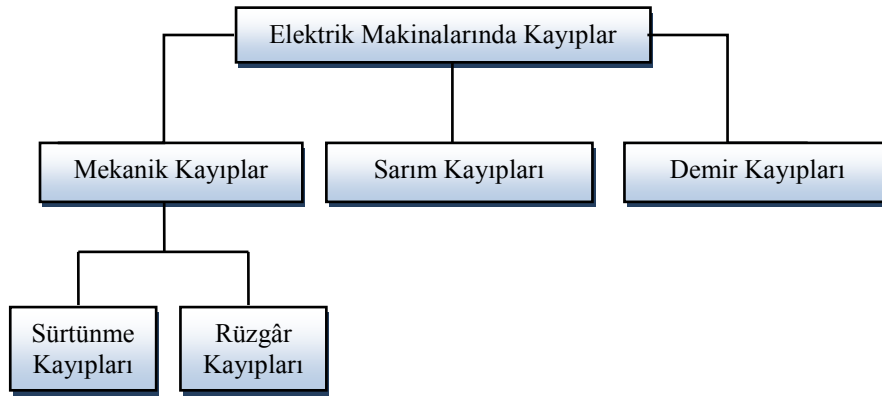
Şekil 3.5. Anahtarlamaalı relüktans motor [62].

Anahtarlamaalı relüktans motorlarının çalışma prensibi, stator ile rotor arasındaki hava aralığında meydana gelen relüktans değişimine bağlıdır. ARM’de stator ile rotor arasındaki hava aralığının relüktans değeri kutupların çıkıntılı olmasından dolayı sabit değildir, değişkendir [65].

Basit yapıya sahip olmalarının yanı sıra maliyetlerinin düşük olması ve denetimlerinin kolay olması gibi nedenlerden dolayı endüstriyel alanlarda yaygın kullanım alanına sahiptirler. Stator kutupları sırasıyla uyarılır ve her seferinde başka kutuplar çekilerek dönme devam eder. Bu motorlar, ilk kalkma anında fazla akım çekmeden yüksek moment üretebilmesi ve çok yüksek hızlarda çalışabilmesi açısından diğer elektrik motorlarına göre üstünlüklere sahiptirler. Düşük verimliliğe sahip olması (genellikle $< 90\%$), yüksek tork değerlerinde oluşan dalgalanmalar, akustik gürültü ve karmaşık kontrol algoritmalarından dolayı dezavantajları vardır [66].

4. ELEKTRİK MAKİNALARINDA KAYIPLAR

Elektrik makinalarında verimliliğin artırılması ve kayıpların azaltılması için farklı metotlar bulunmaktadır. Genel olarak, elektrik makinalarında oluşan kayıplar; mekanik, sarım ve demir kayıpları şeklinde belirtilmektedir. Şekil 4.1’de elektrik makinalarında oluşan kayıpların sınıflandırılması gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Elektrik makinalarında oluşan kayıpların sınıflandırılması

4.1. Mekanik Kayıplar

Elektrik makinalarındaki mekanik kayıpların büyük bir bölümü, rulmanlarda oluşan sürtünme kayıpları ve yağlayıcı sıvılar içerisinde çalışan hareketli parçalarda oluşan rüzgar kayıplarıdır. Elektrik makinalarında en yaygın kullanılan rulmanlar bilyalı rulmanlardır. Ancak, silindirik rulmanlar da sıklıkla kullanılmaktadır. Normal çalışma koşullarında, SKF rulman üretici firması, bilyalı rulmanların sürtünme anındaki davranışı ile ilgili tahmini model geliştirmişlerdir [67].

$$M_{fr} = 0.5\mu_{fr}F_{bearing}D_{bearing} \quad (kW) \quad (4.1)$$

Eş. 4.1’de, $F_{bearing}$, eşdeğer dinamik yataklama yükünü (N), $D_{bearing}$, yataklama çapını (m) ve μ_{fr} ise sürtünme katsayısını ifade etmektedir. Rulmanlı yataklarda sürtünme kayıpları, $P_{bearing}$ ile gösterilmektedir. Sürtünme kayıpları, hızla doğru orantılı olarak değişmektedir.

$$P_{\text{bearing}} = \omega_m \cdot M_{\text{fr}} = \omega_m \cdot 0,5 \mu_{\text{fr}} \cdot F_{\text{bearing}} \cdot D_{\text{bearing}} \quad (\text{kW}) \quad (4.2)$$

Eş. 4.2’de, ω_m , devir sayısına (n) bağlı olarak açısal hızı belirtmektedir. Açısal hız ise Eş. 4.3’e göre hesaplanmaktadır [6].

$$\omega_m = \frac{2\pi n}{60} \quad (\text{rad/sn}) \quad (4.3)$$

Rüzgâr kayıpları, elektrik makinaları içerisindeki hareketli parçalar arasındaki hava boşlukları ile sürtünmeye bağlı olarak oluşmaktadır. Bu kayıplar, hava boşluğunun geometrisine ve yağlayıcı sıvı veya gazın özelliğine göre değişmektedir. Rüzgâr kayıpları üzerinde kapsamlı araştırma ilk olarak Vrancik tarafından 1968 yılında yapılmıştır [68]. Elektrik makinalarında kullanılan silindirik rotor için hava aralığında türbülans akışı dikkate alarak, rüzgar kayıplarını ifade eden model geliştirmişlerdir.

$$P_{\text{windage}} = \pi k_{\text{friction}} \gamma r_{\text{rotor}}^4 \omega_m^3 l_m \quad (\text{kW}) \quad (4.4)$$

Eş. 4.4’te, γ , akışkanın yoğunluğunu (kg/m^3), k_{friction} , hava boşluğundaki yüzey sürtünme katsayısını, r_{rotor} , rotor yarıçapını (m), l_m , manyetik akı yol uzunluğunu (m) göstermektedir. k_{friction} ise aşağıdaki Eş. 4.5’e göre hesaplanmaktadır. Re, Reynolds sayısını ifade etmektedir.

$$\frac{1}{k_{\text{friction}}} = 2,04 + 1,768 \cdot \ln(Re \sqrt{k_{\text{friction}}}) \quad (4.5)$$

Saari, yaptığı çalışmada, soğutucu akışkan kullanıldığında oluşan rüzgar kayıplarını, Eş. 4.6’daki eşitlikle hesaplamışlardır.

$$P_{\text{windage}} = k_{\text{velocity}} \cdot q_m (\omega_m \cdot r_{\text{rotor}})^2 \quad (\text{kW}) \quad (4.6)$$

Eş. 4.6’da, k_{velocity} akışkan hız faktörünü (m/s), q_m , hava boşluğundaki akış oranını (m^3/dak) ifade etmektedir [69].

4.2. Sarım Kayıpları

Elektrik makinalarında sarım kayıpları, makinanın sargılarında manyetik akı yoluyla ortaya çıkan kayıplardır. Genellikle, bakır ve direnç kayıpları şeklinde ortaya çıkmaktadır. Temel olarak, sarım kayıpları Eş. 4.7'ye göre hesaplanabilir.

$$P_{cu} = R_{phase} I^2 M_{\phi} \quad (kW) \quad (4.7)$$

Eş. 4.7'de, R_{phase} , tek faz sarım direncini, I , sargıdaki akım değerini ve M_{ϕ} ise makinanın faz sayısını göstermektedir. Her bir fazın direnci, sarım geometrisi ve sarım sayısı (N) ile Eş. 4.8'e göre belirlenmektedir.

$$R_{phase} = (l_{cond} N \rho) / A_{cond} \quad (\Omega m) \quad (4.8)$$

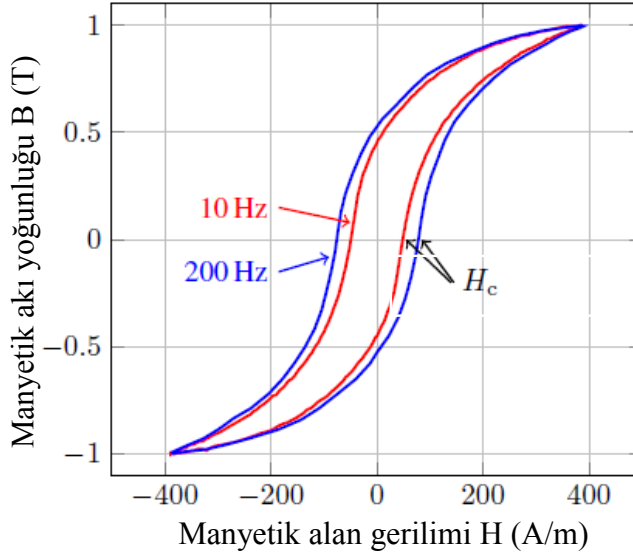
Eş. 4.8'de, l_{cond} , tek sarım için iletken uzunluğunu, A_{cond} ise iletken kesit alanını ifade etmektedir. Direnç, sıcaklıkla değişmektedir. Elektrik makinalarında ve ticari olarak kullanılan bakır sargıların 20 °C' deki direnci, $\rho_{cu20} = 1.75 \times 10^{-8} \Omega m$ ve sıcaklık katsayısı ise $\alpha_{cu} = 3.81 \times 10^{-3} 1/K$ [70]. Sıcaklığın ϑ (°C 'de) fonksiyonu olarak, bakırın direnci Eş. 4.9' a göre hesaplanmaktadır [6].

$$\rho_{cu}(\vartheta) = \rho_{cu20} [1 + \alpha_{cu} (\vartheta - 20 \text{ } ^\circ C)] \quad (\Omega m) \quad (4.9)$$

4.3. Demir Kayıpları

Makinaların manyetik parçalarında oluşan demir kayıpları, aynı zamanda çekirdek kayıpları veya manyetik kayıplar olarak adlandırılmaktadır. Bu kayıplar, stator ve rotor çekirdeklerinde manyetik alanın değişmesiyle ortaya çıkmaktadır. İletken ferromanyetik malzemeler için demir kayıpları genellikle hysteresis ve girdap akım kayıpları olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Manyetik alan geriliminin (H) artmasına bağlı olarak malzeme, yavaşça manyetize edilirse, karşı bir manyetik alan etkisiyle demanyetize olma eğilimine girer. Manyetikleşme eğrisi aynı yolu takip etmez. Şekil 4.2'de hysteresis eğrisinin oluşumu gösterilmiştir. Eğri arasında kalan alan her bir döngü için belli bir spesifik enerjiye (Ws/m^3) sahiptir. Bu durum dolayısı ile demir kayıpları ile orantı kurularak ilişkilendirilmektedir. Spesifik demir kayıpları Eş. 4.10'a göre hesaplanmaktadır.

$$P_{Fe} = f \oint H dB \quad (\text{kW}) \quad (4.10)$$



Şekil 4.2. Ferromanyetik malzeme için 10 ve 200 Hz’ de oluşan B-H Hysteresis eğrisi [6].

Eş. 4.10’da, f , manyetik alan (H) için frekans değerini belirtmektedir. Eddy akımları, dinamik demir kaybına neden olan ve manyetik akı $B(T)$ değişimine bağlı olarak iletken manyetik malzemelerde indüklenen voltajlardan kaynaklanmaktadır. Zaman ve yön gibi değişkenlerden etkilenmesinden dolayı, hysteresis eğrisine ait aralığın genişlemesine ve manyetik zorlanmada artışa neden olmaktadır (H_c) [6].

Demir kayıplarının hesaplanması için farklı yaklaşımlar bulunmaktadır. Steinmetz, kayıpları ayırma (hysteresis&eddy akım kayıpları) ve matematiksel hysteresis olmak üzere başlıca üç farklı hesaplama yöntemi kullanılmaktadır.

Kayıpları ayırma yöntemi, demir kayıplarının hesaplanmasında sıklıkla kullanılmaktadır. Bu yöntemde, hysteresis ve eddy akım kayıpları ayrı ayrı hesaplanarak toplam demir kayıpları belirlenmektedir. Jordan, frekans (f ve f^2) ve akı yoğunluğundaki genliğin (B^2) değişimine bağlı olarak statik hysteresis ve dinamik eddy akım kayıpları Eş. 4.11’e göre hesaplamıştır [71].

$$p_{Fe} = p_{hyst} + p_{ec} = C_{hyst} f B^2 + C_{ec} f^2 B^2 \quad (\text{kW}) \quad (4.11)$$

Eş. 4.11’de, C_{hyst} ve C_{ec} , sırasıyla hysteresis ve eddy akım kayıplarının katsayısını belirtmektedir. Hysteresis kayıpları, düşük frekanslarda malzemenin hysteresis döngü alanı ile orantılı olarak değişmektedir. Bu durumda eddy akım kayıpları Eş. 4.12’de verilen Maxwell eşitliğine göre yaklaşık olarak hesaplanabilir.

$$p_{ec} = \frac{d^2(dB(t)/dt)}{12\gamma\rho} \quad (\text{kW}) \quad (4.12)$$

Eş. 4.12’de $B(t)$, zamanın fonksiyonu olarak akı yoğunluğunu, d ise laminasyon sac kalınlığını, ρ ve γ sırasıyla, spesifik direnci ve kullanılan malzemenin yoğunluğunu belirtmektedir [72]. Eş. 4.11’de, NiFe alaşımlı sac malzemeler için doğruluğu kanıtlanmış, ancak SiFe alaşımlı sac malzemeler için doğruluğu tam olarak tespit edilememiştir [73]. Bu nedenle, Pry ve Bean, bilinmeyen kayıplar için amprik düzeltme faktörü η_{exc} , kullanarak Eş. 4.11’i geliştirerek Eş. 4.13’ teki gibi düzenlemişlerdir [74];

$$p_{Fe} = p_{hyst} + \eta_a p_{ec} = C_{hyst}fB^2 + \eta_{exc}C_{ec}f^2B^2 \quad (\text{kW}) \quad (4.13)$$

$$\eta_{exc} = \frac{p_{ec,measured}}{p_{ec,calculated}} > 1 \quad (4.14)$$

Eş. 4.14’te, büyük tanecik yapısına sahip malzemeler için $\eta_{exc} \cong 2$ ile 3 arasında değerler almaktadır [73].

Diğer bir yaklaşıma göre Eş. 4.11’in geliştirilmesi ile hysteresis, eddy akım kayıplarına ek olarak, bilinmeyen (p_{exc}) kayıplar da dâhil edilerek demir kayıpları hesaplanmıştır. Bilinmeyen kayıplar, manyetik alan, manyetik akı yoğunluğu, kullanılan silisli sacın mikroyapısı ve frekans gibi parametrelerin varlığı sonucu ortaya çıkan kayıplardır. Bu kayıplar, temel olarak Eş. 4.15’e göre hesaplanmaktadır.

$$p_{Fe} = p_{hyst} + p_{ec} + p_{exc} = C_{hyst}fB^2 + C_{ec}f^2B^2 + C_{exc}f^{1.5}B^{1.5} \quad (\text{kW}) \quad (4.15)$$

Eş. 4.15’e göre Bertotti, manyetik akı hareketlerine bağlı olarak bilinmeyen demir kayıp faktörünü (C_{exc}) Eş. 4.16’da belirtilen eşitliğe göre geliştirmiştir [75, 76, 77, 78]. Buna göre;

$$C_{exc} = \sqrt{S \cdot V_o \cdot \rho \cdot G} \quad (4.16)$$

Eş. 4.16'da, ρ , malzemenin elektriksel iletkenliğini (Ωm), $G = 0,1356$, boyutsuzluk katsayısını, S , numune kesit alanını (m^2), V_o , malzemenin mikroyapısı ile ilgili parametreyi (A/m), B , manyetik akı yoğunluğunu (T) ve f (Hz) ise frekans değerini göstermektedir (Eş.4.15) [77].

5. ELEKTRİK MAKİNALARINDA DEMİR KAYIPLARI

5.1. Demir Kayıplarının Belirlenmesi

Manyetik malzemelerde demir kayıplarının belirlenmesinin ve fiziksel olarak ölçülmesinin doğrudan bir yöntemi yoktur. Epstein çerçevesi (Epstein frame) [79, 80, 81] veya halka şeklinde örnekler [82] ile özel şekilli laminasyon saclarında demir kayıplarının belirlenmesi için uluslararası IEC ve ASTM ölçüm yöntemleri kullanılmaktadır. İncelenen malzemelerin içerisinde ve etrafında manyetik alanın oluşması için bobinaj (elektiriksel sargı) işlemi yapılmaktadır. Belirli bir gerilim değerinde, malzemelerde manyetik alanın değişmesiyle indüklenen manyetik akı yoğunluğu, sekonder sargı ile belirlenebilir. Daha sonra demir kayıpları, manyetik alan (H) ve malzeme içindeki manyetik akı yoğunluğuna göre hesaplanmaktadır. Elde edilen bu kayıplar, sonlu elemanlar metodu veya analitik eşitlikler yardımıyla elektrik makinalarındaki demir kayıplarının ölçülmesi için giriş parametreleri olarak kullanılmaktadır.

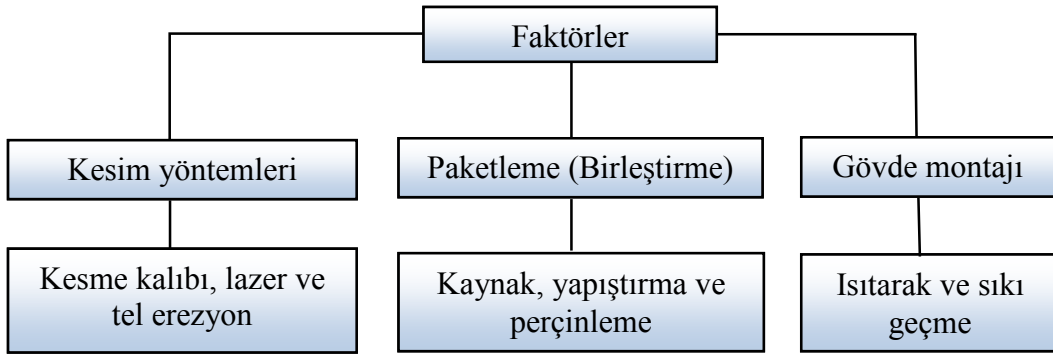
Üretilmiş olan elektrik makinalarında demir kayıplarının incelenmesi, uluslararası IEC ve IEEE standartlarına göre belirlenmektedir [83]. Genel kayıpların ölçülmesi için elektrik makinalarının farklı çalışma rejimlerinde, yüksüz, belirli oranlarda yüklenmiş halde ve kısa devre olarak testler yapılmaktadır. Demir kayıpları daha sonra “diğer kayıplar” olarak adlandırılmıştır. Toplam kayıplardan mekanik ve sarım kayıplarının çıkarılması ile belirlenmektedir. Bu nedenle, elektrik makinalarının giriş gücüne bağlı olarak çıkış gücünde azalma olmaktadır. Bu azalmalar, mekanik, sarım ve demir kayıplarının oluşmasından kaynaklanmaktadır. Bu kayıplar, makinanın çıkış gücüne eklendiğinde giriş gücü belirlenmektedir. Bu yöntem, kayıpların hızlı bir şekilde belirlenmesine yardımcı olmaktadır [6].

Demir kayıplarının deneysel tespiti yanı sıra demir kayıplarının modellenmesi, elektrik makinalarındaki demir kayıplarının daha doğru belirlenmesi için önemli bir faktördür. Charles Proteus Steinmetz manyetik malzemelerde demir kayıplarını belirlemek için 1884’ te ilk matematiksel bir yaklaşımı önermiştir [84]. Steinmetz eşitliği, elektrik makinalarında demir kayıplarının modellenmesi için günümüzde hala kullanılmaktadır. Ancak, literatürdeki en son çalışmalarda, Bertotti modelini kullanarak demir kayıplarını, hysteresis,

eddy (girdap) ve bilinmeyen kayıplar olarak ayırmışlardır. Malzemelerin fiziksel hysteresis özelliklerinin belirlenmesi için gelişmiş matematiksel modeller denenmektedir. Bununla birlikte, bu modeller daha çok girdi parametreleri ve uzun hesaplama süreleri gerektirmektedir. Bu durum, aynı zamanda sonuçların doğrulanmasını da gerektirmektedir.

5.2. Demir Kayıplarını Etkileyen Faktörler

Elektrik motorlarının stator çekirdeklerinin farklı üretim aşamaları, demir kayıplarını önemli şekilde etkilemektedir. İmalat işlemleri boyunca, manyetik özelliklerin bozulma derecesi, stator çekirdeklerinin işlenmesine ve kullanılan takımlara bağlıdır. Şekil 5.1’de, stator çekirdeklerinin imalat prosesleri esnasında, demir kayıplarını etkileyen faktörler gösterilmiştir [40].



Şekil 5.1. Demir kayıplarını etkileyen faktörler

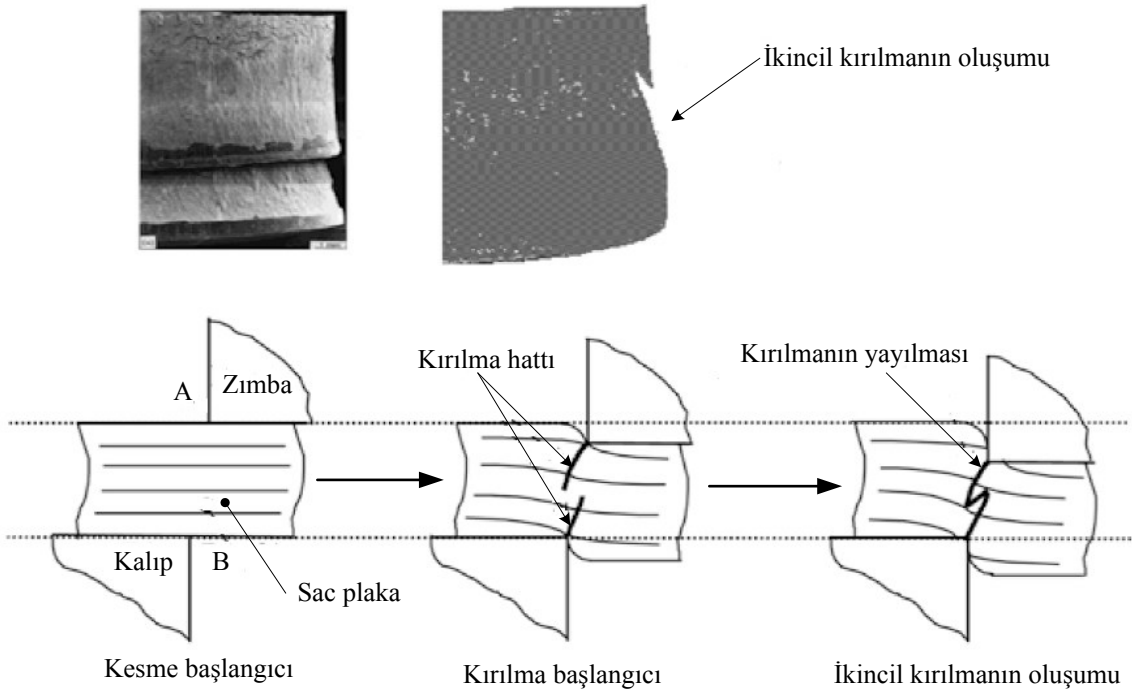
5.2.1. Mekanik kesme yöntemi

Günümüzde kullanılan birçok ürün sac malzemelerden üretilmektedir. Bu ürünlerin istenilen formlarda üretilebilmeleri için mekanik kesme yöntemi kullanılarak plakalar haline dönüştürülmektedir. Ulusal veya uluslararası pazar taleplerine göre mekanik kesme yöntemi ile üretilen parçalar için ölçüsel doğruluk, iyi yüzey kalitesi ve malzeme özelliklerinin korunması gibi hususların dikkate alınması gerekmektedir. İstenilen kesme hassasiyetinin elde edilmesi için uygun kesme kalıplarının tasarlanması maliyet açısından günümüzde önemli sorun teşkil etmektedir. Bu sorun malzeme, parça geometrisi ve kesme prosesi ile yakından ilgilidir. Bu karmaşık sorunun giderilmesi için tasarımcılar genellikle tecrübe ve sezgilere göre çalışmaktadır. Bunun yanı sıra farklı modelleme teknikleri kullanılarak bu

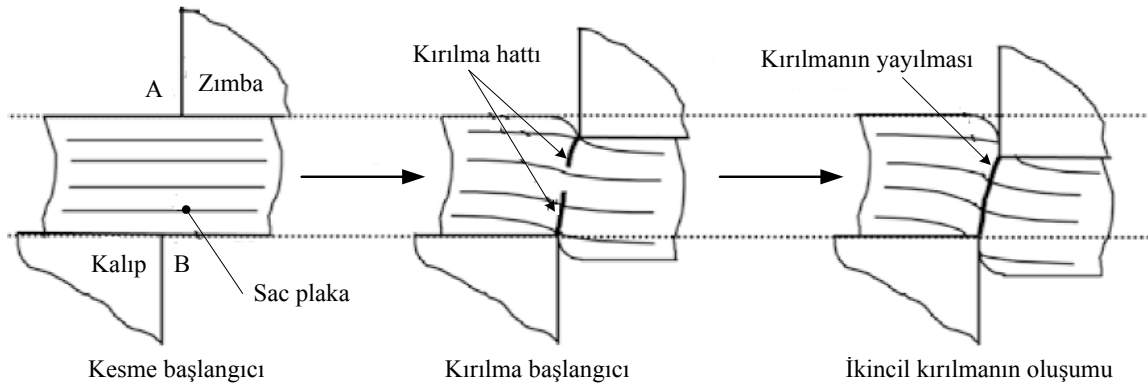
sorunun çözümünde ilerlemeler kaydedilmektedir [85]. Mekanik kesme yöntemi, silisli sacların kesme kenarında homojen olmayan mekanik gerilmelerin oluşmasına neden olurken, malzeme özelliklerini de olumsuz etkilemektedir. Yapılan birçok deneysel çalışmada, kesme kenarının mekanik ve geometrik durumunun kesme boşluğu, kesici zımbanın aşınması ve sac plakanın kalınlığına bağlı olarak değiştiği gözlenmektedir [86, 87]. Optimum kalıp kesme boşluğu, sac kalınlığının yüzdesi olarak Eş. 5.1'e göre hesaplanmaktadır.

$$c = 100 \frac{D_m - D_p}{2t} \quad (\%) \quad (5.1)$$

Eş. 5.1'de, D_m (mm), kalıp boşluk çapını, D_p (mm) zımba çapını, t sac kalınlığını (mm), c (mm) ise kesme boşluğunu ifade etmektedir. Kalıp kesme boşluğunun iyi seçilmesi ve seçilememesi durumunda, kesme aşamalarının gösterilişi Şekil 5.2 ve Şekil 5.3'te verilmiştir.

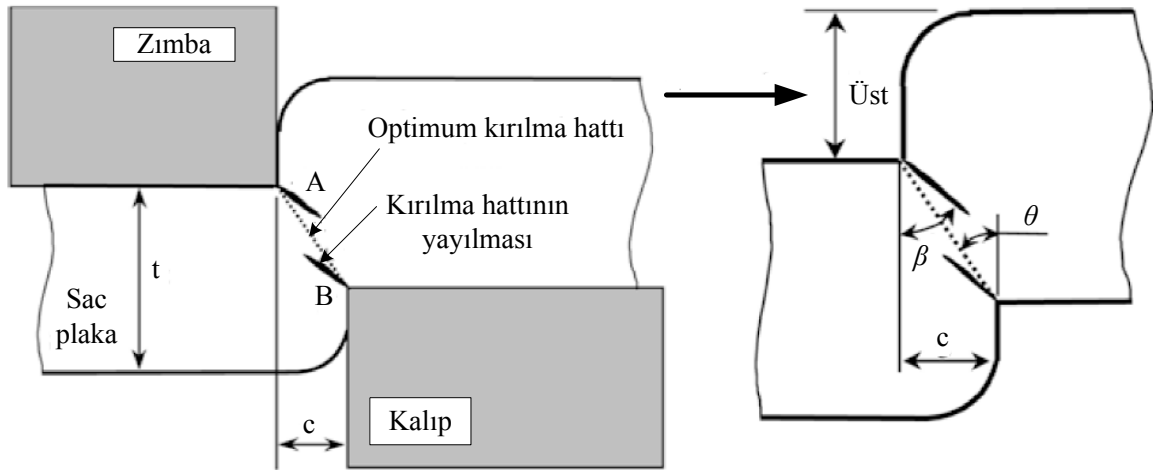


Şekil 5.2. Kalıp kesme boşluğunun iyi seçilmemesi durumunda, kesme aşamalarının gösterilişi [85].



Şekil 5.3. Kalıp kesme boşluğunun iyi seçilmesi durumunda, kesme aşamalarının gösterilişi [85].

Optimum kesme boşluğu, optimum kırılma açısına (β) ve kırılma, yayılma açısına (θ) göre belirlenebilmektedir (Şekil 5.4).

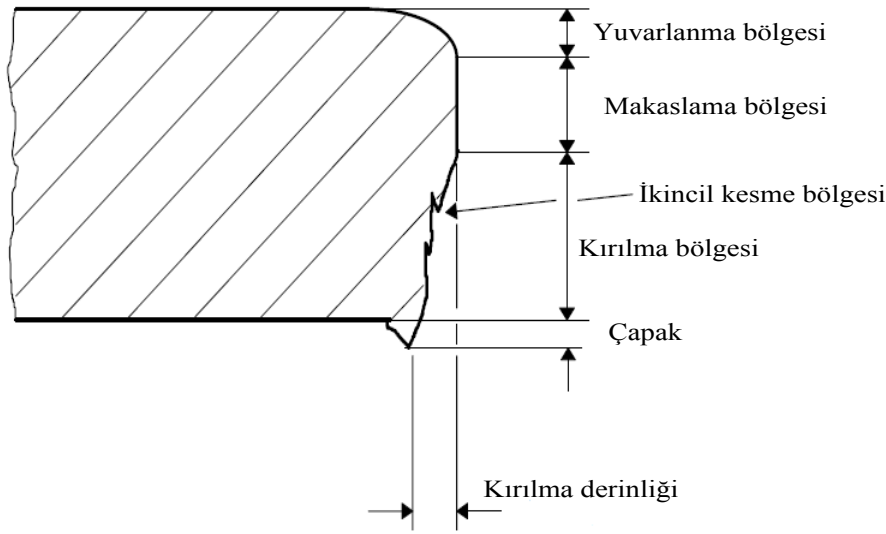


Şekil 5.4. Optimum kırılma açısı ve yayılma açısının gösterilişi [85].

Kesme esnasında, kesme boşluğu (c), sac kalınlığı (t) ve zımbanın sac malzemeyi kesmeye başladığı anda oluşan kırılma noktasının yüksekliğine (U_p) bağlı olarak θ açısının hesaplanması için Eş. 5.2 kullanılmaktadır [85]. Buna göre;

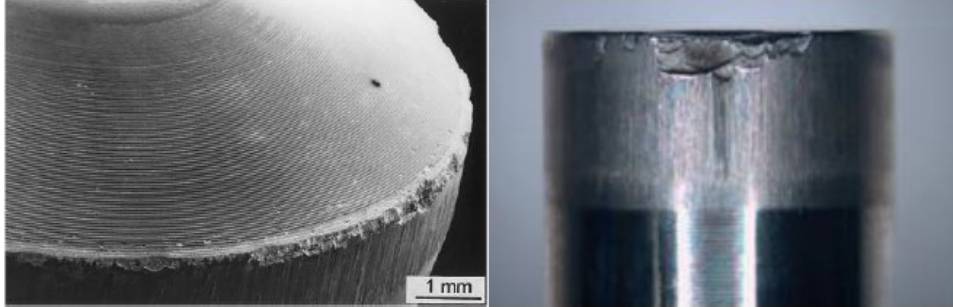
$$\theta = \text{Arc tan} \left(\frac{c}{t - U_p} \right) \quad (5.2)$$

Kesme kenarı, farklı bölgeler Şekil 5.5' te gösterildiği gibi kategorize edilmektedir [88].



Şekil 5.5. Mekanik kesme işlemi sonucunda oluşan bölgeler [89].

Zımbanın malzemeye girişi anında oluşan malzemedeki yuvarlanma bölgesi, malzemenin sünekliğine, zımbanın aşınmasına (Resim 5.1) ve kesme boşluğuna bağlı olarak değişmektedir.



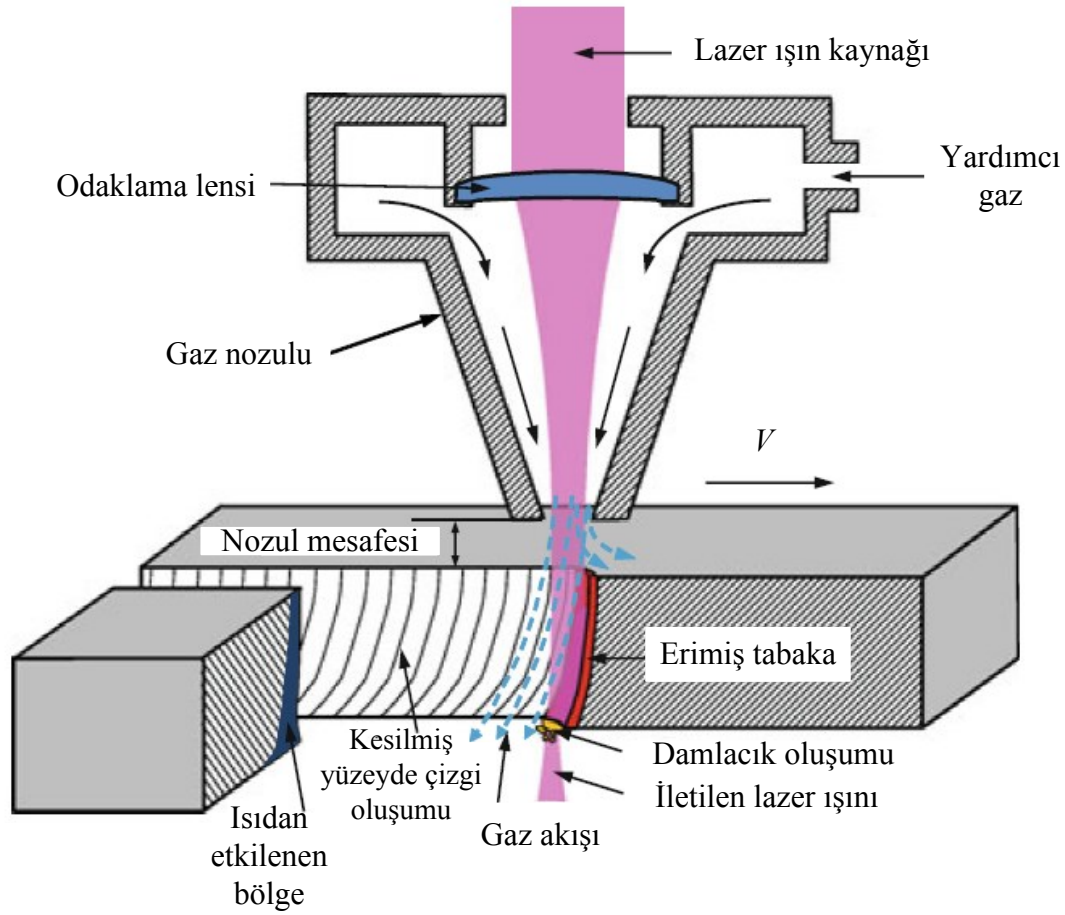
Resim 5.1. Kesme zımbası kenarında oluşan aşınmanın gösterimi [90].

Malzemenin kesilmesi sonucunda oluşan pürüzsüz ve temiz bölge, makaslama bölgesi olarak adlandırılmaktadır. Malzemede kesme işleminden dolayı oluşan, kırılma bölgesi meydana gelmektedir [91]. Kesme anında oluşan kırılmaların derinliği, zımba ile kalıp arasındaki boşluğa bağlıdır. Kırılmaların oluşmaması durumunda, ikincil kesme bölgesi oluşmaktadır [92]. Kesme zımbası ve iş parçası malzemesi arasındaki makaslama kuvvetinden dolayı oluşan mekanik gerilmeler ise, çapak oluşumuna neden olmaktadır [93]. Çapak yüksekliği ise kesme boşluğunun ve kesme hızının artması ile artmaktadır. Buna göre, çapak yüksekliğinin minimize edilmesi için bu hususların dikkate alınması gerekmektedir.

Silisli sacların mekanik kesme yöntemleri ile kesilmesi sonucunda, kesme bölgesinde plastik deformasyona bağlı olarak mekanik gerilmeler oluşmaktadır. Ayrıca, optimum kesme parametrelerinin iyi belirlenememesi durumunda kesme kenarında çapak oluşumu da gözlemlenmektedir. Çapak, elektrik motorlarının stator ve rotor sac paketlerinin oluşturulmasında en önemli etkenlerden birisidir. Çapak yüksekliğinin artması, sac paketini oluşturan silisli saclar arasında kısa devre oluşumuna sebep olmakla birlikte, eddy (girdap) akım kayıplarını meydana getirmektedir. Dolayısı ile stator ve rotor çekirdeklerinde oluşan bu kayıplar, manyetik özelliklerin azalmasından dolayı elektrik motorlarının verimliliğini önemli ölçüde olumsuz etkilemektedir. Buna göre, bu tez çalışmasında bu hususlar dikkate alınarak optimum kesme şartları belirlenerek sac paketleri oluşturulmuştur.

5.2.2. Lazer kesme yöntemi

Lazerler, malzemelerin işlenmesinde, tıp alanında konulan tanılarının yanı sıra medikal uygulamalarda ve birçok diğer alanlarda kullanım alanları genişlemektedir. Lazer prosesi, malzemelerin termal olarak işlenmesi, malzeme yüzeylerinin iyileştirilmesi, kaynaklı birleştirmeler, eritme, yüzey kaplama ve kesme gibi işlemlerde sıklıkla kullanılmaktadır. Malzemelerin işlenmesinde, benzersiz çözümler sunmakla birlikte, maliyet ve karmaşık imalat işlemlerinin kolaylıkla gerçekleştirilebilmesi açısından tercih edilmektedir. Şekil 5.6'da lazer kesim yönteminin şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 5.6. Lazer kesme yönteminin şematik gösterimi [94].

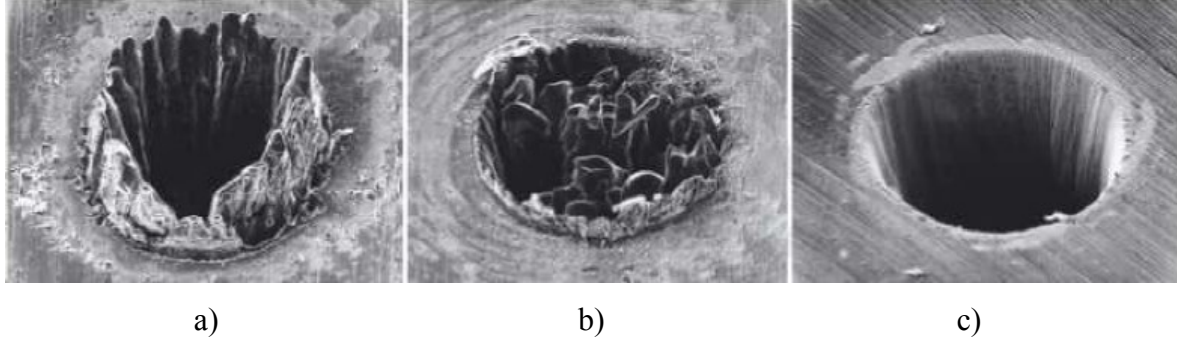
Lazer kesim yöntemi, metal, ametal, sünek ve sert malzemelerin ve karmaşık geometriye sahip malzemelerin kesilmesinde kullanılmaktadır. Diğer kesim yöntemlerine göre kıyaslandığında, talaş kaldırma oranının en az olduğu yöntemlerden biridir. Kesme bölgesinde yerel ısı oluşumu, deformasyonun minimize edilmesi ve takım aşınmasının olmaması gibi etkenlerden dolayı tercih edilmektedir [95]. Lazer kesme işlemi, lazer ışını ve malzeme özelliklerinden etkilenmektedir [96]. Işın dalga boyu, lazer gücü ve darbe süresi lazer kesim işleminde en önemli parametreler arasındadır. Malzeme yüzeyine iletilen radyasyonun dalga boyu vasıtasıyla yüzeyde erime işlemi başlar. Buna göre, yüzey bitirme ve kaplama gibi işlemlerin yanı sıra termal iletkenlik bu işlemin gerçekleştirilmesinde önemli parametreler arasındadır. Lazer kesim yönteminde optimum kesme parametrelerinin belirlenmesi için puls tekrar sayısı, kesme hızı ve darbe yoğunluğu gibi etkenlerin iyi yüzey kalitesi açısından dikkate alınması gerekmektedir.

Lazer kesme parametreleri

Lazer ile kesme yöntemi, belirli bir enerji ile malzemenin eritilerek kesilmesi esasına dayanmaktadır. Bu prosesin gerçekleştirilmesinde, belli başlı bazı parametreler bulunmaktadır. Kesme hızının arttırılması veya lazer gücünün azaltılması, kesme bölgesinde nüfuziyetin tam olmaması ve zayıf erime kalitesi gibi olumsuz durumların oluşmasına sebep olmaktadır. Literatürde yapılan birçok çalışmada lazer kesim yönteminde, optimum parametrelerin belirlenmesi için darbe süresi (pulse duration), darbe tekrarlama oranı (pulse repetition rate), dalga boyu (wavelength), ışın kalitesi (beam quality), lazer gücü (laser power), darbe enerjisi (pulse energy), akıcılık (fluence), maksimum güç (peak power), kesme hızı (cutting speed), işleme gazı ve basıncının tespit edilmesi gerekmektedir [95].

Darbe süresi

Darbe genişliği (pulse width) olarak bilinen ve lazerin malzemeyi eritmesi açısından önemli bir etkidir. Chickov ve ark., farklı malzemelerin kesilmesi anında, farklı sürelerde erimesi ile ilgili çalışmalar yapmışlardır [97]. Resim 5.2’de lazer ile farklı darbe süreleri arasında malzemenin kesilme esnasında, kesme bölgesinde oluşan erimenin durumu gösterilmiştir. Sürekli dalga (Continuous wave-CW) lazerler, basınç gücüne bağlı olarak sürekli lazer gücünün uygulanması ile ışını yaymaktadır. CW lazerler, eriterek kesme veya kaynak yapılabilen ve termal etkiye sebep olan uygulamalar için kullanılmaktadır. Uzun darbe süresine sahip ($\approx 1\text{ms}$) darbeleri lazer sistemleri, kısa zaman aralıklarında yapılan mikro kaynak işlemleri için daha yüksek güç yoğunluklarında kullanılmaktadır. Kısa darbeleri lazerler ise malzemenin üzerindeki termal etkinin azaltılması için kullanılmaktadır. Kesme işleminin yapılabilmesi için eşik değerinin üzerinde enerji yoğunluğunun oluşturulması gerekmektedir. Ayrıca kısa lazer darbeleri, üreteç (resonator) sistemi kullanılarak oluşturulmaktadır. Yüksek pik (peak) gücünden dolayı, katı hal lazerleri (solid state laser) ise frekans dönüşümleri için verimli olmalarının yanı sıra, gözle görülebilen ve ultraviyole (UV) ışınların kolaylıkla dağıtılabilmesi açısından kullanılabilir [95].



Resim 5.2. Lazerde darbe süresinin etkisi, a) Saniyenin milyarda biri darbe, b) saniyenin trilyonda biri darbe, c) saniyenin katrilyonda biri darbe [97].

Darbe tekrar oranı

Darbe frekansı (pulse frequency) olarak bilinen ve lazer ile kesme işleminde saniye başına darbe sayısı olarak kullanılmaktadır. Tarama hızı tekrar oranı ile ölçeklendirilebilmektedir. Darbe oranının artması ile kesilen malzeme üzerinde termal etki meydana gelmektedir. Hatta, ultra kısa darbeleri lazerler için de bu geçerlidir. Enerji yeterli olduğunda, her lazer darbesi iş parçası malzemesi üzerinde etki meydana getirmektedir. Eğer darbe oranı yetersiz olursa, termal bölgede yeterli enerji olmayacağından dolayı kesme işlemi gerçekleşmez. Hızlı lazer darbeleri ile iş parçası malzemesi üzerinde yeterli termal etki oluşacağı için kesme işlemi daha verimli bir şekilde yapılabilmektedir.

Kesme bölgesinde oluşan termal etkiler, iki farklı durumdan dolayı meydana gelmektedir. Bu faktörlerden birincisi, kesme bölgesinde ısı birikiminin oluşmasından kaynaklanmaktadır. Darbe oranının artması, iş parçasının kesme bölgesinde gerekli ısının oluşması için yeterli zamanın azalmasına neden olmaktadır. Yüksek darbe değerlerinde ısı, malzemenin içerisine nüfuz eder, ancak bazı durumlarda ısı, malzemenin etkileşim bölgesinin dışına transfer edilemeyebilir. Bu nedenle iş parçası malzemesi ısınmaya başlar. Bu etki, erimiş malzemenin şeklinin bozulmasına neden olmaktadır. İkinci faktör ise, kesme bölgesinde oluşan partiküllerdir. İki lazer darbesi arasındaki kısa zaman aralıklarından dolayı oluşan erimiş parçacıklar, lazer ışınının gerçekleştiği bölgeye yapışmaktadırlar. Lazer darbelerinin etkisi ile bu partiküller, iş parçası üzerinde yanma veya tutuşmaya neden olmaktadır. Bu iki faktör, iş parçası geometrisi ve ölçülerine, lazerin akıcılığına ve iş parçası malzemesinin termal iletkenliğine bağlıdır. Her iki faktör, lazer darbe tekrar oranı, metal malzemelerde 100 kHz' ın üzerindeki değerlerde gerçekleştiği gözlenmektedir [95].

Dalga boyu

Dalga boyu, uyarılmış emisyon sürecindeki geçişlere bağlıdır [98]. Bu süreç, fiziksel mekanizmaları kapsayan ve kesim kalitesi üzerinde etkili olan en önemli parametreler arasındadır. Ayrıca, malzemenin yüzey emiciliği üzerinde de önemli etkiye sahiptir. Belirli bir dalga boyunda, herhangi bir malzeme türü için, en düşük yansıma ile maksimum lazer enerjisi elde edilebilmektedir [99]. Bu termal proseste, iş parçası üzerinde lazer enerjisinin ne kadar kullanılacağına belirlenmesinde en önemli faktördür. Daha düşük dalga boyu, yüksek foton enerjisine sahiptir. Birçok malzeme, UV (Ultraviyole) dalga boyunu, görülebilir IR (kızılötesi) dalga boyuna göre daha iyi absorbe eder. Örneğin, bakır malzemenin farklı dalga boylarında işlenmesinde, daha düşük dalga boylarında, darbe başına ortalama daha yüksek aşındırma derinliği elde edilebilmektedir [100]. Fiber lazerlerin düşük dalga boylarına rağmen (yaklaşık olarak 1 μ m), CO₂ lazerlere kıyasla (10,6 μ m) metalik malzemelerin kesilmesinde, daha yüksek emiciliğin elde edilmesine sebep olmaktadır.

Endüstriyel alanlardaki uygulamalarda, malzemenin kesilebilmesi için kesme bölgesinde tam erimenin gerçekleşmesi gerekmektedir. Bunun için, malzemenin kesme bölgesinde erime ve kesilme süresine göre düşük odaklama ve nufuziyet derinliklerinde kısa dalga boyunun seçilmesi gerekmektedir. Aksi takdirde, dalga boyunun arttırılması gerekmektedir [101].

Işın kalitesi

Işın kalitesi (M^2), lazer sisteminin bir özelliğidir. Belirli şartlar altında odaklanabilen lazer ışının ölçülebilmesi gerekmektedir. Lazer ışının dağılım yoğunluğu, lazer kaynağına bağlıdır. Rezonatörün (üreteç) tasarımına bağlı olarak, ışın farklı dağılım modlarına göre yayılabilmektedir. Işın kalitesinin en iyi olduğu durum, $M^2=1$ anında gerçekleşmektedir. Bu değer, birçok lazer için özellikle, tek mod fiber lazerler ile katı hal lazerlerde yaklaşık olarak $M^2 \leq 1,1$ alınmaktadır. Lazer kesim işleminde, daha yüksek ışın kalitesinin elde edilebilmesi için, odaklama boyutunun azaltılmasının yanı sıra, çalışma mesafesinin arttırılması gerekmektedir. Ayrıca, odaklama düzlemi üzerine ışın dağıtıcı elemanlar kullanarak, ışın yoğunluğu arttırılabilir. Böylelikle, yüksek ışın kalitesi elde edilebilir [95].

Lazer gücü

Lazer kesme gücü (W), ana işleme kontrol parametresidir. Bu parametrenin kontrol edilmesi ile farklı ışıyım şartları altında farklı malzemelerin hassasiyetle işlenmesi mümkün olabilmektedir.

Katı hal lazerlerinin yanı sıra gelişen teknolojiye bağılı olarak günümüzdeki lazer teknolojisi ile lazer darbeleri arasında hiçbir kayıp olmaksızın lazer gücü, kolaylıkla ayarlanabilmektedir. Lazer gücünün belirlenmesi ile ilgili uygulamalarda, bu parametrenin lazer akıcılığı (laser fluence-J/m²) veya lazer darbe enerjisine (pulse energy-J) bağılı olarak belirlendiğı gözlenmiştir [95].

Lazer darbe enerjisi ve darbe şekli

İş parçası malzemesinin işlenebilmesi için, darbe enerjisinin orantılı bir şekilde uygulanması gerekmektedir. Ancak, lazerle işleme yapılırken uygulanacak darbe şeklinin darbe enerjisine (J) göre kararlaştırılması gerekmektedir. Lazer darbe genişliği ve pik (peak) gücü, lazer darbe şeklini belirleyen önemli parametrelerdir. Lazer darbe süresi, lazer darbe genişliği ve pik gücünün tam olarak belirlenmesinde rol oynamaktadır. Ayrıca, lazer pik gücü ise darbe enerjisinin belirlenmesi ile ortaya çıkmaktadır. Buna göre, lazer darbe enerjisi, pik gücü ve darbe şeklinin birbiri ile yakından ilişkili olduğu ve kesme parametrelerinin belirlenmesinde de rol oynamaktadır [101].

Akıcılık

Akıcılık (J/m²), kısa ve ultra kısa lazer darbeler kullanılarak, malzemenin kesilmesi esnasında oluşan erimenin sonucunu etkileyen en önemli parametredir. Akıcılık, işlenen malzeme üzerinde oluşan enerji yoğunluğu olarak tanımlanabilmektedir. Akıcılık, lazer darbe enerjisinin odaklama boyutuna oranlanması ile hesaplanmaktadır. Termal etkinin yanı sıra, kesme bölgesinde oluşan erimenin çapı ve derinliğine göre belirlenmektedir [95].

Maximum darbe gücü

Herhangi bir noktada oluşan lazer darbesinin maksimum seviyeye ulaştığı güç, pik gücü olarak adlandırılmaktadır. Pik gücü, sabit darbe genişliğinde etkileşim bölgesinde sıcaklığın maksimum seviyeye ulaştığı noktaya göre belirlenebilmektedir. Yüksek pik gücü, genellikle metaller ve yarı iletken malzemelerde, eriyen bölgenin buharlaştırılmasında kullanılmaktadır. Ayrıca, malzeme üzerinde eriyen bölgedeki ince tabakada ayrışmaların olduğu gözlenebilirken, ısıdan az etkilenen bölgede ise yeniden şekillenme söz konusu olmaktadır [102]. Anlık pik gücünün çok fazla olmasına bağlı olarak sıcaklık değerlerinde aşırı ve hızlı bir şekilde artış veya azalma meydana gelirse, bu durum kesme kenarında gerilmelerin ve çatlakların oluşmasına sebep olmaktadır [101].

Odaklama boyutu

Odaklama boyutu, lazer ışın demetinin ışılandığı alandır. Lazer kesim uygulamalarında, minimum odaklama boyutuna göre ışınların odaklanması gerekmektedir. Fiber lazerlerde çok düşük odaklama boyutlarına rağmen, geleneksel lazer kesim tezgahlarında, daha büyük çalışma mesafelerinde kullanıcılar, daha düşük odaklama boyutları kullanabilmektedir [99].

Daha küçük işleme boyutları için, düşük odaklama boyutları kullanılmalıdır. Örneğin, otomobil motorlarının egzoz emisyonlarını azaltmak için yakıt enjektörleri üzerindeki deliklerin 100 μm çapında delinmiş olması gerekmektedir. Odaklama boyutunun azaltılması ile lazer puls (darbe) enerjisinin yoğunluğunun yanı sıra akıcılığın ve lazer gücünün artırılması sağlanabilmektedir [101].

Işın yoğunluğu

Kısa puls (darbe) genişliğine (ns) sahip yüksek enerjili darbeler (μJ - mJ) ve odaklama yoğunlukları (MW/cm^2 - GW/cm^2), kesici takım geometrisinde kullanılan tungsten karbür ve silisyum karbür gibi sert malzemeler ile medikal alanlarda kullanılan polimer esaslı yumuşak malzemelerin işlenmesinde kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra, seramik, cam ve elmas gibi malzemeler, 10 μm ' den daha az işleme hassasiyetlerinde mikro işleme yöntemi ile kesilebilmektedir [103].

Kesme hızı

Lazer kesme yönteminde kesme hızı (m/dak), en önemli parametrelerden biri olup, bu parametre iş parçası malzemesi ve iş parçası malzemesinin kalınlığına bağlı olarak belirlenmektedir. İş parçası malzemesinin kalınlığının artması ile kesme hızı değerinin azaltılması gerekmektedir. Ayrıca, maksimum kesme hızını iş parçası malzemesinin kalınlığının yanı sıra, lazer gücü de sınırlamaktadır [104]. Belirli bir lazer gücünde, maksimum kesme hızı, iş parçası malzemesinin kalınlığının artmasına bağlı olarak azaltılması gerekmektedir. Bu durum, kesme bölgesinde oluşan buharlaşma işlemini kolaylaştırmaktadır [105]. Lazer gücünün (P), malzemeye göre değişen sabit katsayı (B), kesme hızı (V), iş parçası malzeme kalınlığı (d), lazer odaklama çapı veya kerf genişliği (w_k) arasındaki deneysel ilişki Eş. 5.3'e göre ifade edilebilir.

$$P = B \cdot w_k^{0.01} \cdot d^{0.21} \cdot V^{0.16} \quad (W) \quad (5.3)$$

Eş. (5.1), farklı malzemelere (metal, plastik, ağaç vb.) göre belirlenen sabit katsayıya göre (B), bu malzemelerin lazer kesim yöntemi ile kesilmesinde yüksek doğrulukta sonuçlar vermektedir [106, 107].

Kesme gazı ve basınç

Kesme gazının lazer kesim yönteminde beş temel işlevi bulunmaktadır. Azot gibi soygazlar, kesme anında erimiş malzemenin tekrar katılaşmadan dışarı atılmasını sağlarken, oksijen gibi aktif gaz ise malzeme ile ekzotermik reaksiyona girmektedir. Ayrıca, büyük kesite sahip malzemelerin kesme bölgesinde yüksek ışın yoğunluğu ile plazma oluşumunun engellenmesinin yanı sıra, bu bölgede oluşabilecek kirlenmenin de önüne geçilebilmektedir. Gaz akışıyla kesme bölgesi soğutulabilmektedir. Bununla birlikte, ısıdan etkilenen bölgenin de (Heat affected zone-HAZ) kısıtlanması sağlanmaktadır. Yaygın olarak kullanılan kesme gazları, azot ve oksijendir. Azot, paslanmaz çelik ve alüminyum gibi malzemelerin kesilmesinde kullanılırken, oksijen ise orta sertlikteki çeliklerin kesilmesinde kullanılmaktadır [98].

Oksijen ile kesim işleminde oksijenin varlığı, ekzotermik reaksiyona katkıda bulunarak lazer kesme gücünün arttırılmasına yardımcı olmaktadır. Bu durum, daha yüksek kesme hızlarına

ulaşılarak, kalın malzemelerin kesilmesine olanak sağlamaktadır. Kalın malzemelerin kesilmesinde, malzeme kalınlığının artması ile gaz basıncının azaltılması gerekmektedir. Bu durumda, kesme kenarında oluşabilecek yanmanın etkisini azaltmak için nozul çapının artırılması gerekmektedir [98].

Lazer kesme işleminin karakteristik özellikleri

Lazer kesim yönteminin karakteristik özelliklerine göre kesim kalitesinin belirlenmesinde, kerf (çentik) genişliği, diklik, yüzey pürüzlülüğü, çapak, cüruf oluşumu, ısıdan etkilenen bölge (heat affected zone-HAZ) ve ince çizikleri oluşumu gibi etkenler dikkate alınmaktadır (Resim 5.3).

Çentik (kerf) genişliği

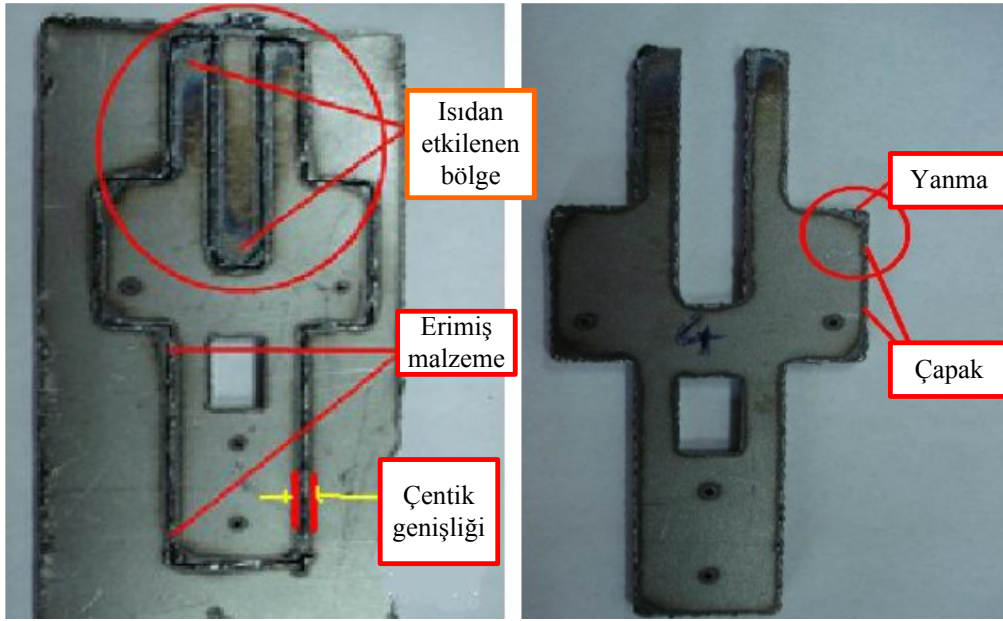
Malzemenin kesilip çıkarılması esnasında oluşan ve kanal şeklinde geometriye sahip yapıdır. Çentik genişliği, odaklanmış lazer ışın genişliğinden daha büyük ve kesilen kanalın genişliği olarak ifade edilebilmektedir. Bu nedenle, düzgün ve dar çentik genişliğinin elde edilebilmesi için lazer kesim parametrelerinin iyi belirlenmesi gerekmektedir. Bu parametreler, kesme hızı, lazer ışın parametreleri ve gaz özellikleridir [108].

Diklik toleransı

Diklik ve eğim toleransı, gerçek yüzey ile amaçlanan yüzey arasındaki maksimum açı değeridir. Diklik değeri, yüzeyin konkavitesi ile açısal sapma değerinin toplamına eşittir. Buna göre, diklik toleransının yüksek hassasiyetle elde edilmesi için kesme parametrelerinin dikkate alınması gerekmektedir [108].

Yüzey pürüzlülüğü

Kesme kenarında oluşan çiziklerin yüksekliği, yüzey pürüzlülüğünün göstergesi olarak belirtilmektedir. Yüzey pürüzlülüğü, kesilen yüzeyde oluşan yüzey profilindeki düzensizliklerdir.



Resim 5.3. Isıdan ektilenen bölge, kerf genişliği, erimiş malzeme, yanma ve çapak oluşumunun gösterimi [99].

Isıdan etkilenen bölge (Heat affected zone-HAZ)

Resim 5.3'e göre lazer kesim işleminden kaynaklanan ve çentik bölgesinin olduğu alanda, ısı etkenlerinden dolayı termal gerilmeler meydana gelmektedir. Bu bölge, kesme işlemi esnasında iki farklı yöntemden etkilenmektedir. Bunlardan birincisi, oksidasyon reaksiyonundan dolayı bu bölgede renk farklılıklarının ortaya çıkmasıdır. Yüzeyde oluşan oksidasyona bağlı bu durum, kalıcı değildir. Basit bir zımparalama işlemi ile ortadan kaldırılabilir. Bu bölgede, kolaylıkla optik aletlerle ölçümler yapılabilir. İkincisi ise, kesme kenarına bitişik bölümde ısı işlem görmüş bölgenin oluşmasıdır. Bu bölge, yüzey oksidasyonunun gerçekleştiği bölgeden daha dar bir alana sahiptir. Yalnızca mikrosertlik cihazı ile bu bölgenin sertliği ölçülebilmektedir [108]. Kesilen iş parçası malzemesinin birim uzunluğun ve kalınlığının arttığı durumlarda, enerji girişi artacağından, ısıdan etkilenen bölgenin genişliği de artmaktadır. Bu durum, maksimum limit değerlerine göre ışın gücü ile malzeme kalınlığının belirlenmesi veya kesme hızının minimum limit değerlerinde kullanılması ile ortadan kaldırılabilir.

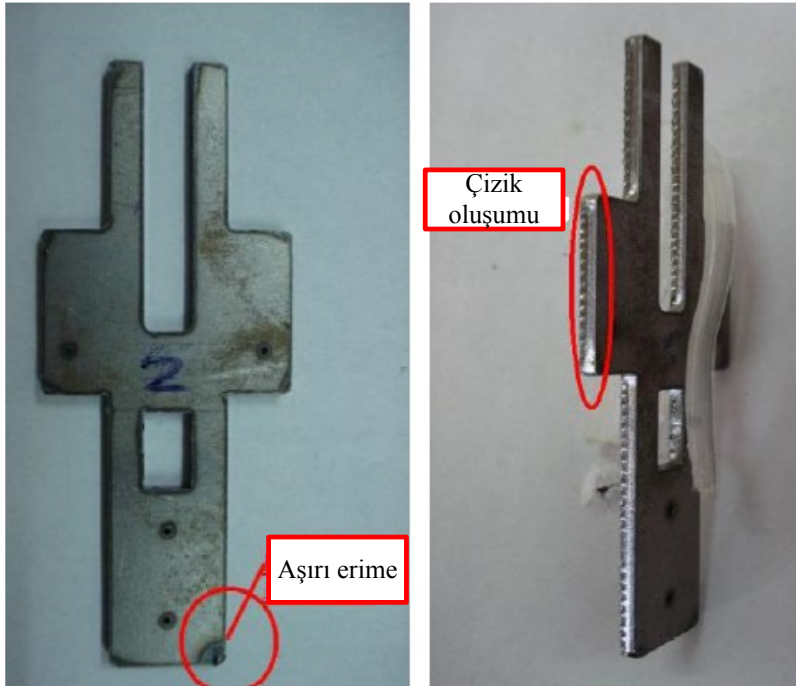
Çapak ve cüruf

Curuf, çentiğin olduğu bölgede erimiş malzemenin hızlı bir şekilde uzaklaştırılmamasından dolayı yeniden katılarak kesilen kenara yapışan tabakadır.

Çapağın yanı sıra, bu bölgede sadece cüruf değil aynı zamanda katılaşmış oksit tabakası da bulunmaktadır. Cüruf, düşük gaz basıncı, nozul ile iş parçası malzemesi arasındaki mesafenin artması, çok yüksek kesme hızları ve erimiş malzemenin viskozitesinin yüksek olması gibi nedenlerden dolayı oluşmaktadır [108]. Lazer kesim işleminde, cüruf oluşum mekanizması tam olarak belirlenememektedir. Yardımcı gazın kesim işlemi esnasında oluşan erimiş metalin formu üzerindeki etkisinin belirsiz olması bu durumun oluşmasına sebep olmaktadır. Bunu etkileyen birçok faktör bulunmaktadır. Bunlar, erimiş malzemenin sıcaklığı, viskozite katsayısı, yüzey gerilimi, gaz akış oranı ve hızı, kesilen geometrinin şekline bağlı olarak değişmektedir.

Yivli çizik oluşumu

Yardımcı gazın etkisiyle, kesilen kenarda belirli yükseklik ve aralıklarla yiv şeklinde çizikler oluşmaktadır. Kesilen kenar boyunca benzer şekilde bu form devam etmektedir. Resim 5.4’te kesilen kenarda oluşan aşırı erime ve çizikler gösterilmiştir.



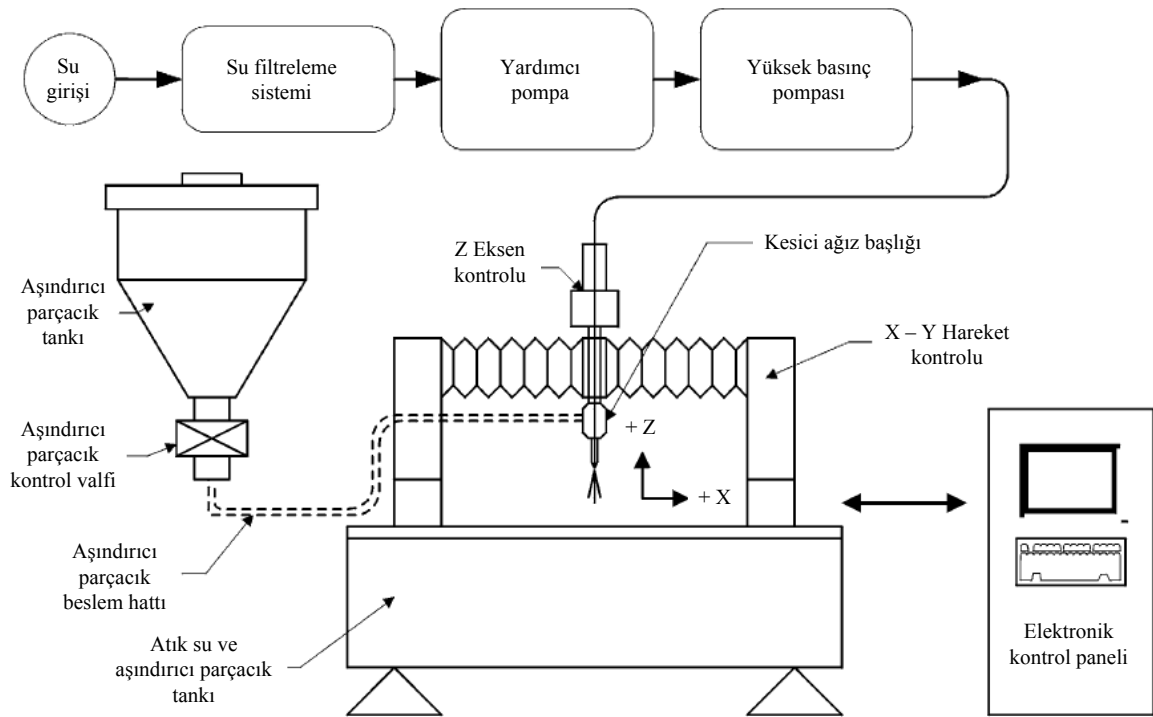
Resim 5.4. Kesme işlemi esnasında kenarda aşırı erime ve çiziklerin oluşumu [99].

İnce kesite sahip malzemelerde bu durum, kesilen kenarın üst bölümünden alt bölüme doğru düzenli bir şekilde devam eder. Kalın kesite sahip malzemelerde ise çizgiler rasgele ve düzensiz bir şekilde oluşmaktadır. Kesilen yüzey boyunca oluşan bu çiziklerin derinliği,

kesme hızı, nozul çapı, gaz basıncı ve odaklama pozisyonu gibi parametrelerden etkilenmektedir oluşmaktadır [108].

5.2.3. Aşındırıcılı su jeti kesme yöntemi

Aşındırıcılı su jeti kesim yöntemi, başlangıçta sabit bir kesite sahip boru içerisinde belirli bir basınçta gönderilen su, kesiti daralan bir bölüme doğru aktarılırken suyun çıkış hızının artmasına neden olur. Malzemelerin kesilebilmesi için su içerisine aşındırıcı parçacıklar katılmaktadır. Su içerisindeki aşındırıcılar, yüksek basınçla birlikte malzeme yüzeyine püskürtüldüğünde, yüzeyde mikro kırılmaların olduğu gözlenir. Bu kırılma işlemi, malzemenin tamamen kesilebilmesi için yüksek basınç altında devam eder. Şekil 5.7’ de aşındırıcılı su jeti kesim yönteminin şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 5.7. Aşındırıcılı su jeti kesme prosesinin şematik gösterimi [109].

Aşındırıcılı su jeti ile hassas kesme işleminin gerçekleştirilebilmesi için kesme işlemini etkileyen parametrelerin iyi belirlenmesi gerekmektedir [110]. Bu parametreler, genel olarak iki kategoriye ayrılmaktadır. Bunlar giriş parametreleri veya bağımsız değişken ve çıkış parametreleri veya bağımlı değişkenlerdir [111]. Momber ve Kovacevic'e [112] göre bu parametreler, farklı kategorilere göre sınıflandırılmıştır. Buna göre;

Giriş parametreleri:

- Hidrolik parametreler: Su basıncı ve su jeti çapı
- Kesme parametreleri: Nozul akış hızı, paso sayısı, nozul uzaklığı, etki açısı
- Karıştırma ve hızlandırma parametreleri: Nozul çapı ve nozul uzunluğu
- Aşındırma parametreleri: Aşındırıcı kütle akış oranı, aşındırıcı parçacık çapı, aşındırıcı parçacık boyut dağılımı, aşındırıcı şekli ve sertliği

Çıkış parametreleri:

- Kesme derinliği
- Çentik (kerf) geometrisi: Üst çentik ve alt çentik genişliği, çentik açısı
- Çentik topografisi: Yüzey pürüzlülüğü
- Talaş kaldırma hızı

Su basıncının etkisi

Aşındırıcılı su jeti ile malzemelerin kesilmesinde, birçok çalışmada su basıncının kesme derinliği ile ilgili değişen parametre olduğu belirtilmiştir [113-115]. Bu çalışmalarda, malzeme kesme kalınlığının artması ile su basıncının da artması gerektiği belirtilmiştir. Şekillendirilebilir ve gri dökme demir gibi malzemelerin kesilmesi esnasında, sınır değerlerinin altındaki basınç değerlerinin kesme işlemi için yeterli olmamaktadır [116, 117]. Kritik basınç değerinin ötesinde, belirli aralık değerleri için kesme derinliğinin artması ile kesme basıncının arttırılması gerekmektedir. Kritik basınç değeri ise diğer kesme parametrelerinden bağımsızdır. Su basıncının arttırılması, kesme kabiliyetinin iyileştirilmesi açısından en önemli parametredir. Nozul çıkışındaki su ile aşındırıcı parçacıkların yüksek hızlarda birbirleri arasında uyumlu olması, malzeme üzerindeki kesme işlemi için yeterli enerjiyi oluşturmaktadır [114].

Su jeti çapının etkisi

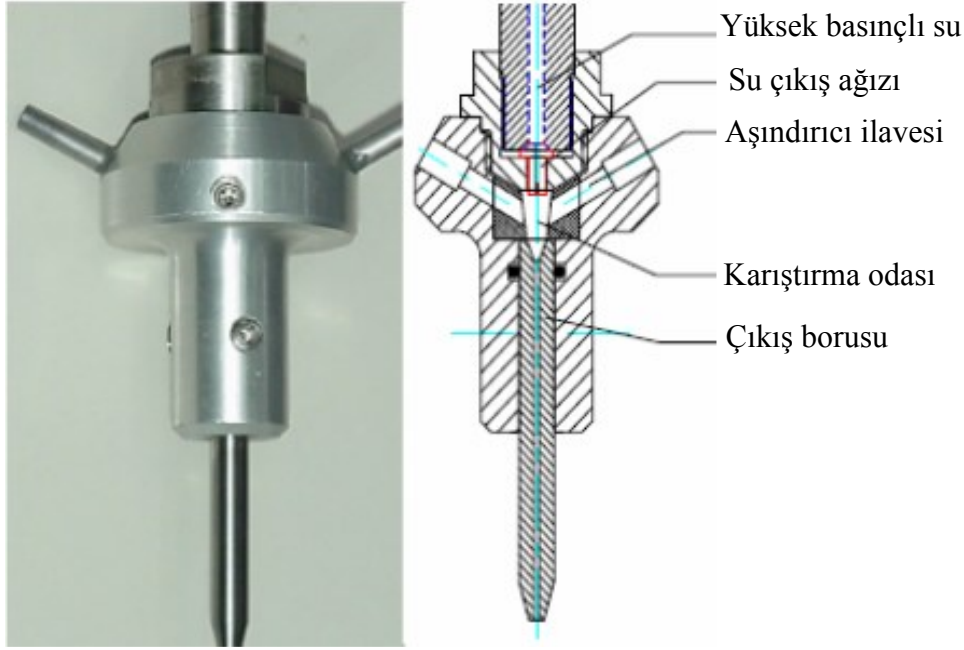
Su jeti çıkış çapının artması ile daha uzun su sütunlarının oluşmasına neden olmaktadır. Durgun atmosferde su jetinin çıkış uzunluğu, su türbülansı ile malzeme yüzeyinde çukurlaşmanın başlaması üzerinde etkilidir. Su jeti çıkış çapı (nozzle diameter) 1 mm'den 2 mm'ye arttırıldığında, su jeti çıkış uzunluğu üzerinde çukurlaşma etkisinin azaldığı

görülmektedir [118]. Bu da su jeti çıkış uzunluğunun, daha fazla olmasına sebep olmaktadır. Su jeti basıncının arttırılması ile su jeti çıkış mesafesi, malzeme yüzeyine göre artmaktadır [119].

Sabit kesme hızlarında, su jeti çıkış çapının artması ile malzeme yüzeyinde oluşan nüfuziyet derinliği de artmaktadır. Ayrıca, nüfuziyet derinliğinin arttırılması için de daha büyük çıkış (nozul) çaplarının kullanılması gerekmektedir. Su jeti nozul çaplarının aynı olması halinde, küçük su jeti çıkış mesafelerinde, malzeme üzerindeki nüfuziyet derinliği artmaktadır. Sonuç olarak, farklı nozul çaplarının kullanılması, su jetinin malzeme üzerinde farklı etkilere sebep olmaktadır [120]. Hassas bir kesim işleminin yapılabilmesi için bu parametrenin dikkate alınması gerekmektedir

Nozul akış hızının etkisi

Literatürde, nozul akış hızı ile kesme derinliği arasındaki ilişkiyi gösteren birçok çalışma yapılmıştır. Buna göre Chen ve ark., kesme derinliğinin azalmasına bağlı olarak nozul çıkış hızının arttırılması gerektiği vurgulamışlardır. [121, 122]. Nozul akış hızının artması ile malzeme yüzeyinde oluşan aşındırma süresi azalır veya nozul çıkış hızının artması, malzeme yüzeyinde kesme işlemini gerçekleştiren parçacıkların yoğunluğunun azalmasına sebep olmaktadır [112]. Diğer bir çalışmada, nozul çıkış hızındaki artış, yüzey pürüzlülüğünün artışına neden olmasının yanı sıra düşük akış hızı değerlerinde ise yüzey pürüzlülüğünün fazla etkilenmediği belirtilmiştir [111]. Kesilen yüzey hassasiyetinin sağlanması için nozul çıkış hızı malzemeye göre iyi belirlenmesi gerekmektedir. Aksi takdirde, kesilen yüzeyin açılı olmasına ve yüzey pürüzlülüğünün artmasının yanı sıra çapak oluşumunun artmasına da sebep olabilmektedir. Resim 5.5' te aşındırıcılı su jetinde kullanılan nozulun yapısı gösterilmiştir.

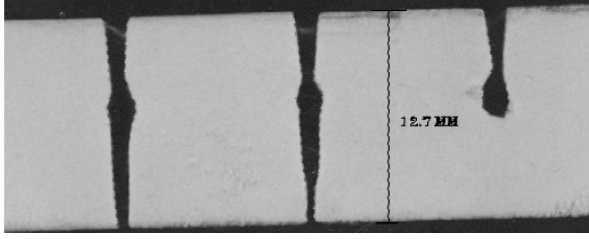


Resim 5.5. Nozul yapısının gösterimi [123].

Paso sayısı

Aşındırıcı su jeti ile tek pasoda kesim yapılabilmesi, iş parçası malzemesinin kalınlığı ile yakından ilişkilidir. Bu nedenle, aşındırıcı su jetinde çoklu paso ile kesim metodu, geleneksel imalat işlemleri arasında kesme performansını arttırmak için yaygın olarak kullanılmaktadır [124-126]. Bu teknik ile aynı çentik aralığında tekrarlı pasolarla kesim işlemi gerçekleştirilir.

Kalın malzemelerin su jeti ile kesilmesinde, çoklu paso yöntemi kullanılırken, ince malzemelerin kesilmesinde ise tek paso kesim yöntemi kullanılmaktadır. Çoklu paso ile kesme yöntemi, aynı kesme süresinde tek paso kesim yöntemine göre kıyaslandığında, kesme derinliği ve yüzey tamlığı açısından daha iyi kesme performansı göstermektedir. Resim 5.6’ da, kesme derinliğinin artmasına bağlı olarak paso sayısının arttırıldığı gösterilmiştir [127].



Resim 5.6. Çoklu paso ile aşındırıcılı su jeti kesme yönteminde çentik profili (soldan sağa: üç paso, iki paso, tek paso) [128].

Ayrıca, nozul akış hızı ile abrasif parçacık çapı, çoklu paso kesim yöntemini etkileyen parametrelerdendir. Düşük nozul akış hızları ile tek paso kesim yöntemi, aynı enerji tüketim şartları altında yüksek hızlardaki çok paso kesim yöntemine göre daha verimli olmaktadır [129]. Wang ve ark., yaptıkları çalışmada ise yüksek nozul akış hızlarında çok pasolu kesim yöntemi ile daha iyi çentik kalitesinin elde edildiğini ve daha büyük kesme derinliklerinde ise düşük akış hızlarında tek pasolu kesim yöntemine göre daha iyi performans gösterdiğini belirtmişlerdir [130]. Buna göre, su jeti ile hassas kesim işleminin yapılabilmesi için, kesme parametrelerinin yanı sıra optimum paso sayısının dikkate alınması gerekmektedir.

Nozul uzaklığı

Kesme derinliği üzerinde, nozul uzaklığının etkisi ile ilgili literatürde birçok çalışma yapılmıştır. Buna göre, nozul uzaklığının artması ile iş parçası malzemesi üzerinde kesme derinliğinde doğrusal bir azalma olduğu gözlenmektedir. Chen ve ark., [121], nozul uzaklığının arttırılması ile jet gücünün etkisinde azalma meydana geldiği ve bunun çentik (kerf) yüzey kalitesini olumsuz etkilemektedir. Ancak, nozul uzaklığının çok düşük olması durumunda, su jeti kesici kafanın hasar görmesine neden olmaktadır. Ramulu ve Arola yaptıkları çalışmada, grafit/epoksi lamine kompozit malzemenin su jeti ile kesilmesinde, nozul uzaklığının arttırılması ile oluşan jet çapının arttığı ve bunun kesme işlemi esnasında yeterli enerji yoğunluğunun oluşmamasına neden olduğunu belirtmişlerdir. Bunun sonucunda, nüfuziyet derinliğinin azaldığı gözlenmiştir [131]. Buna göre, su jeti ile kesim yönteminde hassas yüzey kalitesinin elde edilmesi için nozul uzaklığının dikkate alınması gerekmektedir.

Darbe açısı

Su içerisindeki partikülün hızı ile etki açısı birbiri ile yakından ilişkili parametrelerdir. Darbe açısı, nozul kafasının iş parçası yüzeyi ile yapmış olduğu açıyı ifade etmektedir. Etki açısının artması ile su jetinden dolayı iş parçası üzerinde oluşan kraterin geometrik yapısı daha çok küresel bir formda oluşmaktadır. Su içerisindeki partiküllerin hızının artırılması ile iş parçası yüzeyinde oluşan kraterin küreselliği azalmaktadır. Ayrıca, partikül hızı ve etki açısının artırılmasına bağlı olarak kesme derinliği artırılabilir. 90° etki açısı altında yapılan kesme işleminde, iş parçasının yüzeyinde oluşan krater formu, kullanılan parçacıkların geometrisi ile yakından ilişkilidir [132].

Nozul çapı ve uzunluğu, aşındırıcı parçacık akış oranı

Parçacık hızı üzerinde nozul çapının etkisi ile ilgili birçok deneysel çalışma yapılmıştır. Nozul çapının artması ile parçacık hızı azalmaktadır. Parçacıkların hızlanması, su jeti çekirdeği ile çevreleyen duvar arasındaki mesafesinin fonksiyonun tepkisine bağlı olarak değişmektedir. Farklı çalışmalarda, su jeti ağız çapının artması ile partikül hızının arttığı belirtilmiştir. Bu durum, ağız çapının artmasına bağlı olarak, su akış oranının artırılmasının yanı sıra ivmenin de artırılması ile gerçekleşmektedir. Aşındırıcı parçacık akış oranındaki artışla, parçacık hızı azalmaktadır [133]. Bu durum, ivmenin korunumu yasası ile açıklanabilmektedir.

Partikül karıştırma çemberi içerisinde, karışım işlemi yapıldıktan sonra partiküller hızlandırılarak nozul içerisinden parça yüzeyine gönderilmektedir. Bu esnada, nozul boyu kısa olmamalıdır. Aksi takdirde, aşındırıcı partiküller yeterli derecede hızlandırılmaz. Nozul boyunun fazla olması durumunda ise nozul içerisinde aşınma meydana gelmektedir. Ayrıca, aşındırıcı partikül hızının ve enerjisinin azalmasına sebep olmaktadır. Optimum nozul boyu, partiküllerin malzeme yüzeyine çarptığı anda maksimum hıza ulaşabilecek şekilde belirlenmesi gerekmektedir. Endüstriyel alanlarda yaygın olarak kullanılan nozul boyu, 50-100 mm aralığında değişmektedir [134].

Aşındırıcı parçacık boyutu

Su jeti kesim yönteminde, küçük boyutlara sahip aşındırıcı kullanılması ile yüzey pürüzlülüğünün daha az oluşmasına sebep olmaktadır. Küçük boyutlara sahip aşındırıcılar, malzeme yüzeyinden daha küçük boyuta sahip talaşları kaldırmaktadır. Böylelikle, daha küçük kesme kenarları ile daha hassas yüzeyler elde edilebilmektedir. Daha iyi yüzey kalitesi elde etmek için parçacık boyutunun dikkate alınması gerekmektedir [135]. Finnie, yaptığı bir araştırmada, aşındırıcı parçacığın malzeme yüzeyine etki ettiği nüfuziyet derinliğinin parçacık boyutundan daha az olduğunu belirtmiştir. Buna göre, parçacığın etkisiyle malzeme yüzeyinde oluşan krater çapı, aşındırıcı parçacık çapının 1/10'unu geçmemektedir. Benzer durum, düşük darbe açıları kullanılarak malzeme yüzeyinde kanalların açılması için geçerlidir [136]. Literatürde bununla ilgili fazla çalışma olmamasına rağmen, malzeme yüzeyinde açılan kanalın geometrisi, parçacık boyutuyla yakından ilişkilidir. Genellikle, büyük parçacık boyutuna sahip aşındırıcılar, malzeme yüzeyinde daha fazla deformasyona neden olacağı için yüzey hassasiyetinin azalmasına neden olmaktadır [135].

Aşındırıcı parçacık boyut dağılımı

Aşındırıcı parçacık dağılımının etkisini incelenmesi için öncelikle su jeti nozul düzeneği üzerindeki karıştırma ve hızlandırma proseslerinin dikkate alınması gerekmektedir. Parçacık dağılımı, nozul içerisinde gerçekleşen karıştırma prosesi ile yakından ilişkilidir. Optimum şartlar altında parçacıklar maksimum hıza ulaştırılarak, aşındırıcı taneciklerin parçalanması minimuma indirgenmektedir. Büyük geometriye sahip parçacıklar, odaklama uzunluğunun artmasına bağlı olarak, küçük geometriye sahip parçacıklara göre daha büyük hızlara ulaşması gerekmektedir [137]. Mazurkiewicz, yaptığı çalışmada parçacık boyutu ile optimum odaklama nozul çapı arasında bir ilişki olduğunu belirtmişlerdir. Parçacık boyutunun etkisinin değerlendirilmesinde en önemli problem, hızlandırma prosesi esnasında aşındırıcı taneciklerde parçalanmaların meydana gelmesidir. Bu nedenle, kesme bölgesinde oluşan parçacık boyut dağılımı, başlangıçtaki nozul içerisindeki parçacık boyut dağılımına göre farklılıklar göstermektedir. Bu varsayımlar ihmal edilirse, parçacık boyut dağılımı, büyük aşındırıcı parçacıkların ağırlığından dolayı daha fazla kinetik enerjiye sahip olması ile belirlenebilmektedir. Bu durum, belirli bir parçacık çapına kadar, çentik (kerf) genişliğinin daha büyük olmasına sebep olmaktadır. Diğer bir ifade ile parçacık boyutundaki artışla, malzemenin su jeti ile kesilmesi esnasında birim zamanda kullanılan parçacık

sayısında azalmaya neden olmaktadır. Bu durum, parçacıkların çarpışma frekanslarının azalmasına da sebep olmaktadır [138].

Aşındırıcı şekli ve sertliği

Aşındırıcı formu ve sertliği, su jeti ile kesme yönteminde önemli parametreler arasındadır. Aşındırıcılı su jeti ile kesim yönteminde genellikle, daha sert ve keskin forma sahip partiküller kullanılmaktadır. Kesme işleminin gerçekleştiği bölgede, yerel gerilme konsantrasyonları ile oluşan çatlakların oluşturulması sağlanarak talaş kaldırma işlemi gerçekleşmektedir [139]. Sert parçacıklar yardımıyla kesme bölgesinde, plastik deformasyon veya gevrek kırılmaya maruz kalarak kesme işlemi gerçekleşmektedir. Saf metal ve alaşımları gibi sünek malzemelerin su jeti ile kesilmesinde, sert aşındırıcı parçacıkların etkisi ile malzeme yüzeyinde plastik deformasyon meydana gelmektedir. Seramik gibi gevrek malzemelerin işlenmesinde ise sert aşındırıcı parçacıklar, malzeme yüzeyinde kesme esnasında çatlaklara neden olarak kesme işlemi gerçekleşmektedir. Sonuç olarak, sert aşındırıcı taneciklerin darbe etkileri ile iş parçası malzemesinin kesilmesi gerçekleşir [140].

Kesme derinliği

Literatürde yapılan birçok çalışmada, genellikle kesme derinliğinin artması ile aşındırıcı parçacık akış oranının arttırıldığı gözlenmiştir [141, 142]. Ancak, kesme derinliği üzerinde parçacık akış oranının etkisi, su basıncı ve akış hızına göre daha azdır. Hashish, kritik parçacık akış oranının üzerinde kesme derinliği azalmaya başladığını, başlangıçta ise parçacık akış oranının artması ile kesme derinliğinin arttığını belirtmiştir. Ancak, kritik değere ulaşıldığında ise bu eğilimin tersine döndüğü ifade edilmiştir [143]. Yine literatürde yapılan bazı çalışmalarda, su basıncının arttırılması ile kesme derinliğinin arttığı gözlenmektedir [141, 117]. Chen ve ark., seramik malzemelerin su jeti ile kesilmesinde, kesme derinliği ile su basıncı arasında doğrusal bir ilişkinin olduğunu belirtmişlerdir [142]. Bernoulli'nin eşitliğinden de bilindiği gibi parçacığın kinetik enerjisi, su basıncı ile orantılıdır. Bu nedenle, yüksek su basıncı ile parçacıklarda kinetik enerji oluşacağı için daha büyük kesme derinliğinin kullanılabilmesine imkân sağlamaktadır [117].

Üst çentik ve alt çentik genişliği

Sünek malzemelerin, su jeti ile kesilmesinde iş parçası malzemesi üzerindeki üst çentik genişliği, nozul akış hızı ile önemli ölçüde etkilenmektedir. Buna göre, nozul akış hızının artması ile üst çentik genişliğinde azalma meydana gelmektedir [144]. Ayrıca, üst çentik genişliğinin ölçüsü, nozul-iş parçası uzaklığından önemli derecede etkilenmektedir. Literatürde yapılan çalışmalarda, nozul-iş parçası uzaklığının artması ile üst çentik genişliğinin arttığı belirtilmiştir [145, 109]. Bu durum, jetin uzaklaşması ile nozul-iş parçası arasındaki mesafenin artmasına ve dolayısı ile jetin iş parçası malzemesi üzerinde oluşturduğu çap ölçüsünün artmasına neden olduğu şeklinde ifade edilebilmektedir. Ayrıca, parçacık akış oranının artması da üst çentik genişliğinin doğrusal bir şekilde artmasına sebep olmaktadır. Ancak, parçacık akış oranının etkisi, nozul akış hızına göre üst çentik genişliği üzerindeki etkisi daha azdır. Su basıncı ise üst çentik genişliği üzerinde fazla bir etkiye sahip değildir [145]. Gevrek malzemelerde ise kesme derinliğinin artması ile üst çentik genişliği nozul akış hızına göre artmaktadır. 8 mm'den daha büyük kesme derinliklerinde üst çentik genişliği, su basıncı, aşındırıcı parçacık çapı ve akış hızından eşit oranlarda etkilenirken, iş parçası malzemesi-nozul arasındaki mesafenin etkisi ise önemsizdir.

Literatürde yapılan çalışmalarda, alt çentik genişliği en fazla nozul akış hızından etkilendiği belirtilmiştir. Yüksek nozul akış hızları, alt çentik genişliğinin daha dar olmasına sebep olmaktadır [109]. Bu, nozul akış hızıyla su jetinde oluşan enerji dağılımından dolayı, nozul akış hızı çoğunlukla parçacıklardan etkilenmektedir. Bu nedenle, bu parçacıkların iş parçası malzemesi yüzeyindeki nüfuziyeti ile çentik genişliği azalmaktadır. Alt çentik genişliği üzerinde su basıncının etkisi ise üst çentik genişliğine göre daha fazladır. Daha yüksek su basıncı, kinetik enerji artışından dolayı alt çentik genişliğinin artmasına sebep olmaktadır. Nozul-iş parçası malzemesi arasındaki mesafe ile parçacık akış oranının, alt çentik genişliği üzerinde fazla bir etkiye sahip olmadığı belirlenmiştir [145].

Çentik açısı

Sünek ve gevrek malzemelerin aşındırıcı su jeti ile kesilmesi esnasında oluşan çentik açısı ile ilgili literatürde birçok çalışma yapılmıştır. Sünek malzemelerin su jeti ile kesilmesinde, nozul akış hızı ile çentik açısı arasında ters orantı bulunmaktadır. Nozul-iş parçası arasındaki mesafenin artması ile çentik açısında artış olmaktadır [145]. Wang ve Wong yaptıkları

çalışmada, su basıncındaki artışın çentik açısını artmasına sebep olduğunu belirtmişlerdir. Metalik kaplanmış sac plakalarda, daha yüksek su basıncının kullanılması ile üst çentik bölgesi, daha düz bir şekilde kesilmekte ve dolayısı ile çentik açısının azalmasına neden olmaktadır. Nozul-iş parçası arasındaki mesafe, alt çentik genişliğindeki etkisi üst çentik genişliğine göre daha az oluşmaktadır. Bunun sonucunda, nozul-iş parçası arasındaki mesafenin artması, çentik açısının artmasına sebep olmaktadır. Nozul akış hızının artması, iş parçası malzemesi üzerinde oluşan çentik açısının da artmasına sebep olmaktadır. Ancak, parçacık akış oranı ile çentik açısı arasında ise net bir eğilim bulunmamaktadır [146].

Yüzey pürüzlülüğü

Aşındırıcı su jeti ile kesim işleminde yüzey pürüzlülüğü, su basıncı, nozul akış hızı, nozul-iş parçası arasındaki mesafe ve parçacık akış oranı ile yakından ilişkilidir. Kovacevic yaptığı çalışmada, üst çentik bölümünde yüzey pürüzlülüğü üzerinde su basıncının etkisinin önemsiz olduğunu belirtmiştir. Ancak, kesme derinliğinin artması ile su basıncının etkisi artmaktadır. Genellikle, su basıncındaki artış, yüzey pürüzlülüğünün azalmasına neden olmaktadır. Su basıncındaki artış, nozul içerisindeki parçacıkların hızlanmasını ve dağılmasını sağladığı için yüzey kalitesi üzerinde olumlu bir etki oluşturmaktadır. Ancak, aşırı su basıncı, parçacıkların kaybına yol açacağı için yüzey kalitesi üzerinde negatif bir etki oluşturmaktadır [111].

Nozul akış hızının artması ile yüzey pürüzlülüğünde artış olmaktadır. Nozul akış hızındaki artış, birim zamanda iş parçası yüzeyine çarpan parçacık miktarının azalmasına neden olduğu için bu durum yüzey pürüzlülüğünün artmasına neden olmaktadır. Bunu doğrulayan çalışmalar, paslanmaz çelik malzemeler için Kovacevic tarafından [111], seramik malzemeler için Hocheng ve Chang tarafından [147], metalik kaplanmış malzemeler için Wang ve Wong tarafından [146], polimer matrisli malzemeler için Wang tarafından [148] yapılmıştır.

Metalik kaplı sac plakaların su jeti ile kesilmesi esnasında nozul ile iş parçası malzemesi arasındaki mesafenin artması ile yüzey pürüzlülüğünde artış meydana gelmektedir. Su jetinin kesme yüzeyinden uzaklaşması, kesme performansını olumsuz etkileyerek, yüzey pürüzlülüğünün artmasına sebep olmaktadır. Bu durum genellikle, kesilen kenarın başlangıç bölümünde daha fazla görülmektedir [146]. Bunun yanı sıra, nozul ile iş parçası mesafesi

arttığında iş parçası malzemesi yüzeyinde oluşan jetin çapı artmaktadır. Dolayısı ile aşındırıcı parçacıkların yoğunluğunun azalmasına bağlı olarak su jetinin etki alanı daraldığı için yeterli kesme enerjisi elde edilememektedir. Bu da, yüzey pürüzlülüğünün artmasına sebep olmaktadır [131].

Aşındırıcı kütle akışının artması ile yüzey pürüzlülüğü azalmaktadır. Bunun sebebi, birim zamanda iş parçası malzemesi yüzeyine çarpan parçacık sayısının artmasıdır. Ayrıca, kesme derinliğinin artırılması sonucunda, yüzey pürüzlülüğü üzerinde aşındırıcı parçacık akışının etkisi de artmaktadır [146].

Talaş kaldırma hızı

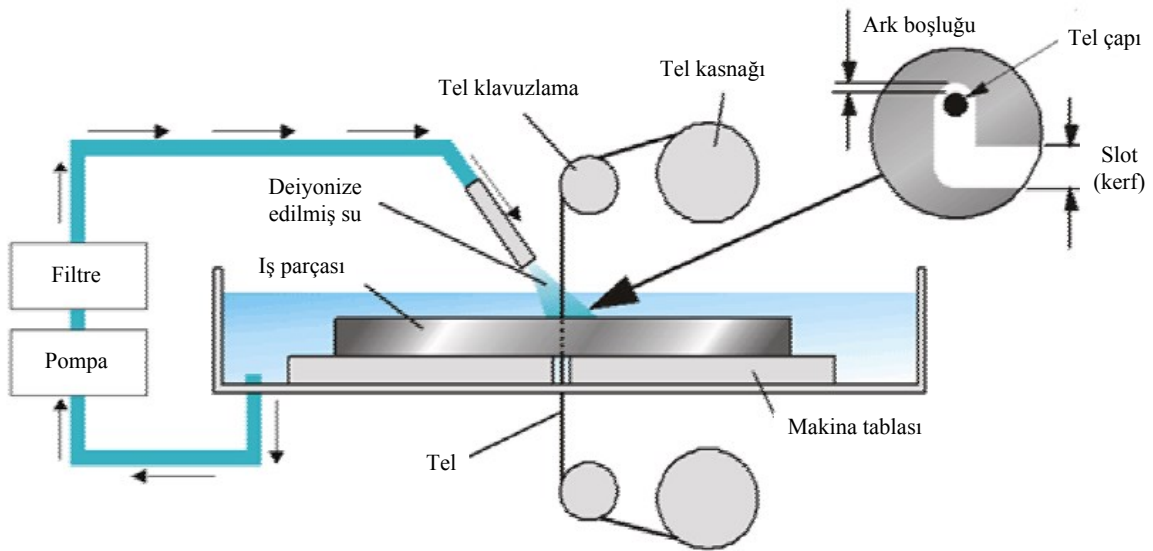
Aşındırıcı su jeti ile kesim esnasında, su basıncının artırılması ile parçacıkların kinetik enerjisi arttırılmakta ve bu durum, iş parçası yüzeyinden aşındırıcı parçacıkların talaş kaldırabilme kabiliyetini arttırmaktadır. Ayrıca, aşındırıcı parçacıkların yüksek hızlarda ivmelendirilmesi sağlanarak iş parçası yüzeyinde krater oluşturulmaktadır. Bu, talaş kaldırma işleminin gerçekleştirilmesini sağlar. Nozul akış hızının artırılması da iş parçası yüzeyinden talaş kaldırma işlemini pozitif yönde etkilemektedir. Bunun sebebi ise birim zamanda nozul içerisinden geçen parçacık sayısının artmasıdır [149].

5.2.4. Tel erezyon kesme yöntemi

Tel erezyon kesim yöntemi, ölçüsel doğruluğun ve daha iyi yüzey kalitesinin elde edilebilmesi açısından özellikle, kesme, ekstrüzyon kalıplarının ve prototip parçaların üretilmesinde yaygın bir şekilde havacılık ve otomotiv endüstrisinde, iletken malzemelerin işlenmesinde yüksek aşınma direnci, ölçüsel doğruluk ve korozyon bakımından sıklıkla kullanılan kesim yöntemleri arasındadır [150]. Kesim işlemi, iki iletken malzeme arasında, elektrik arkı oluşturularak, 2000-3000 Hz titreşim frekansı ve 8000-12000 °C ısı aralığında termal enerji yardımıyla gerçekleşmektedir. Elektrod ile iş parçası dielektrik akışkan içerisine daldırılarak küçük boşluk vasıtasıyla birbirinden ayrılmaktadır. Bu boşluk sayesinde, elektrik arkı oluşturularak, malzeme yüzeyinde aşındırma işlemi başlamaktadır. Darbe akımında, bazı durumlarda sapmalar meydana geldiği için plazmada bozulma meydana gelmektedir. Bu durum, sıcaklıkta ani azalmaya ve dielektrik akışkan yardımıyla iş parçası malzemesi üzerindeki mikroskobik formdaki aşındırılmış malzemenin

püskürtülmesine sebep olmaktadır. Herbir arkın boşalması ile hem iş parçasında hem de elektrotta krater oluşmaktadır. Elektrot ise yüzey kalitesinin belirlenmesinde önemli rol oynamaktadır [151].

Tel erezyon ile kesme işlemi, elektro-termal mekanizmanın etkisiyle gerçekleşmektedir. İş parçası malzemesi üzerinden talaş kaldırma işlemi ise erime ve buharlaştırma esasına dayanmaktadır. Bu kesim yöntemi, mekanik gerilmelerin olmaması, farklı geometriye sahip parçaların kolaylıkla işlenebilmesi, malzemenin sertlik ve tokluk gibi özelliklerini olumsuz etkilememesi açısından sıklıkla kullanılabilmektedir. Ancak, kesme hızının düşük kullanılması ve yüksek işleme maliyetleri bu kesim yönteminin kısıtlayıcı özellikleridir [152]. Şekil 5.8’ de tel erezyon kesim yönteminin şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 5.8. Tel erezyon kesim yönteminin şematik gösterimi [153].

Tel erezyon kesim yönteminin hassas bir şekilde uygulanabilmesi için belli başlı parametrelerin dikkate alınması gerekmektedir. Buna göre;

- Proses parametreleri: Darbe genişliği, iki puls (darbe) arası süre, ortalama servo gerilimi, darbe akımı, enjeksiyon basıncı, tel gerilimi, gerilim
- Performans ölçütleri: Kesme hızı, yüzey pürüzlülüğü, telin kırılması veya kopması

Darbe genişliği

Tel erezyon yöntemi ile kesme prosesi, kesme esnasındaki darbe süreci ile başlamaktadır. Bu süreç esnasında, elektrotlar boyunca gerilim uygulanarak akım oluşturulur ve kesme işlemi gerçekleştirilir. Darbe genişliği ayar süresi tel erezyon makinalarında genellikle, 0,2-0,3 inch mesafe için ortalama 0,2 μ s olarak kullanılmaktadır. Tek darbe akış enerjisi arttığı için yüksek kesme hızlarında darbe süresinin artmasına neden olmaktadır. Böylelikle, geniş ve derin kraterler oluşturularak daha düzgün yüzeylerin elde edilmesi sağlanabilmektedir. Ayrıca, darbe genişliğinin arttırılması tel elektrotun kopmasına sebep olmaktadır [152].

İki darbe arası süre

Tek darbe genişliği esnasında kesme işlemi gerçekleştiğinden dolayı, iki darbe süresi arasında dielektriğin yeniden iyonize edilmesi gerekmektedir. Bu döngünün gerçekleşmesi esnasında, gerilim uygulanmamaktadır. İki darbe arasındaki süre genellikle 1,6-25 μ s olarak kullanılmaktadır. İki darbe arasındaki sürenin azaltılması ile ark oluşturulabilme eğilimi artar. Bunun sebebi ise verilen süre esnasında gerçekleşen enerji boşaltım sayısının artmasıdır. Sonuç olarak, kesme hızı da artmaktadır. İki darbe arasındaki sürenin çok kısa olması durumunda, bu durum elektrot telin kopmasına ve yüzey pürüzlülüğünün artmasına sebep olmaktadır [152].

Ortalama servo gerilimi

Tel elektrot ile iş parçası arasındaki boşluk, ortalama servo gerilimi ile belirlenmektedir. Yüksek gerilimin kullanılması, bu boşluğun boyutunun artmasına sebep olmaktadır. Mevcut gerilim aralığı ise tel erezyon kesim işleminde 1-200V olarak kullanılmaktadır. Hassas kesim işleminin gerçekleştirilebilmesi için bu parametrenin dikkate alınması gerekmektedir [152].

Darbe akımı

Darbe akımı, tel erezyon kesim işleminde önemli parametreler arasındadır. Darbe akımı, genel olarak 2-33 amper aralığında kullanılmaktadır. Deşarj akımının arttırılması durumunda, kesme hızı ve yüzey pürüzlülüğü artmaktadır [152].

Enjeksiyon basıncı

Enjeksiyon basıncı, dielektriğin akışkan giriş basıncını ifade etmektedir. Genellikle, bu basınç değeri 0-20 bar aralığında kullanılmaktadır. Dielektrik akışkan, iş parçası malzemesinin soğuk bölgesi içerisine gönderilerek aşındırılmış malzemenin çıkartılmasını sağlamaktadır. İyondan arındırılmış giriş su basıncı, malzemenin kalınlığına göre belirlenmektedir [152].

Tel gerilimi

Tel erezyon kesim işleminde, üst ve alt makaralar arasında telin ne kadar gerileceğinin belirlenmesi gerekmektedir. Eşdeğer yük gerilimi altında kesintisiz olarak beslenen ve telin düzgün bir şekilde tutulmasına yardımcı olmaktadır. İş parçası malzeme kalınlığının artması ile tel geriliminin de arttırılması gerekmektedir. Tel geriliminin iyi ayarlanamaması tel elektrotun kopmasına sebep olmaktadır. Tel gerilimi genel olarak 3-20 daN aralığında kullanılmaktadır [152].

Tel ilerlemesi

Tel elektrot, teli klavuzlayan makara yardımıyla gerçekleşen hareket oranıdır. Kıvılcımın oluşması için sürekli beslenir. Tel ilerlemesi veya besleme hızının birimi genel olarak m/dak kullanılmaktadır. Tel ilerleme hızının maksimum seviyede kullanılabilmesi imalat verimliliği açısından istenen bir durumdur. Ancak, telin kırılma olasılığı dikkate alınarak tel ilerleme hızının belirlenmesi gerekmektedir [152].

Kesme hızı

Tel erezyon kesme işleminde, verimliliğin arttırılabilmesi için yüksek kesme hızlarının kullanılması arzulanmaktadır. Malzeme üzerinde yapılan kesme işlemi, talaş kaldırma oranının belirlenmesinde rol oynar. Genellikle, 50 mm kalınlığında D2 takım çeliği için kesme hızı 300 mm²/dak, 150 mm kalınlığında alüminyum için 750 mm²/dak [154] olarak belirlenirken, yüzey pürüzlülüğü ise 0,04-0,25 µm aralığında olduğu gözlenmektedir. Kıvılcımın olduğu gölge içerisinde, dielektrik akışkan sıvı olarak hidrokarbon yağ yerine

deiyonize edilmiş su kullanılmaktadır. Bu durum, yüksek soğutma hızı ve düşük viskozitenin oluşması açısından istenen bir durumdur.

Yüzey pürüzlülüğü

Yüzey pürüzlülüğü, imalat performansını belirleyen parametreler arasındadır. İşlenmiş yüzeyin dokusunu ifade etmektedir. Pürüzlülük, ideal formdaki yüzey formu üzerinde oluşan sapmalardan dolayı meydana gelmektedir. Bu sapmalar, çok büyükse yüzeyin pürüzlü veya kaba olduğu kabul edilir, aksi takdirde yüzey hassas olarak kabul edilebilmektedir [155].

5.3. Motor Verimliliği Ölçümünde Test Düzeneginin Hazırlanması

Elektrikli asenkron motorlarının verimliliğinin belirlenmesi için gereken test düzeneği, TS EN 60034-2-1-1A (IEC 60034-2-1-1A) ve TS EN 60034-2-1-1B (IEC 60034-2-1-1B) standartları dikkate alınarak hazırlanmıştır. Bu standartlar sırasıyla, doğrudan ve kayıpların toplanması ile ölçüm metodu olarak adlandırılmaktadır.

5.3.1. Doğrudan ölçme metodu ile verimliliğin belirlenmesi (TS EN 60034-2-1-1A)

Bu test metodu, şaft torku ve hızı ölçülerek motorun mekanik gücünün ($P_{mekanik}$) ölçüldüğü yöntemdir. Statora ait elektriksel güç ($P_{elektrik}$) ise aynı testler esnasında ölçülebilmektedir.

Giriş (P_1) ve çıkış gücü (P_2);

$$\text{Motor çalışma esnasında:} \quad P_1 = P_{elektrik} ; P_2 = P_{mekanik} \quad (\text{kW}) \quad (5.1)$$

$$\text{Dinamometre çalışma esnasında ;} \quad P_1 = P_{mekanik} ; P_2 = P_{elektrik} \quad (\text{kW}) \quad (5.2)$$

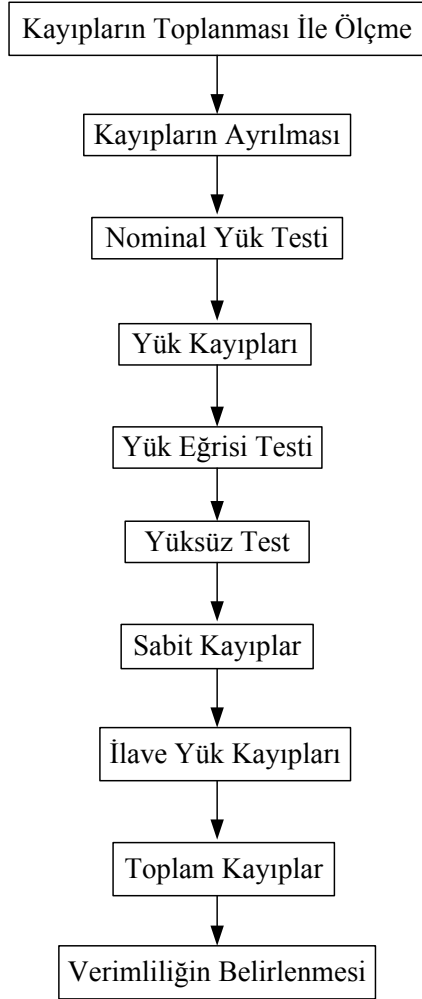
$$P_{mekanik} = 2\pi \times T \times n \quad (\text{kW}) \quad (5.3)$$

Eş. 5.3'te, T: Tork (Nm), n (dev/dak) ise devir sayısını ifade etmektedir. Böylelikle, mekanik ve elektrik gücüne bağlı olarak motor verimliliği;

$$\eta (\%) = (P_2) / (P_1) \quad \text{olarak hesaplanmaktadır.} \quad (5.4)$$

5.3.2. Kayıpların toplanması ile verimliliğin belirlenmesi (TS EN 60034-2-1-1B)

Bu test yöntemi ile elektrik motorunun verimliliği, birbirinden farklı kayıpların ayrı ayrı toplanması ile belirlenmektedir. Elektrik motorlarında oluşan kayıplar demir, sürtünme ve rüzgâr, stator-rotor bakır ve ilave yük kayıpları olarak ifade edilmektedir.



Şekil 5.9. Kayıpların toplanması yöntemine ait işlem basamakları [156].

Nominal yük testi

Bu yük testi yapılmadan önce, oda sıcaklığında motorun sargı direnci ve sıcaklığının ölçülmesi gerekmektedir. Nominal çıkış gücüne sahip dinamometre yardımıyla motor yüklenir ve ısıl rejime ulaşmaya kadar çalıştırılır. Motorun çalıştırılması esnasında, yarım saatlik zaman diliminde 1 Kelvin veya daha az ısı değişimi oluyor ise ısıl rejime ulaşmış

olarak kabul edilmektedir. Isıl rejimin belirlenmesinde, giriş gücü, tork, akım, gerilim, devir sayısı, frekans ve sargı sıcaklığı dikkate alınarak belirlenmektedir. Dinamometre toleranslarının kontrol edilebilmesi için yük altında kayma testi yapılmıştır. Sapma değeri tolerans değerlerinin dışında ise, ölçümler tekrarlanarak yükleme ünitesinden alınan değerlerin doğruluğu test edilmektedir.

Yük kayıpları

Stator sargı kayıpları ve sıcaklığın doğrulanması

Nominal yükte düzeltilmemiş stator sargı kayıpları Eş. 5.5'e göre belirlenmektedir. Bu eşitlikte, I akım şiddetini (A), R ise direnç değerini (ohm) ifade etmektedir.

$$P_s = 1,5 \times I^2 \times R \quad (\text{kW}) \quad (5.5)$$

25 °C soğutma sıvısı sıcaklığı referans alındığında, nominal yükte stator sargı direncine göre (R_N) stator sargı kayıpları Eş. 5.6'ya göre belirlenmektedir. Burada k_θ , stator sargısı için düzeltme faktörü olarak ifade edilmektedir.

$$P_{s,\theta} = P_s \times k_\theta \quad (\text{kW}) \quad (5.6)$$

Rotor sargı kayıpları ve sıcaklığın doğrulanması

Düzeltilmemiş rotor sargı kayıpları Eş. 5.7'ye göre belirlenmektedir. Burada, P_1 giriş gücünü (kW), P_s , stator sargı kayıplarını (kW), P_{fe} demir kayıplarını (kW) ve s ise kayma miktarını ifade etmektedir. Kayma miktarı ise Eş. 5.8'e göre belirlenmektedir. Burada, p , kutup sayısını, n , devir sayısını (dev/dak), f ise frekans (Hz) değerini ifade etmektedir.

$$P_r = (P_1 - P_s - P_{fe}) \times s \quad (\text{kW}) \quad (5.7)$$

$$s = 1 - \frac{p \times n}{f} \quad (\%) \quad (5.8)$$

Stator sargı kayıplarının düzeltilmiş değeri kullanılarak, rotor kayıpları Eş. 5.9'a göre belirlenmektedir. Burada, s_{θ} ve P_{fe} sırasıyla 25 °C' de soğutma sıvısı sıcaklığında oluşan kayma miktarını ($s_{\theta} = s \times k_{\theta}$) ve demir kayıplarını ifade etmektedir.

$$P_{r,\theta} = (P_1 - P_{s,\theta} - P_{fe}) \times s_{\theta} \quad (5.9)$$

Sıcaklık değeri doğrulanmış motor için giriş gücü

Düzeltilmiş stator ve rotor sargı kayıpları dikkate alınarak düzeltilmiş giriş gücü, Eş. 5.10' a göre belirlenmektedir.

$$P_{1,\theta} = P_1 - (P_s - P_{s,\theta} + P_r - P_{r,\theta}) \quad (\text{kW}) \quad (5.10)$$

Yük eğrisi testi

Motorun normal çalışma ortamında performansının değerlendirilebilmesi için yapılan testtir. Değerlendirme, motor anma gücünün %25-50-75-100 ve 125'i olmak üzere altı farklı yükleme ile yapılmaktadır. Bu yük oranlarında test yapılırken, kullanılan frekans değeri % 0,1' den daha az olmalıdır. Yük eğrisi testinin yapılması esnasında stator ve rotor sargı kayıpları, Eş. 5.5-5.6 ve 5.7'ye göre belirlenmektedir.

Yüksüz testler

Yük eğrisi testi yapıldıktan sonra motor ısı rejime ulaştığında yapılması gereken testtir. Demir, sürtünme ve rüzgâr kayıplarının belirlenmesinde önemli bir etkindir. Bu amaçla, demir kayıplarının belirlenmesi için motor üzerinde, nominal gerilimin % 90-95-100-110' u, sürtünme ve rüzgar kayıplarının belirlenmesi için % 30-40-50 ve 60' ı uygulanmaktadır.

Sabit kayıplar

Motorun yüksüz durumdaki giriş gücünden (P_0) sarım kayıpları (P_s) çıkarılarak sabit kayıplar hesaplanır. Bu sabit kayıplar, dolayısı ile demir (P_{fe}), sürtünme ve rüzgâr (P_{fw}) kayıplarının toplamını ifade etmektedir (Eş. 5.11 ve Eş. 5.12). Burada, R_{II} , her bir gerilim noktasındaki sargı direncini ifade etmektedir.

$$P_c = P_0 - P_s = P_{fw} + P_{fe} \quad (\text{kW}) \quad (5.11)$$

$$P_s = 1,5 \times I^2 \times R_{II} \quad (\text{kW}) \quad (5.12)$$

Sürtünme ve rüzgâr kayıpları

Gerilimin karesine göre (U_0^2), sabit kayıplara ait eğrinin geliştirilebilmesi için yaklaşık olarak gerilim değerinin % 30-60'ı arasında dört veya daha fazla noktadan motorun yüksüz haldeki kayıp ölçümleri yapılmaktadır. Sıfır gerilimde düz bir çizgi şeklinde oluşmaktadır. Senkronize hızlarda, sıfır gerilim değerinde yaklaşık olarak sürtünme ve rüzgâr kayıplarının kesiştiği düşünülmektedir.

Demir kayıpları

Nominal gerilim değerinin yaklaşık %90-110'u arasındaki değerlerde uygulanan ilk gerilime (U_0) karşı demir kayıplarını ($P_{fe} = P_c - P_{fw}$) belirten bir eğri geliştirilebilmektedir. Tam yükte demir kayıplarının belirlenmesi için birilcil sargıdaki gerilim direncinin azalması dikkate alınarak iç gerilim değeri (U_i) motor için Eş. 5.13' e göre, dinamometre için Eş. 5.14'e göre hesaplanmaktadır.

$$U_i = \sqrt{\left(U - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I \cdot R \cdot \cos \varphi\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I \cdot R \cdot \sin \varphi\right)^2} \quad (\text{Volt}) \quad (5.13)$$

$$U_i = \sqrt{\left(U + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I \cdot R \cdot \cos \varphi\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I \cdot R \cdot \sin \varphi\right)^2} \quad (\text{Volt}) \quad (5.14)$$

$$\cos \varphi = \frac{P_1}{\sqrt{3} \cdot U \cdot I} \quad (5.15)$$

$$\sin \varphi = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi} \quad (5.16)$$

İlave yük kayıpları

Artık kayıplar

Artık kayıplar (P_{Lr}), her bir yükleme noktası için çıkış gücü (P_2), stator sargı (P_s), demir (P_{fe}), rotor sargı (P_r), sürtünme ve rüzgâr kayıpları (P_{fw}), giriş gücünden (P_1) çıkarılarak belirlenmektedir (Eş. 5.17 ve Eş. 5.18).

$$P_{Lr} = P_1 - P_2 - P_s - P_r - P_{fe} - P_{fw} \quad (\text{kW}) \quad (5.17)$$

$$P_{fw} = P_{fw0} \cdot (1-s)^{2,5} \quad (\text{kW}) \quad (5.18)$$

Artık kayıplar, Eş. 5.19'a göre yükleme torkunun karesinin bir fonksiyonu olarak lineer regresyon analizi ile belirlenebilmektedir. Burada A ve B, altı adet yük noktasına göre belirlenen sabitleri ifade etmektedir (Eş. 5.20-5.21). Eş. 5.21'de i ise toplam yük sayısıdır.

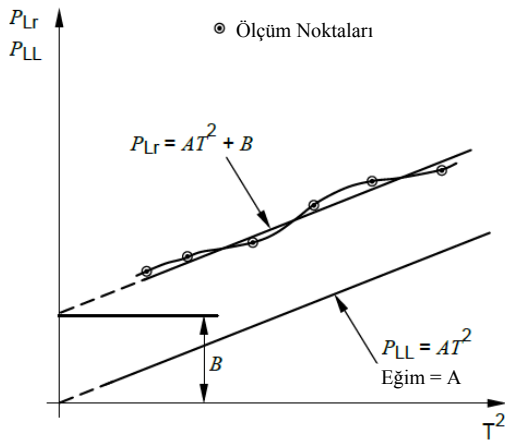
$$P_{Lr} = A \times T^2 + B \quad (\text{kW}) \quad (5.19)$$

$$A = \frac{i \cdot \sum(P_{Lr} \cdot T^2) - \sum P_{Lr} \cdot \sum T^2}{i \cdot \sum(T^2)^2 - (\sum T^2)^2} \quad (5.20)$$

$$B = \frac{\sum P_{Lr}}{i} - A \cdot \frac{\sum T^2}{i} \quad (5.21)$$

Nominal tork değerinde B kesişim noktası, ilave yük kayıplarından (P_{LL}) % 50 daha düşük olmalıdır. Aksi takdirde, ölçüm sonuçları hatalı olur ve bu durumda sonuçlar, tekrar kontrol edilmelidir (Şekil 5.13). A' nın eğimi sabit olduğunda, her bir yük noktası için ilave yük kayıpları Eş. 5.22'ye göre hesaplanmaktadır.

$$P_{LL} = A \times T^2 \quad (\text{kW}) \quad (5.22)$$



Şekil 5.10. Artık kayıpların belirlenmesi [156].

Korelasyon katsayısı ise Eş. 5.23'e göre hesaplanmaktadır.

$$\gamma = \frac{i \times \sum (P_{Lr} \times T^2) - (\sum P_{Lr}) \times (\sum T^2)}{\sqrt{(i \times \sum (T^2)^2 - (\sum T^2)^2) \times (i \times \sum P_{Lr}^2 - (\sum P_{Lr})^2)}} \quad (5.23)$$

Eş. 5.23'te, korelasyon katsayısı (γ), 0,95' ten az ise en kötü sonuç çıkartılarak regresyon tekrarlanmaktadır. İkinci regresyon sonucunda 0,95'e artış gözleniyorsa bu veriler kullanılabilir. Aksi takdirde, test sonuçları tatmin edici değildir ve testlerin tekrarlanması gerekmektedir. Yeterli test verisi olması durumunda katsayı 0,98 ise test sonuçlarının iyi olduğu kabul edilmektedir.

Toplam kayıplar

Toplam kayıplar, düzeltilmiş demir, sürtünme ve rüzgâr kayıplarının yanı sıra yük ve ilave yük kayıplarının toplanması ile hesaplanmaktadır (Eş. 5.24). Sürtünme ve rüzgâr kayıpları ise Eş. 5.25'e göre belirlenmektedir.

$$P_T = P_{fe} + P_{fw} + P_{s0} + P_{r0} + P_{LL} \quad (\text{kW}) \quad (5.24)$$

$$P_{fw} = P_{fw0} \cdot (1 - S_0)^{2,5} \quad (\text{kW}) \quad (5.25)$$

Verimliliğin belirlenmesi

Kayıpların toplanması yöntemine göre asenkron elektrik motorunun verimliliği Eş. 5.26'ya göre hesaplanmaktadır.

$$\eta (\%) = \frac{P_{1,\theta} - P_T}{P_{1,\theta}} = \frac{P_2}{P_2 + P_T} \quad (5.26)$$

Eş. 5.26'da, $P_{1,\theta}$, nominal yük testinde doğrulanmış giriş gücünü, P_2 ise çıkış gücünü ifade etmektedir [156].

6. YAPAY SINİR AĞLARI

Yapay sinir ağları (YSA), genel olarak bazı gözlemlere dayanan bilinmeyen bir fonksiyonun tahmin edilebilmesi esasına dayanmaktadır. Ancak, bu yapay sinir ağlarının sezgisel bir teknik olduğu anlamına gelmemektedir. Zengin kuramlara sahip olmasının yanı sıra matematiksel ilkelere dayanmaktadır [157]. YSA, insan beyninden esinlenerek geliştirilmiş, ağırlıklı bağlantılar aracılığıyla birbirine bağlanan ve her biri kendi belleğine sahip işlem elemanından oluşan paralel ve dağıtılmış bilgi işleme yapılarıdır. YSA, bir başka ifade ile biyolojik sinir ağlarını taklit eden bilgisayar programlarıdır. YSA, zaman zaman bağlantılılık, paralel dağıtılmış işlem, sinirsel işlem, doğal zekâ sistemleri ve makine öğrenme algoritmaları gibi isimlerle anılmaktadır. Bir programcının geleneksel yeteneklerini gerektirmeyen, kendi kendine öğrenme düzenekleridir. Bu ağlar öğrenmenin yanı sıra, ezberleme ve bilgiler arasında ilişkiler oluşturma yeteneğine sahiptir. YSA, insan beyninin bazı organizasyon ilkelerine benzeyen özellikleri kullanılmaktadır. Bilgi işleme sistemlerinin yeni neslini temsil etmektedir. Genel olarak model seçimi ve sınıflandırılması, işlev tahmini, en uygun değeri bulma ve veri sınıflandırılması gibi işlemlerde başarılıdır. Geleneksel bilgisayarlar ise özellikle model seçme işinde verimsizdir ve sadece algoritmaya dayalı hesaplama işlemleri ile kesin aritmetik işlemlerde hızlıdır. Birçok yapay sinir ağ tipi bulunmakla birlikte bazılarının kullanımı diğerlerinden daha yaygındır. En çok kullanılan yapay sinir ağı, geri yayımlı yapay sinir ağı olarak bilinir. Bu tip yapay sinir ağı, tahmin ve sınıflandırma işlemlerinde çok iyi sonuçlar vermektedir [158].

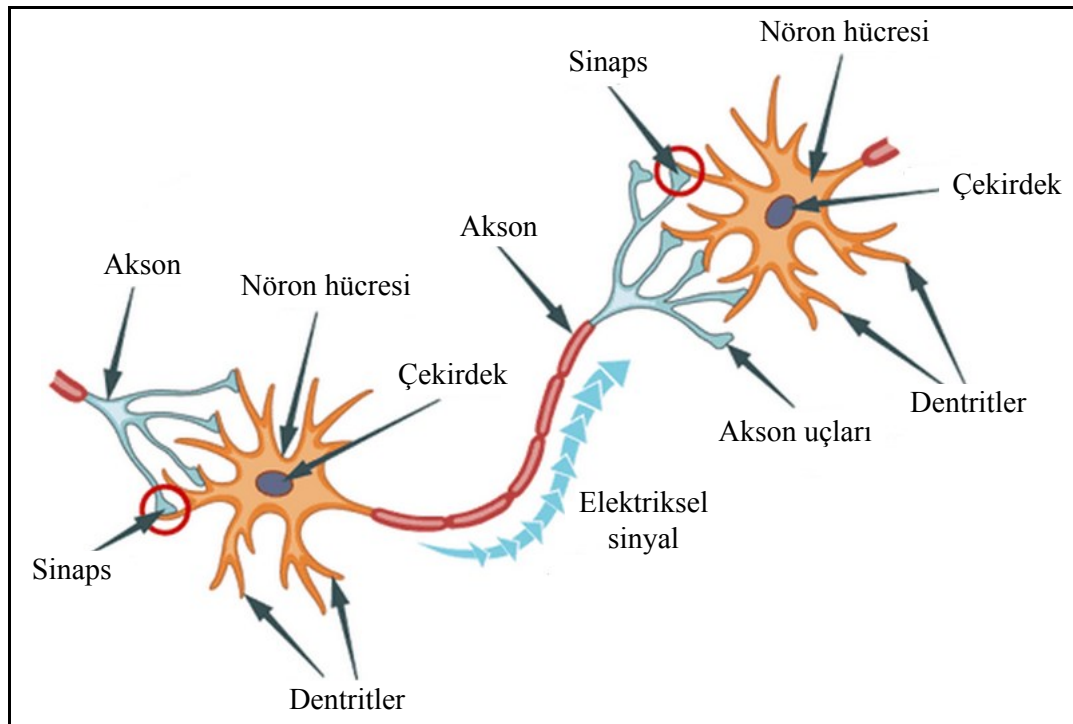
6.1. Biyolojik Sinir Sisteminin Yapısı

Biyolojik sinir sistemi, alınan verilerin yorumlanarak karar verilmesi işleminin gerçekleştirildiği ve üç aşamadan oluşan bir yapıdır. Alıcı sinirler tarafından alınan uyarılar, beyne bilgi ileten elektriksel sinyallere dönüştürmektedir. Elektriksel sinyallere göre belirlenen tepki sinirleri ile beyin ürettiği elektriksel sinyalleri bu uyarılara cevap verebileceği bir şekilde uygun tepkilere dönüştürmektedir. Beynin oluşturduğu çıktılar ise, alıcı ve tepki sinirleri arasında ileri ve geri besleme yöntemi ile belirli tepkilere dönüştürülmektedir. Bu yönüyle biyolojik sinir sistemi, kapalı bir döngü sisteminin özelliklerini taşımaktadır (Şekil 6.1).



Şekil 6.1. Biyolojik sinir sistemine ait blok diyagram

İnsan sinir hücresi ise, hücre çekirdeği ve bu çekirdeğe bağlı dendritler ile bu çekirdekten çıkan sinyalleri ileten aksonlardan oluşmaktadır (Şekil 6.2). Biyolojik sinir sistemine ait blok diyagramı da dikkate alındığında, bilgiler dendritler aracılığı ile diğer hücrelerden hücre çekirdeğine aktarılmaktadır. Hücreler içerisinde oluşan çıktılar aksonlar yardımı ile diğer bir hücreye aktarılmaktadır. Aktarımı gerçekleştiren aksonlar ise, ince yollara ayrılarak diğer hücrelerin dendritlerini meydana getirmektedir. Bunlara ek olarak akson-dendrit bağlantı bölgesi sinaps olarak adlandırılmaktadır.



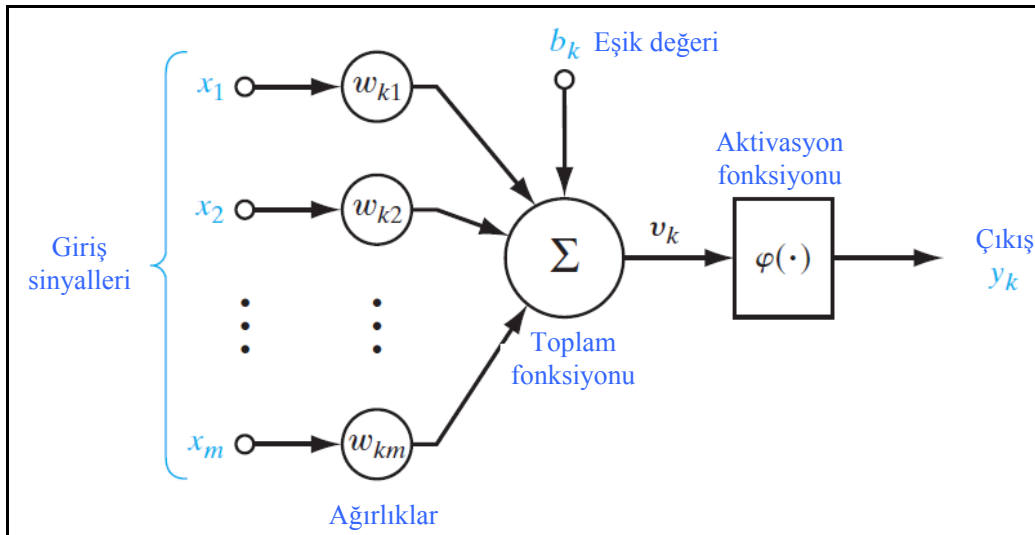
Şekil 6.2. İnsana ait sinir hücre yapısı [159].

Sinapsa gelen ve dendritler tarafından alınan bilgiler genel olarak elektriksel sinyallerden oluşmaktadır. Bu sinyaller ise sinaps üzerindeki kimyasal ileticilerden etkilenmektedir. Sabit bir süre zarfında bir hücreye aktarılan girişlerin değeri, belirli bir eşik değerine ulaştığında hücre, buna karşı bir tepki oluşturmaktadır. Burada, uyarıcılar hücrenin

tepkisini artırıcı giriş parametresi, önleyici giriş parametresi ise azaltıcı yöndeki giriş parametresi olarak adlandırılmaktadır. Böylelikle, elektriksel sinyaller vasıtası ile hücreler arasında uyarı-tepki etkisiyle bilgi alış verişi gerçekleşmektedir [160].

6.2. Yapay Sinir Ağı Hücresi

İnsan sinir hücresi dikkate alınarak oluşturulan matematiksel modeller yapay sinir hücresi olarak adlandırılmaktadır. Sinir hücre yapısında bulunan girişler, öncelikle belirli bir ağırlık değerleri ile çarpılarak toplanmaktadır. Toplanan bu değerler, belli bir eşik değerini aştığı anda hücre bir etki oluşturur. Oluşan bu tepki, yapay sinir hücresinin temel mantığını göstermektedir. Yapay sinir hücresi, giriş verilerini toplanması ile eşik fonksiyonuna göre bir değer üreten yapıdır. Şekil 6.3'te lineer olmayan yapay sinir ağının yapısı gösterilmiştir. Yapay sinir ağı hücresinde temel olarak dış ortamdan ya da diğer nöronlardan alınan veriler, ağırlıklar, toplama fonksiyonu, aktivasyon fonksiyonu ve çıkışlar bulunmaktadır. Dış ortamdan alınan veri ağırlıklar aracılığıyla nörona bağlanır ve bu ağırlıklar ilgili girişim etkisini belirler. Toplam fonksiyonu ise net girişi hesaplar, net giriş, bu girişlerle ilgili ağırlıkların çarpımının bir sonucudur. Aktivasyon fonksiyonu işlem süresince net çıkışını hesaplar ve bu işlem aynı zamanda nöron çıkışını verir. Genelde aktivasyon fonksiyonu doğrusal olmayan (nonlinear) bir fonksiyondur [160].



Şekil 6.3. Lineer olmayan yapay sinir ağ yapısı [160].

Şekil 6.3'te b_k , sabit bir sayı olmak kaydıyla aktivasyon fonksiyonunun eşik değerini, $x_1, x_2, \dots, x_m$, giriş sinyallerine ait matrisi, $w_{k1}, w_{k2}, \dots, w_{km}$, ağırlıklar matrisini, $\varphi(\cdot)$, aktivasyon

fonksiyonunu, y_k ise çıkış hücrelerini ifade etmektedir. Buna göre, Eş. 6.1-6.2-6.3. ve 6.4'te verilen denklemler kullanılarak sinir ağırları ile ilgili hesaplamalar yapılabilmektedir.

$$u_k = \sum_{j=1}^m w_{kj} x_j \quad (6.1)$$

$$y_k = \varphi(u_k + b_k) \quad (6.2)$$

$$v_k = u_k + b_k \quad (6.3)$$

$$v_k = \sum_{j=0}^m w_{kj} x_j \quad (6.4)$$

Eş. 6.1'de u_k , giriş sinyallerinden kaynaklanan doğrusal bağlantılı çıktıyı, Eş. 6.2'de v_k , ise giriş sinyalleri, ağırlıklar ve eşik değerinin sonucu olarak aktivasyon fonksiyonu ile etkileşime girecek hücreyi ifade etmektedir. v_k ise Eş. 6.3 ve 6.4'e göre hesaplanmaktadır [160].

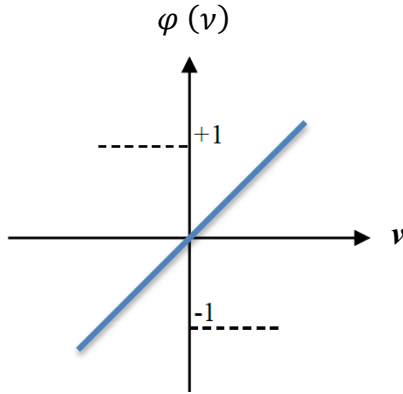
6.2.1. Aktivasyon fonksiyonları

Aktivasyon fonksiyonu, hücreye gelen net girdiyi işleyerek hücrenin bu girdiye göre üreteceği veya hesaplayacağı çıktıyı belirleyen önemli bir faktördür. Çıktının belirlenmesinde, hücrenin gerçekleştireceği işlemlere göre farklı türlerde aktivasyon fonksiyonları kullanılmaktadır. Bir ağda kullanılan, aktivasyon fonksiyonları aynı olabileceği gibi birbirinden farklı olarak ta kullanılabilmektedir.

Doğrusal aktivasyon fonksiyonu

Bu aktivasyon fonksiyonunda, toplayıcıdan aktarılan veriler a gibi sabit bir katsayı ile çarpılmaktadır. Bu sabit katsayı, eğer 1 ise fonksiyon çıkışı giriş değerine eşit olmaktadır. $-\infty$ ile $+\infty$ arasında değer almaktadır. Adaline aktivasyon fonksiyonu olarak bilinmektedir. İşaret işleme ve regresyon analizlerinin yapılmasında sıklıkla kullanılmaktadır [161]. Doğrusal aktivasyon fonksiyonu, Eş. 6.5'e göre belirlenmektedir.

$$\varphi(v) = av \quad (6.5)$$



Şekil 6.4. Doğrusal aktivasyon fonksiyonunun grafiği

Eşik fonksiyonu

Eşik fonksiyonu, genel olarak sınıflandırma ihtiyacının duyulduğu ağlarda tercih edilmektedir. Fonksiyon, v 'ye bağlı olarak değiştiğinden dolayı $\varphi(v)$ şeklinde gösterilmektedir. Bu fonksiyon için farklı iki durum Eş. 6.6'ya göre ifade edilmektedir.

$$\varphi(v) = \begin{cases} 1 & \text{eğer } v \geq 0 \\ 0 & \text{eğer } v < 0 \end{cases} \quad (6.6)$$

Buna göre, k 'nin nöron çıkışına göre eşik fonksiyonu Eş. 6.7'ye göre ifade edilmektedir.

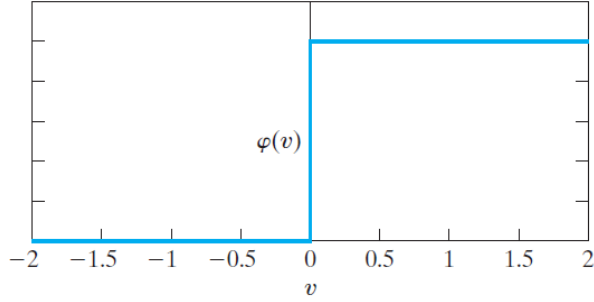
$$y_k = \begin{cases} 1 & \text{eğer } v_k \geq 0 \\ 0 & \text{eğer } v_k < 0 \end{cases} \quad (6.7)$$

Eş. 6.6'da v_k , nöronun uyarılmış bölgesel alanını belirtmektedir. v_k ise Eş. 6.8'e göre hesaplanmaktadır.

$$v_k = \sum_{j=1}^m w_{kj}x_j + b_k \quad (6.8)$$

Eşik aktivasyon fonksiyonu, McCulloch–Pitts modeli olarak bilinmektedir. Nöron çıkışı, negatif olmayan bölgesel bir alanda bulunuyorsa, 1 değerini almaktadır. Aksi takdirde 0

değerini almaktadır. Şekil 6.5'te eşik aktivasyon fonksiyonunun grafiği gösterilmiştir [160].



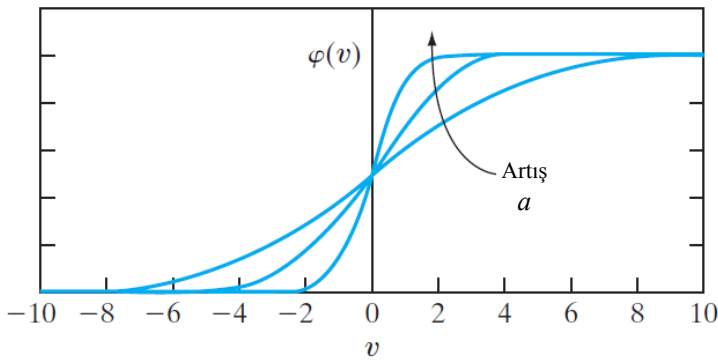
Şekil 6.5. Eşik aktivasyon fonksiyonunun grafiği

Sigmoid fonksiyonu

Sinir ağlarının oluşturulmasında yaygınlıkla kullanılmaktadır. “S” şeklinde grafik yapısına sahiptir. Grafik üzerinde, doğrusal ve doğrusal olmayan alanlarda dengeli davranış sergileyerek artan bir eğilim göstermektedir. Buna göre, sigmoid aktivasyon fonksiyonu Eş. 6.9’a göre ifade edilmektedir.

$$\varphi(v) = \frac{1}{1 + \exp(-av)} \quad (6.9)$$

Eş. 6.9’da a , sigmoid aktivasyon fonksiyonun eğim parametresini ifade etmektedir. Bu değer değiştirilmesiyile farklı eğime sahip sigmoid fonksiyonları elde edilebilmektedir (Şekil 6.6), [162].



Şekil 6.6. Sigmoid aktivasyon fonksiyonunun grafiği

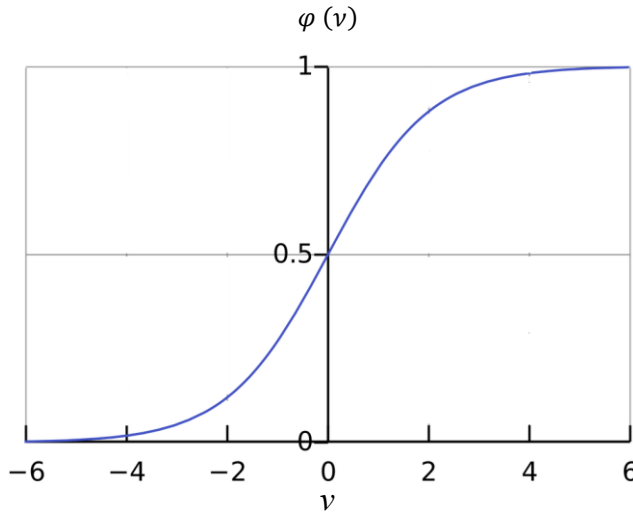
Hiperbolik Tanjant Aktivasyon Fonksiyonu

Sürekli ve doğrusal olmayan bir fonksiyon olması nedeniyle doğrusal olmayan problemlerin çözümünde kullanılan aktivasyon fonksiyonudur. Bu aktivasyon fonksiyonunda giriş olarak $-\infty$ ile $+\infty$ arasında herhangi bir değer alır ve çıkış değeri -1 ile +1 arasındadır (Eş. 6.11). Bazı çalışmalarda, çift kutuplu aktivasyon fonksiyonu olarak adlandırılır. Çıkış değeri ise Eş. 6.10'da verilen matematiksel formüle göre hesaplanmaktadır. Aktivasyon fonksiyonu ise Eş. 6.11 ve 6.12'ye göre belirlenmektedir. Hiperbolik tanjant aktivasyon fonksiyonuna ait grafik ise Şekil 6.7'de gösterilmiştir [163].

$$y_k = \frac{e^v - e^{-v}}{e^v + e^{-v}} \quad (6.10)$$

$$\varphi(v) = \begin{cases} 1 & \text{eğer } v > 0 \\ 0 & \text{eğer } v = 0 \\ -1 & \text{eğer } v < 0 \end{cases} \quad (6.11)$$

$$\varphi(v) = \tanh(v) \quad (6.12)$$

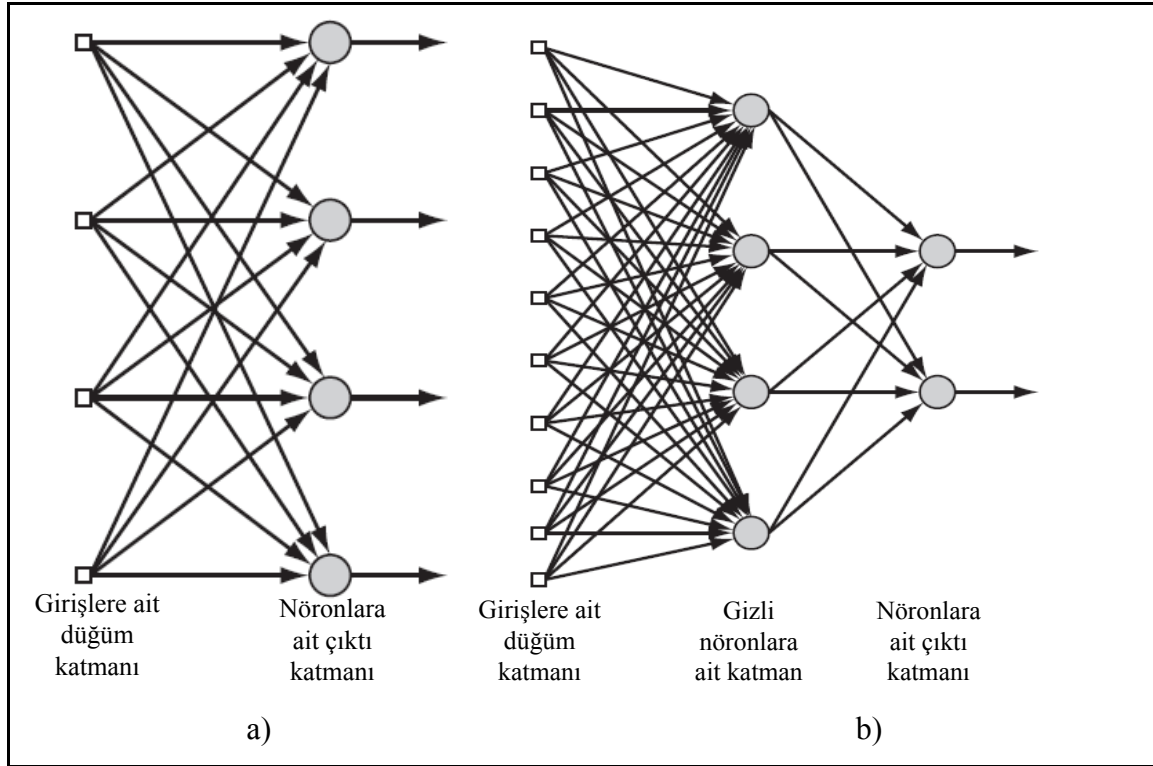


Şekil 6.7. Hiperbolik tanjant aktivasyon fonksiyonunun grafiği

6.3. Yapay Sinir Ağlarının Sınıflandırılması

6.3.1. Tek katmanlı ileri beslemeli ağlar

Katmanlı bir sinir ağı olarak, nöronlar tabakalar şeklinde düzenlenmektedir. Katmanlı ağ yapılarının en basit formuna sahip olan bu ağ yapısında, giriş düğüm noktaları çıkışta bulunan nöronlara doğrudan bağlanmaktadır. Başka bir ifade ile bu ağ yapısı, ileri beslemeli ağ yapısına sahiptir. Girişlere ait düğüm katmanında hesaplama işlemi yapılmadığı için bu bölüm katman olarak kabul edilmez (Şekil 6.8-a).



Şekil 6.8. a) Tek katmanlı ileri beslemeli ağ yapısı, b) Çok katmanlı ileri beslemeli ağ yapısı [160].

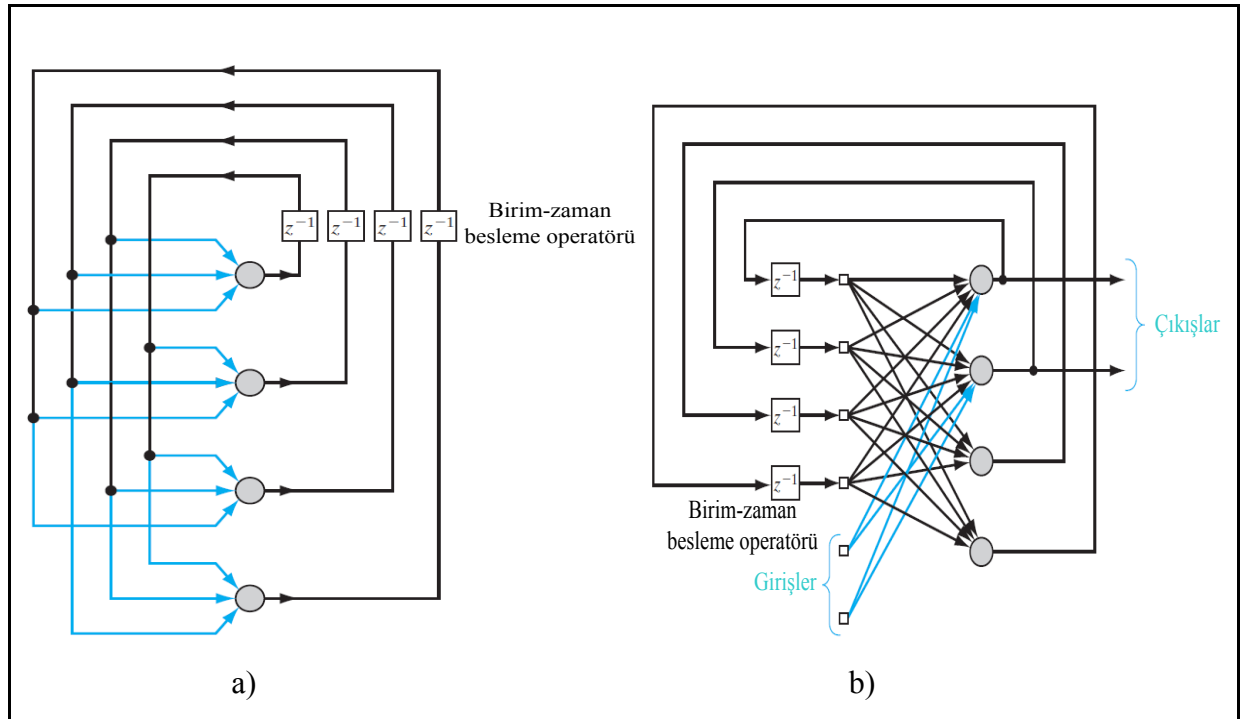
6.3.2. Çok katmanlı ileri beslemeli ağlar

Çok katmanlı ileri beslemeli ağ yapısı, bir veya daha fazla gizli katmana sahip olmasından dolayı diğerlerinden ayrılmaktadır. Gizli katmanda bulunan nöronlar, ağ yapısındaki giriş ve çıkış değerleri arasındaki ilişkinin düzenlenmesinde etkin rol oynamaktadır. Ağ yapısına bir veya daha fazla gizli nöron eklenerek ağın etkinliği artırılabilir [164]. Şekil 6.8-b'de tek gizli katmana sahip çok katmanlı ileri beslemeli ağ yapısı gösterilmiştir.

Şekil 6.8-b'deki ağ yapısı 10-4-2 olarak adlandırılmaktadır. Burada, düğüm sayısı 10, gizli nöron sayısı 4, çıktı nöron sayısı 2 olarak belirlenmiştir. Başka bir ifade ile düğüm sayısı m , ilk gizli katmandaki nöron sayısı h_1 , ikinci gizli katmandaki nöron sayısı h_2 , çıkış katmanındaki nöron sayısı q olarak ifade edildiğinde bu ağ yapısı, $m-h_1-h_2-q$ olarak belirlenmektedir.

6.3.3. Tekrarlı sinir ağları

Bu ağ yapısını diğer ileri beslemeli ağlardan ayıran özelliği, en az bir geri besleme döngüsüne sahip olmasıdır. Şekil 6.9-a'da görüldüğü gibi çıkış sinyalleri, her bir nöronun girişine doğru tekrar yönlendiriliyor ise bu ağ yapısı tekrarlı beslemeli ağ olarak adlandırılmaktadır. Şekil 6.9-b'de ise gizli nörona sahip tekrarlı geri beslemeli ağ yapısı gösterilmiştir. Bu ağ yapısındaki geri besleme bağlantıları, çıkış nöronlarının yanı sıra gizli nöronlardan oluşmaktadır. Geri besleme bağlantılarının varlığı, ağ yapısının öğrenme ve performansı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Buna göre, ağın etkinliğinin artırılması için besleme bağlantılarının dikkate alınması gerekmektedir [160].



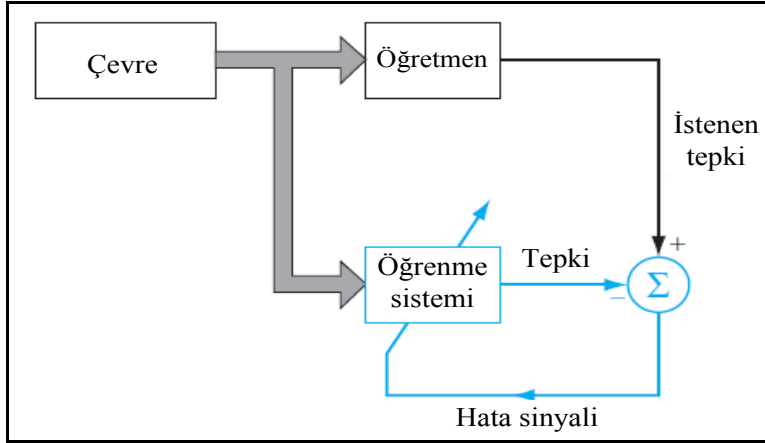
Şekil 6.9. a) Gizli nörona sahip olmayan tekrarlı geri beslemeli ağ yapısı, b) Gizli nörona sahip tekrarlı geri beslemeli ağ yapısı [160].

6.4. Yapay Sinir Ağlarında Öğrenme

Yapay sinir ağlarında bilgi, ağdaki bağlantıların ağırlıklarında depolanır. Bir ağda öğrenme, istenen bir işlevi yerine getirecek şekilde ağırlıkların ayarlanması sürecidir. Yapay sinir ağlarında öğrenme, sinirler arasındaki ağırlıkların değiştirilmesi ile gerçekleşmektedir. Buna göre sinirler arası bağlantılar üzerindeki ağırlıkları belirli bir yöntem ile dinamik olarak değiştirilebilen ağlar eğitilebilir. Öğrenebilen ağlar, yeni şekilleri tanıyabilir ya da verilen bir girişin hangi sınıfa ait olduğuna karar verebilir. Yapay sinir ağlarında öğrenme düğümler arasındaki ağırlıkların, düğümlerdeki etkinlik ya da aktarım işlevlerinin değişkenlerinin ayarlanmasıyla yapılmaktadır. Öğrenme modelleri üç gruba ayrılmaktadırlar. Bunlar danışmanlı, danışmansız ve takviyeli öğrenme modelleri olarak isimlendirilirler.

6.4.1. Danışmanlı öğrenme

Yapay sinir ağlarında gerçek çıkış istenen çıkışla kıyaslanmaktadır. Rasgele değişen ağırlıklar ağ vasıtasıyla öyle ayarlanır ki, bir sonraki döngüde gerçek çıkış ile istenen çıkış arasında daha yakın bir karşılaştırma üretebilir. Öğrenme yöntemi, bütün işleme elemanlarının anlık hatalarını en aza indirmeye çalışır. Bu hata azaltma işlemi, kabul edilebilir doğruya ulaşana kadar ağırlıklar devamlı olarak derlenir. Danışmanlı öğrenmede, giriş ve çıkış çiftlerinden oluşan eğitim bilgileri vardır. Ağ giriş bilgisine göre ürettiği çıkış değerini, istenen değerle karşılaştırarak ağırlıkların değiştirilmesinde kullanılacak bilgiyi elde eder. Girilen değer ile istenen değer arasındaki fark hata değeri olarak önceden belirlenen değerden küçük oluncaya kadar eğitime devam edilir. Hata değeri istenen değer altına düştüğünde tüm ağırlıklar sabitlenerek eğitim işlemi sonlandırılır. Eğitim işlemi sırasında her bir eğitim bilgisi çifti için oluşan hata değerine göre ağırlıkların değiştirilmesine “örüntü kipi” öğrenme, tüm eğitim kümesi için hataların toplanarak toplam hata değerine göre ağırlıkların değiştirilmesine ise “küme kipi” öğrenme denilmektedir [160].

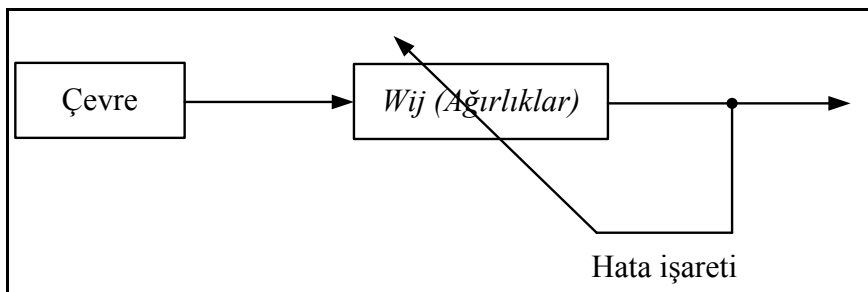


Şekil 6.10. Danışmanlı öğrenme [160].

Danışmanlı öğrenme, Şekil 6.10’da gösterilmiştir. Eğer verilen girişe karşılık amaçlanan çıkış üretileniyorsa, ağıın çıkış değerindeki hatayı en küçük olacak şekilde ağırlıkların değiştirilmesi sağlanır [158].

6.4.2. Danışmansız öğrenme

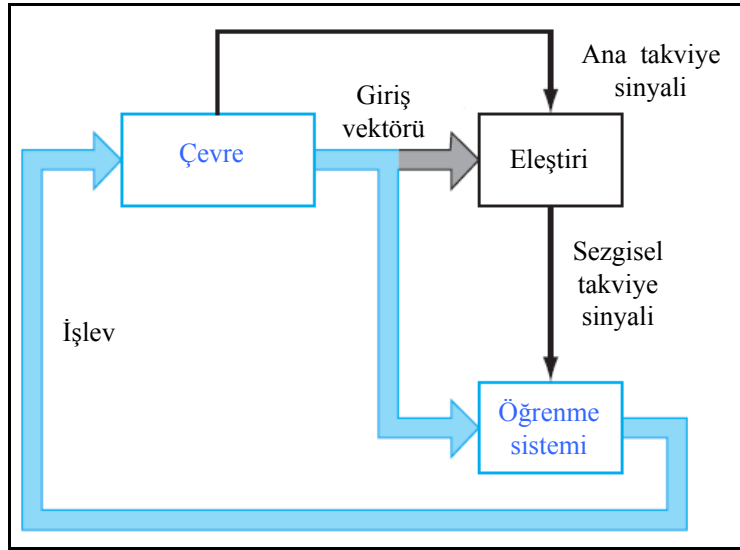
Danışmansız öğrenmede sistemin doğru çıkış hakkında bilgisi yoktur. Girişlere göre kendi kendisini örnekler. Danışmansız eğitilebilen ağlar istenen ya da hedef çıkış olmadan giriş bilgilerinin özelliklerine göre ağırlık değerlerini ayarlamaktadır. Danışmansız öğrenmede ağ, istenen dış veriler ile değil girilen bilgilerle çalışmaktadır. Bu tür öğrenmede, gizli sinirler dışarıdan yardım almaksızın kendilerini örgütlemek için bir yol bulmalıdırlar. Bu yaklaşımda, verilen giriş vektörleri için önceden bilinebilen ve performansı ölçebilecek ağ için hiçbir çıkış örneği sağlanmamaktadır [158].



Şekil 6.11. Danışmansız öğrenme [158].

6.4.3. Takviyeli öğrenme

Takviyeli öğrenmede bilgi, doğrudan elde edilmez, ancak çevre ile sürekli etkileşim yolu ile elde edilmektedir. Danışmanlı öğrenme kuralına benzemektedir. Algoritmaya verilen bir skor ile her ağ girdisi için uygun bir çıktı elde edilir. Skor, girdilerin belirli bir sırasının üzerinde ağı performansının bir ölçüsüdür. Bu tip öğrenme danışmanlı öğrenmeye göre daha az kullanılmaktadır. Sistem kontrol uygulamalarında yaygınlıkla kullanılmaktadır. Takviyeli öğrenme kuralında danışmansız öğrenmede olduğu gibi bir eğitmen mevcuttur. Bu öğretmen, girdilerin hangi çıktıların üretiminde olması gerektiğini belirtmeden yalnızca üretilen çıktının doğru olup olmadığını konusunda ipuçları vermektedir. Çevreden alınan ana takviye sinyali, öğrenme sistemi içerisine daha yüksek kalitede sinyal olarak aktarılması için işlenmektedir. Öğrenme sisteminden çıkan sinyal, çevreye tepki olarak aktarılmaktadır. Bu şekilde döngü devam ederek takviyeli öğrenme işlemi gerçekleşmektedir (Şekil 6.12), [165].



Şekil 6.12. Takviyeli öğrenme [160].

6.5. Eğitim, Doğrulama ve Test Veri Kümeleri

Ağ yapısının belirlenmesi ve bu ağ yapısına aktarılan girdilerin belirlenmesinden sonra, elde edilen verilere bağlı olarak yapay sinir ağlarının eğitilmesi gerekmektedir. Ağı eğitilmesindeki başlıca sebep, bilinmeyen verilerle ağı performansının artırılabilmesi için eğitim parametrelerinin belirlenmesidir. Farklı öğrenme algoritmalarının kullanılması ile hata değeri azaltılır ve gerçek çıkış değerleri ile uyumu en yüksek çıkış değerinin elde

edilmesi amaçlanmaktadır. Yapay sinir ağı içerisindeki ağırlıklar her bir çevrimde yenilenerek hata değerinin azaltılması sağlanmaktadır. Ağırlıklar, sürekli olarak sinir ağı çevrimi içerisinde yenilenerek istenilen sonuca ulaşıncaya kadar geçen zamana öğrenme veya ağı eğitilmesi denir. Sinir ağı eğitildikten sonra ağ içerisine daha önce verilmeyen girişler verilerek, sinir ağı çıkışı ile gerçek çıkış arasındaki yaklaşım incelenmektedir. Ağ, yeni verilen örneklerle yaklaşıyor ise, iyi eğitilmiş anlamına gelmektedir. Preddey ve Keller, [166] yapay sinir ağları için optimum konfigürasyonun belirlenmesinde bağımsız kümeleri (eğitim, doğrulama ve test) aşağıdaki gibi tanımlamışlardır;

- 1- Eğitim kümesi: İstenilen çıktıların elde edilebilmesi için yapay sinir ağında bulunan ağırlıkların eğitilmesi veya düzenlenmesi için kullanılmaktadır.
- 2- Doğrulama kümesi: Doğrulama hatası eğitimin durdurulması için kullanılmaktadır. Doğrulama hatası, eğitimin durdurulacağı optimum noktanın belirlenmesini denetlemektedir. Normal şartlarda doğrulama hatası, eğitimin başlangıcı esnasında azalmaktadır. Ancak veriler, sinir ağı ile uyum göstermeye başladığında, doğrulama kümesi ile oluşan çıktı hatası artmaya başlamaktadır. Kayda değer yineleme sayısına bağlı olarak doğrulama hatası arttığında eğitim durdurulur ve minimum doğrulama hatası ile ağırlıklar oluşturulmaktadır.
- 3- Test kümesi: Yapay sinir ağının performansının değerlendirilmesi için kullanılmaktadır [167].

7. MATERYAL VE METOT

Çalışmaya başlarken hâlihazırda seri üretimi yapılan ve sektörde satışı oldukça fazla olan 5,5 kW gücüne sahip asenkron elektrik motoru referans alınmıştır. Yapılan tüm tasarım, hesaplama ve işlemler bu motorun teknik özellikleri dikkate alınarak yapılmıştır. Çalışma boyunca gerçekleştirilen tüm işlemler ve aşamalar aşağıda ayrıntılı olarak sunulmuştur.

7.1. Kullanılan Silisli Sac ve Kesim Öncesi Hazırlık

Bu çalışmada, 5,5 kW gücüne sahip asenkron elektrik motorunun manyetik devresini oluşturan stator ve rotor sac paketlerinin oluşturulması için 0,5 mm kalınlığına sahip, soğuk haddeleme yöntemiyle üretilmiş ve tane yapısı yönsüz M400-50A silisli sac kullanılmıştır. Çizelge 7.1’de silisli sac malzemenin kimyasal bileşimi verilmiştir.

Çizelge 7.1. M400-50A silisli sac malzemenin kimyasal yüzde bileşimi

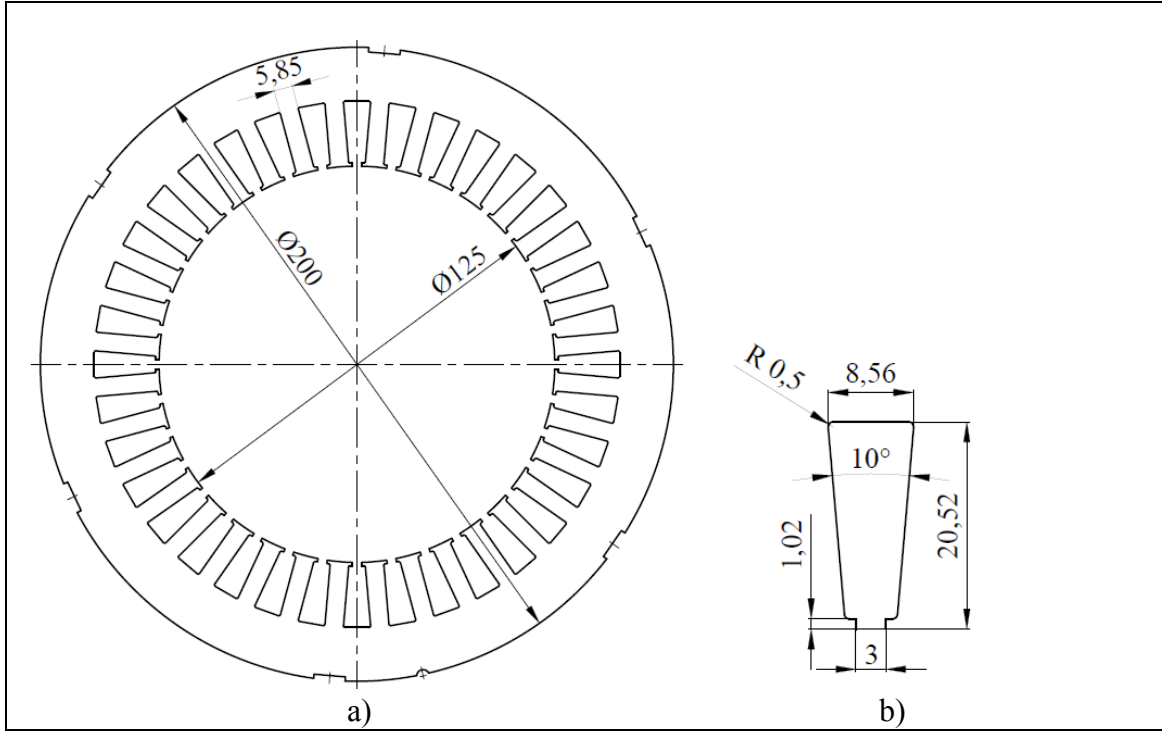
Üretim Yöntemi	Yüzde Bileşim (%)						
Soğuk Haddeleme	C	Mn	Si	S	P	Al	Fe
	0,002	0,23	2,49	0,002	0,064	0,442	Diğer

Çizelge 7.2’de malzemeye ait mekanik ve elektriksel özellikler ile sacın rulo sac ölçüsü, rulo net ağırlığı, 1 ve 1,5 T indükleme ve 50 Hz frekans değerlerinde oluşan kayıplar, manyetik alan gerilimi ve sertlik değeri verilmiştir.

Çizelge 7.2. M400-50A silisli sac malzemenin mekanik ve elektriksel özellikleri

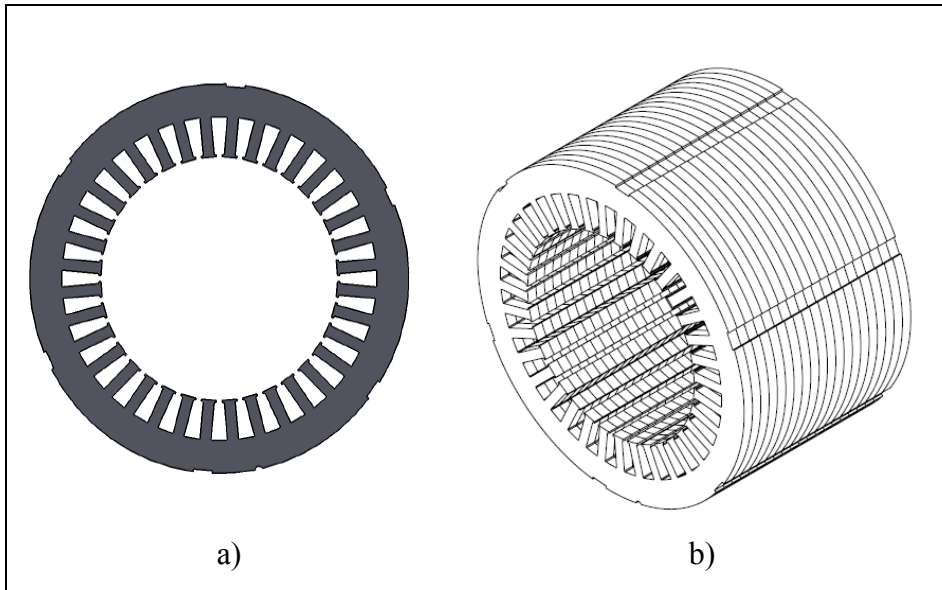
Ölçü (mm)	Rulo Net Ağırlığı (kg)	P _{1,0@10/50} (W/kg)	P _{1,5@15/50} (W/kg)	J25@ Manyetik Alan Gerilimi 2500 A/m (T)	Vickers Sertlik Değeri (HV5)
0,5x1000	4165	1,43	3,36	1,57	185

Asenkron elektrik motoruna ait stator ve rotor sac paketlerinin oluşturulması için stator ve rotor saclarının teknik çizimi, AutoCAD çizim programında yapılmıştır. Şekil 7.1’de stator sac malzemesine ait teknik resim ölçüleri gösterilmiştir.



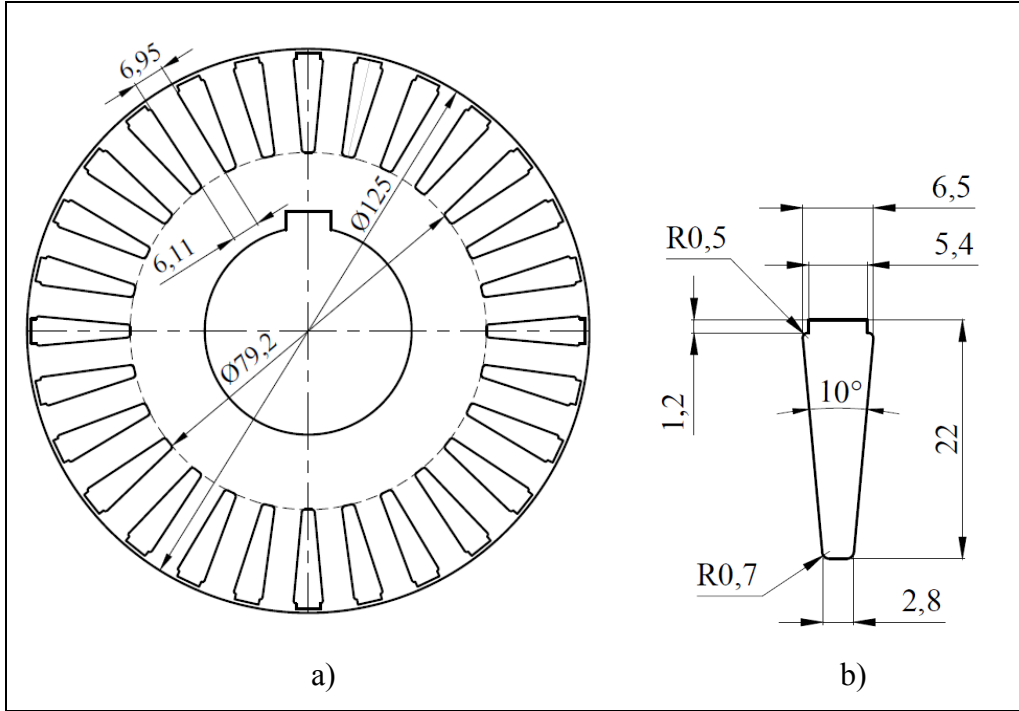
Şekil 7.1. a) Asenkron motor stator sac malzemesine ait teknik resim ölçüleri, b) Stator oluk ölçüleri

Şekil 7.2’de üretilen asenkron motora ait stator sac ve paketinin katı model görüntüsü verilmiştir.



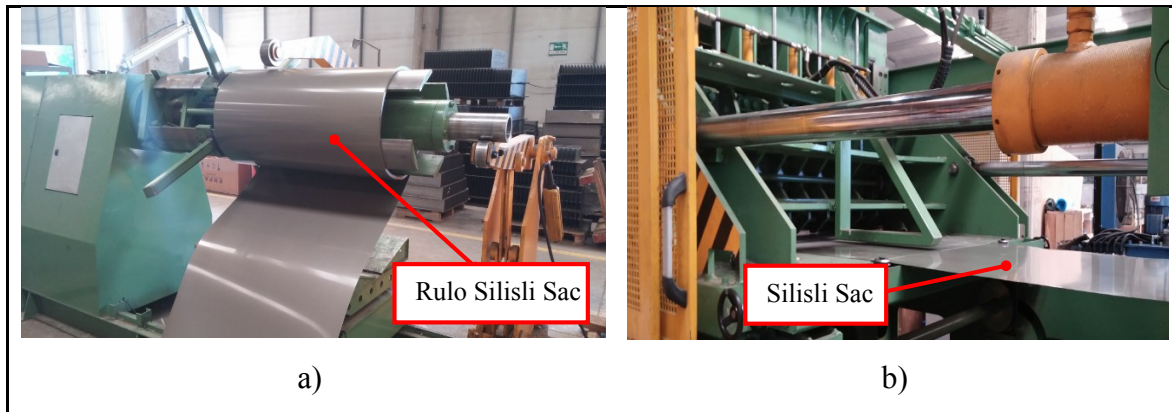
Şekil 7.2. a) Asenkron motor silisli stator sacının önden görünümü ve b) Stator sac paketine ait izometrik katı model görüntüsü

Şekil 7.3’te ise asenkron motor rotor sac malzemesine ait teknik resim ölçüleri gösterilmiştir.



Şekil 7.3. Asenkron motor rotor sac malzemesine ait teknik resim ölçüleri

Standart 5,5 kW asenkron motorun stator ve rotor sac paketlerinde 255'er adet sac kullanılmaktadır. Buna istinaden üretilen tüm motorların stator ve rotor sac sayıları 255 olarak alınmıştır. 0,5x1000 mm rulo sac ölçüsüne göre kesim yöntemleri dikkate alınarak yerleşim planı yapılmıştır. Yerleşim planına göre kullanılması gereken toplam sac ölçüsü 45 metre olarak belirlenmiştir. Buna göre, lazer ve su jeti kesim yöntemi için 1000x2000 mm ölçülerinde silisli sac giyotin makas ile plakalar halinde kesilmiştir (Resim 7.1-a) ve (Resim 7.1-b).



Resim 7.1. a) Rulo haldeki silisli sacın makara üzerinde döndürülerek açılması, b) Silisli sac malzemenin 1000x2000 mm ölçülerinde giyotin makas ile kesilmesi

Stator saclarının tel erezyon ile kesilmesi için silisli sac plakalar, giyotin makas ile 250x250 mm ölçülerinde hazırlanmıştır. Bu sac plakalar, üst üste dizildikten sonra 30 mm kalınlığında iki plaka arasına alınarak (Resim 7.2-a) sıkıştırılmıştır (Resim 7.2-b).

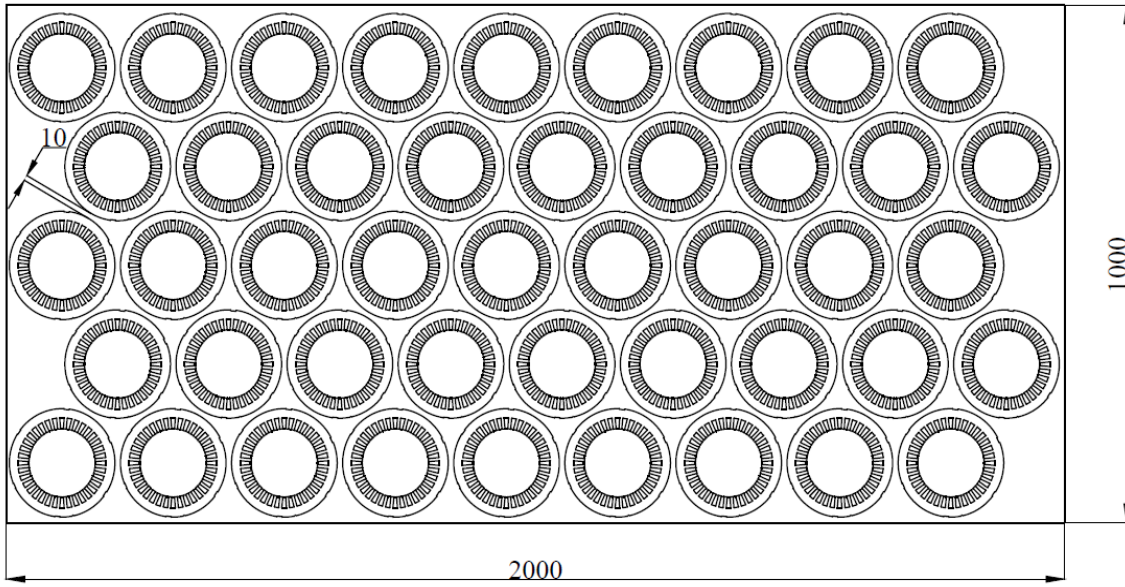


Resim 7.2.a) 250x250 mm ölçülerinde sac plakaların üst üste dizilmesi, b) Tel erezyon kesim yöntemi için sac plakaların sıkıştırılarak paketlenmesi

7.2. Lazer ile Kesme

Lazer kesim yöntemi, endüstride özellikle metalik malzemelerin kesilmesinde kullanılan geleneksel imalat yöntemleri arasında yer almaktadır. Uygun kesme parametreleri kullanıldığında, takıma ihtiyaç olmadan ve malzeme teması gerektirmeden hızlı ve çapaksız bir kesim yapılabilir. Bu nedenle, istenilen kesim kalitesinin elde edilebilmesi için kesme parametrelerinin çok iyi belirlenmesi gerekmektedir.

Silisli sac plaka, 1000x2000 mm ölçülerinde giyotin makasta kesildikten sonra, CNC lazer kesim tezgâhında stator saclarının üretilmesi için yerleşim planı hazırlanmıştır. Şekil 7.4'teki yerleşim planına göre bir adet plakadan 45 adet stator sacı kesilecek şekilde bir motor için toplam 255 adet stator sacı kesilmiştir. Yerleşim planı yapılırken stator sacları arasındaki mesafe minimum 10 mm olacak şekilde tasarlanmış, kesme kenarında termal etkilerden dolayı oluşabilecek cüruf ve yanma gibi olumsuz etkiler düşünülmüş, silisli stator saclarının manyetik özelliklerindeki değişimlerin en aza indirgenmesi amaçlanmıştır.



Şekil 7.4. Stator saclarının lazer ile kesilmesi için sac yerleşim planı

Lazer tezgâhında, stator saclarının tamamı kesilmeden önce, ön kesme deneyleri yapılmıştır. Kesme esnasında kesme gazı olarak azotun kullanılması, kesilen kenarda oksidasyon, cüruf ve renk atması gibi durumların engellenmesinin yanı sıra soğutarak kesme işlemine olanak sağladığı için kesme hızının artmasına yardımcı olmuştur. Bu amaçla, ön kesme deneylerinde, kesme bölgesinde çapak oluşumu en aza indirgenecek şekilde Çizelge 7.3'te verilen kesme parametreleri belirlenmiştir.

Çizelge 7.3. Lazer kesme parametreleri

Parametre	Sembol	Birim	Seviye
Kesme Gücü	W	Watt	6000
Kesme Hızı	V	m/dak	8,6
Dalga Boyu	λ	μm	10,6
Işın Kalitesi	M ²	-	1,82
Kerf Genişliği	W _t	mm	0,31
Odak Uzaklığı	f	mm	9,8
Nozul-İş Parçası Mesafesi	h	mm	1,5
Kesme Gaz Basıncı	N ₂	bar	15
Işın Kaynağı Ölçüleri	L x w x h	mm	1185x1150x650
Nozul Çapı	d	mm	1,4
Malzeme Kalınlığı	t	mm	0,5

Lazer ile hassas kesme işleminin gerçekleştirilebilmesi için diğer önemli hususlardan biri de tezgâh seçiminin iyi yapılmasıdır. Tezgâh bakımının iyi yapılamaması, farklı kalınlık ve türdeki malzemelerin aynı tezgâhta kesilmesi, farklı kesme gazlarının aynı tezgâhta kullanılması gibi durumlar, hassas kesim yapılabilmesi için engel teşkil etmektedir. Bu

amaçla, yüksek kesme gücüne sahip olması ve hassas çalışma kabiliyetinden dolayı bu çalışmada, TRUMPF TruFlow 6000 model CNC lazer tezgâhı kullanılmıştır (Resim 7.3).

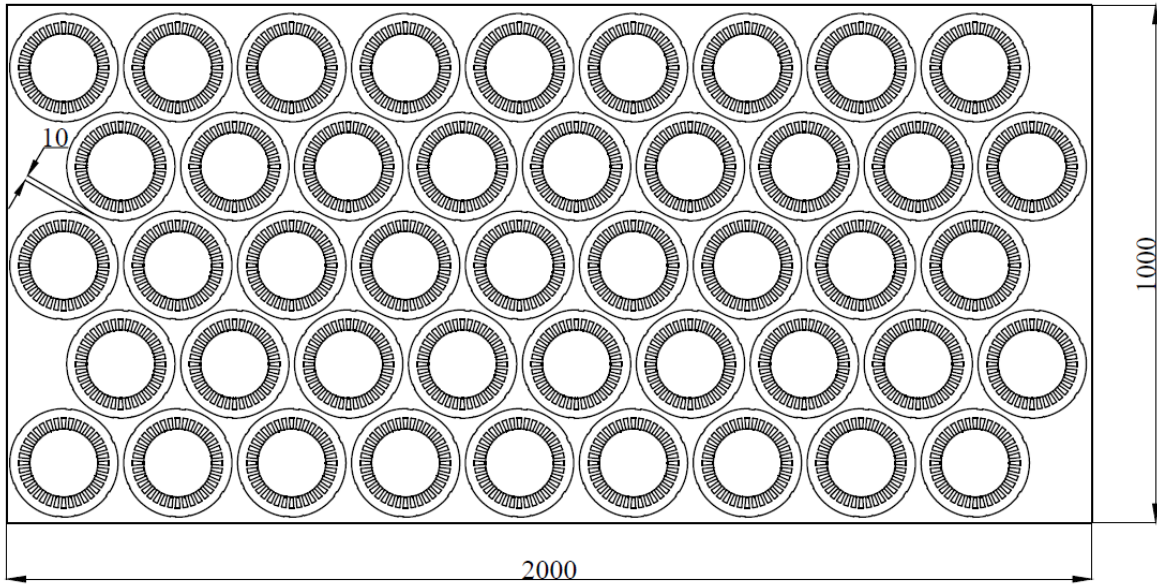


Resim 7.3. Stator saclarının lazer kesme yöntemi ile kesilmesi

7.3. Aşındırıcılı Su Jeti ile Kesme

Aşındırıcı parçacıkların yüksek basınçlı su yardımıyla parça yüzeyine püskürtülerek malzeme yüzeyinde krater oluşturma esasına dayanan geleneksel kesme yöntemlerinden biridir. Farklı malzemelerin kesilmesinde, özellikle kesme kenarında termal etkilerden dolayı oluşan bozulmaların istenmediği durumlarda kullanılmaktadır. Yüksek kesme performansına sahip olmasının yanı sıra prototip amaçlı üretim için yatırım maliyetlerinin yüksek olduğu kesme kalıbı ile kesme yöntemine göre daha çok tercih edilebilmektedir.

Aşındırıcılı su jeti ile kesim işlemi için giyotin makas ile 1000x2000 mm ölçülerinde altı adet silisli sac plaka kesilmiştir. Daha sonra, CNC aşındırıcılı su jeti tezgâhında stator saclarının üretilmesi için bu sac ölçüsü üzerinde yerleşim planı yapılmıştır. Şekil 7.5' teki yerleşim planına göre lazer kesim yöntemine benzer şekilde bir adet plakadan 45 adet stator sacı kesilecek şekilde bir motor için toplam 255 adet stator sacı kesilmiştir. Yerleşim planı yapılırken iki stator sacı arasındaki mesafe, kesme anında aşındırıcı ve su basıncının etkisinin yanı sıra sac malzeme sarfiyatı açısından optimum (10 mm) olacak şekilde belirlenmiştir.



Şekil 7.5. Stator saclarının aşındırıcılı su jeti ile kesilmesi için sac yerleşim planı

Su jeti ile malzemelerin kesilmesi esnasında, kesme kenarında deformasyona bağlı çapak oluşumu gerçekleşmektedir. Çapak oluşumu ise stator saclarının paketlenmesini dolayısı ile bu sac paketlerinin manyetik özelliklerini olumsuz etkilemektedir. Bu amaçla, hassas kesim işleminin yapılabilmesi için uygun kesme parametrelerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu parametrelerin belirlenmesi için makina ve aşındırıcı özellikleri dikkate alınmaktadır. Buna istinaden, ön kesme deneyleri için örnek stator sacları kesilerek, Çizelge 7.4'te verilen en uygun kesme parametreleri belirlenmiştir.

Çizelge 7.4. Aşındırıcılı su jeti ile kesme ve makina parametreleri

Parametre	Sembol	Birim	Seviye
Kesme Parametreleri			
Kesme Hızı	V	mm/dak	850
Nozulun Parçaya Uzaklığı	D	mm	4
Aşındırıcı Sertliği	-	Mohs	7,5-8
Aşındırıcı Parça Büyüklüğü	-	Mesh	80 veya 0,177 mm
Kullanılan Aşındırıcı Cinsi	-	-	Bengal Bay Garnet
Aşındırıcı Kimyasal Bileşimi	-	-	$\text{SiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO} + \text{CaO} + \text{MnO}$
Tüketilen Aşındırıcı Miktarı	-	gr/dak	250
Nozul Duruş Açısı	θ	derece	90
Suyun Nozuldan Çıkış Hızı	V_c	mm/sn	900
Makina Parametreleri			
Suyun Nozula Giriş Çapı	S_n	mm	0,25
Aşındırıcı Nozul Giriş Çapı	N_g	mm	0,76
Suyun Nozuldan Çıkış Basıncı	P_n	mm	0,76
Yükseltici Çalışma Basıncı	P_b	bar	Min 2500-Max 3700
Suyun Yükselticiye Giriş Basıncı	P_g	bar	6
Suyun Yükselticiden Çıkış Basıncı	P_c	bar	3700

Çizelge 7.4. (Devam) Aşındırıcılı su jeti ile kesme ve makina parametreleri

Nozul Uç Malzemesi	-	-	Sapphire (Elmas)
Nozul Boyu	N_b	mm	76
Nozul Uç Ömrü	N_o	saat	40-50
Suyun Debisi	Q	lt/dak	3
Karışım Oda Yüksekliği	h	mm	20
Karıştırma Tüp Çapı	D_t	mm	1,8
Pompa Kapasitesi	-	lt/dak	3
Pompa Piston Çapı	D_p	mm	22
Elektrik Motor Kapasitesi	P_m	kW	37
Çalışma Anındaki Gerilim	-	V	380

Su jeti ile malzemelerin kesilmesi esnasında kullanılan ve toz halde bulunan aşındırıcı parçacıklar, kesim kalitesi üzerinde önemli etkiye sahiptir. Aşındırıcı parametreler arasında yer alan parçacıkların seçimi, boyutlarına göre de belirlenebilmektedir. Parçacık boyutu, kesilen kenarın yüzey pürüzlülüğü üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Büyük tanecik yapılı aşındırıcılar, genellikle daha kaba bir yüzey formunun oluşmasına sebep olduğu için stator saclarının kesilmesinde 80 Mesh (0,177 mm) boyutuna sahip aşındırıcı parçacıklar tercih edilmiştir. Bu hususlar dikkate alınarak belirlenen aşındırıcı parçacıkların optik mikroskop altındaki görüntüleri Resim 7.4’te verilmiştir.



Resim 7.4. a) Aşındırıcı parçacıkların toz haldeki görüntüsü, b) Aşındırıcı parçacıkların optik mikroskop altında büyütülmüş görüntüsü (X40)

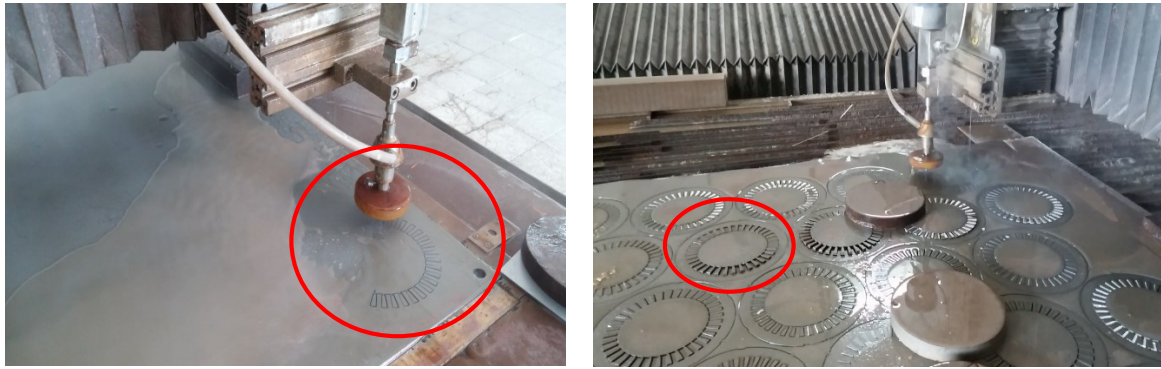
Malzeme yüzeyinden aşındırıcı parçacıklar ile hassas kesim yapılabilmesi için tane büyüklüğü ve sertliğinin yanı sıra kimyasal bileşimin dikkate alınması gerekmektedir. Bileşimi oluşturan elementler, aşındırıcı parçacıkların sertliği üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu için kesilen malzemenin yüzey kalitesi açısından önem taşımaktadır. Bu

hususlar dikkate alındığında, stator sacların kesilmesinde kullanılan aşındırıcı tanelerin ağırlıkça yüzde bileşimi Çizelge 7.5’te verilmiştir.

Çizelge 7.5. Aşındırıcı tanecik ağırlıkça yüzde bileşimi

Aşındırıcı kimyasal bileşimi		
	Sembol	Bileşim oranı
Silisyumdi oksit	SiO_2	35%
Ferit oksit	Fe_2O_3	33%
Aluminyum oksit	Al_2O_3	23%
Magnezyum oksit	MgO	7%
Kalsiyum oksit	CaO	1%
Mangan oksit	MnO	1%

Aşındırıcılı su jeti ile kesim işleminde kesme ve makina parametreleri belirlendikten sonra, sac yerleşim planına göre Resim 7.5’te gösterildiği gibi kesim işlemi gerçekleştirilmiştir.

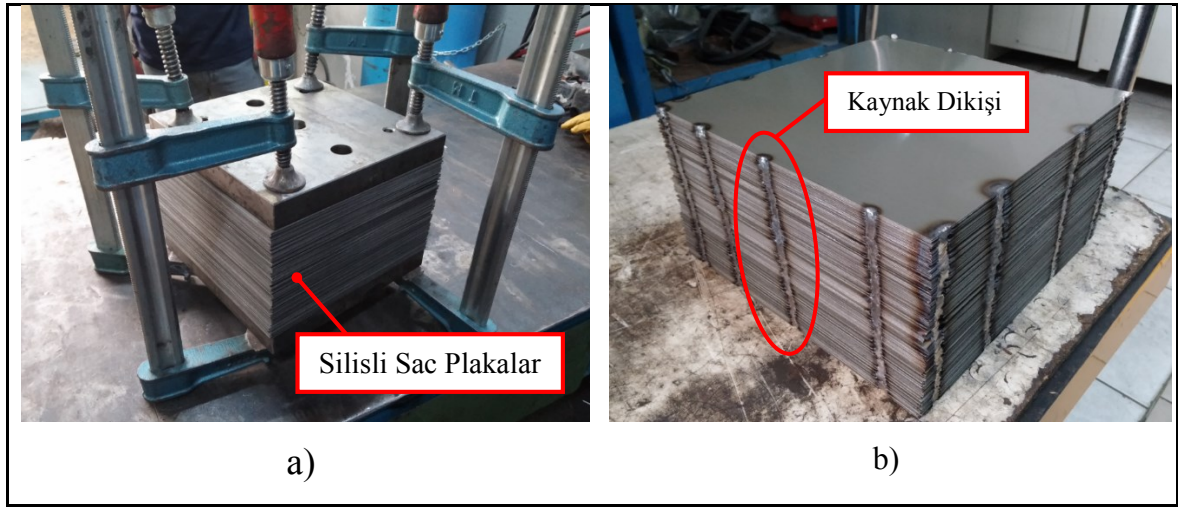


Resim 7.5. a) Aşındırıcılı su jeti ile stator saclarının kesilmesi, b) Sac plaka üzerinde kesilen stator saclarının görünümü

7.4. Tel Erezyon ile Kesme

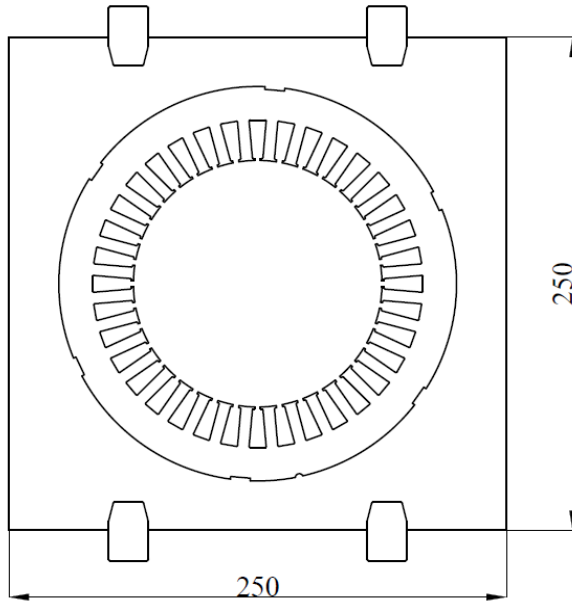
Tel erezyon ile kesme, elektro-termal enerji ile kesim esasına dayanan ve son yıllarda özellikle havacılık, nükleer ve otomotiv sanayisinde yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Kesme işlemi, iletken malzemeler arasında elektrik kıvılcımlarına bağlı oluşan ısı yardımı ile malzemeyi aşındırarak gerçekleşmektedir. Klasik tezgâhlarda üretilmesi mümkün olmayan çok sert ve karmaşık geometriye sahip malzemeler, bu kesim yöntemi ile kolaylıkla işlenebilmektedir. Yüksek ölçü tamlığı ve daha iyi yüzey kalitesi elde edilebilmesi açısından tercih edilebilmektedir.

Tel erozyon ile kesilecek sac malzeme ölçüleri, stator saclarının kesilmesinde malzeme sarfiyatı en az olacak şekilde ve tel erezyon tezgâhının bağlama mesafesine göre belirlenmiştir. Bu amaçla, rulo halde alınan silisli sac önce 1000x2000 mm ölçülerine göre sonrada 250x250 mm ölçülerine göre giyotin makasta kesilmiştir. Stator saclarının tel erezyonda blok halinde kesilebilmesi için kare plakalar halinde kesilen silisli saclar 255 adet üst üste dizildikten sonra sıkıştırılarak (Resim 7.6-a) kenar bölgelerden elektrik ark kaynağı ile kaynak yapılmıştır (Resim 7.6-b).



Resim 7.6. a) Silisli sacların preslenmesi, b) Sac paketinin kenarlardan kaynak yapılması

Sac plakalar, kaynak yapılarak paketlenmesi işleminden sonra, stator sac paketinin blok halinde kesilebilmesi için plaka üzerinde stator sac yerleşim planı yapılmıştır (Şekil 7.6).



Şekil 7.6. Tel erezyon kesme yönteminde stator sac yerleşim planı

Tel erezyon kesme yönteminde istenilen ölçü tamlığı ve yüzey kalitesinin elde edilebilmesi için uygun kesme parametrelerinin belirlenmesi gerekmektedir. Kesme bölgesinde, elektrik kıvılcımına bağlı oluşabilen termal etkiler, yüzey kalitesi üzerinde önemli etkiye sahiptir. Termal etkilerden dolayı kesme yüzeyinde kraterler oluşmakta ve buna bağlı olarak yüzey pürüzlülüğü artmaktadır. Ayrıca malzemenin sertliği de kaliteli bir kesme işleminin yapılabilmesi için önem taşımaktadır. Sert malzemelerin kesilebilmesi için daha fazla akım gerekmektedir. Bu durum ise yüzey pürüzlülüğünün artmasına sebep olmaktadır. Bu hususlar, dikkate alınarak kesme kenarında çapak oluşumunun minimuma indirgenmesi için ön kesme deneyleri sonucunda en uygun parametreler Çizelge 7.6’ da gösterildiği gibi belirlenmiştir.

Çizelge 7.6. Tel erezyon kesme parametreleri

Tel Erezyon Kesme Parametreleri									
Tezgah Marka/ Modeli	Puls Süresi (ms)	Açık Devre Gerilimi (V)	Tel İlerleme Hızı (m/dak)	Dielektrik Sıvı Püskürtme Basıncı (kg/cm ²)	Puls Ara Süresi (ms)	Aralık Voltajı (V)	Tel Gerginliği (gr)	Tel Çekme Mukavemeti (N/mm ²)	Tel Çapı (mm)
SODICK/AQ537L	14	8	9	62	13	18	1600	1000	0,25

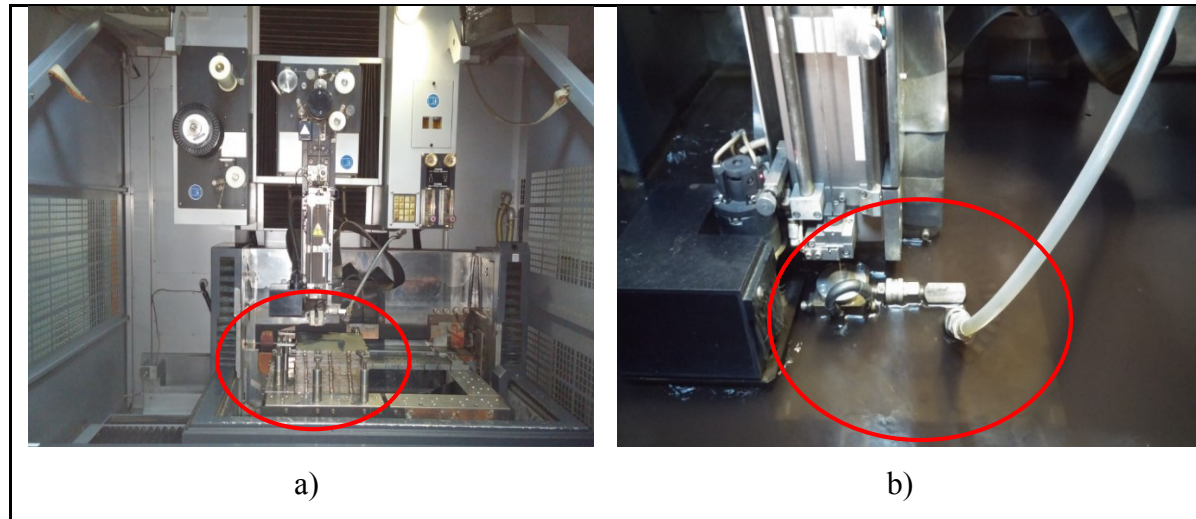
Tel erezyon ile kesme işleminde kullanılan tel elektrod, akım geçtiğinde düşük enerji kaybı, kesme kalitesi için kolay deşarj olabilme ve yüksek sıcaklıklarda yüksek çekme mukavemeti gibi özelliklere sahip olması gerekmektedir. Daha büyük tel çapı daha yüksek kesme hızının kullanılmasına imkân sağlamaktadır. Çap değerinin artması ile çekme mukavemeti artacağı

için daha yüksek deşarj akımı kullanılmaktadır. Aynı zamanda, tel yüzey alanı artacağı için di-elektrik sıvısının soğutma özelliği artmaktadır. Bu nedenle, kesme esnasında yüksek akım değerleri kullanılabilir. Bu hususlar dikkate alınarak, stator saclarının tel erezyon ile kesilmesi için kullanılan tel elektrodun kimyasal bileşimi Çizelge 7.7’de verilmiştir.

Çizelge 7.7. Tel erezyon kesme işleminde kullanılan elektrot telin kimyasal bileşimi

Alaşım	Alaşım No		Cu (%)	Zn (%)	Al (%)	Fe (%)	Ni (%)	Pb (%)	Sn (%)	Mn (%)
CuZn37	CW508L	min. max.	62 64	Diğer	0,05	0,1	0,3	0,1	0,1	-

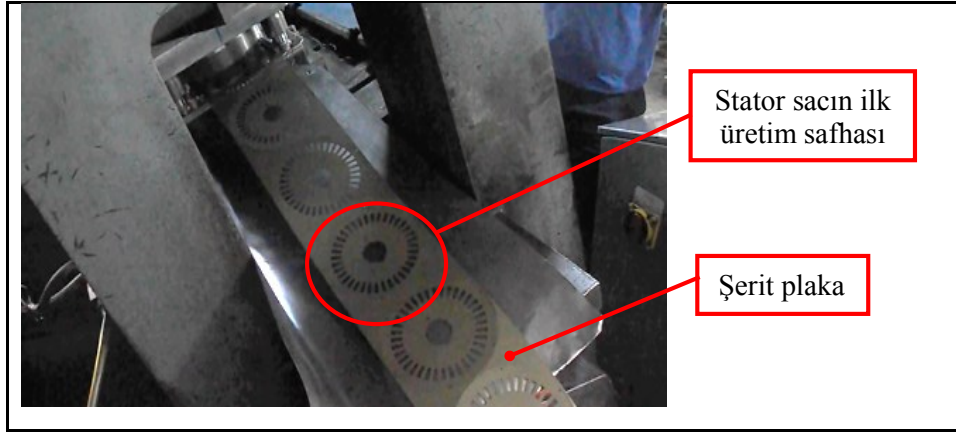
Resim 7.7’de silisli sac paketinin tel erezyon tezgâhına bağlanması ve sıvı içerisinde yapılan kesim işlemi gösterilmiştir.



Resim 7.7. a) Sac paketinin tel erezyon tezgahına bağlanması, b) Stator sac paketinin kesilmesi

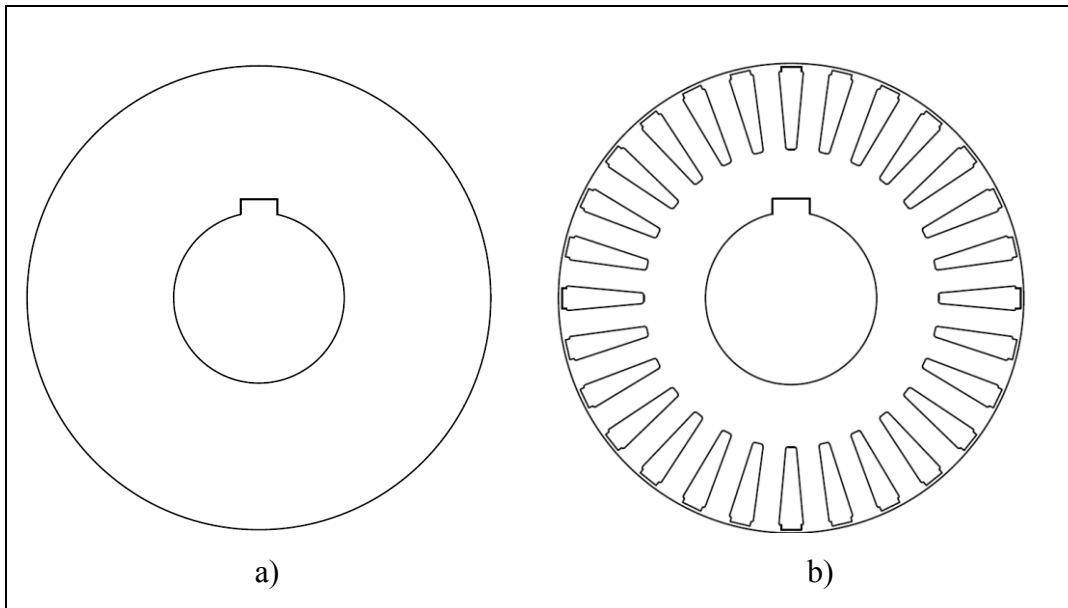
7.5. Kesme Kalıbı ile Kesme

Kesme kalıbı ile üretim, malzemeden talaş kaldırmadan plastik deformasyonla seri halde kesme (makaslama) ve kırılma (kopma) esasına göre üretim yapmaktadır. Başlangıçta, yatırım maliyetlerinin yüksek olmasına rağmen seri üretime dayalı çalışmalarda düşük maliyet ile üretimin yapılmasına olanak sağlamaktadır. Kesme kalıbı ile üretimin belirlenmesinde, üretilmesi istenen parça sayısı, geometrisi, malzemesi ve kalınlığı, malzeme ve işçilik maliyetleri gibi etkenlerin dikkate alınması gerekmektedir.



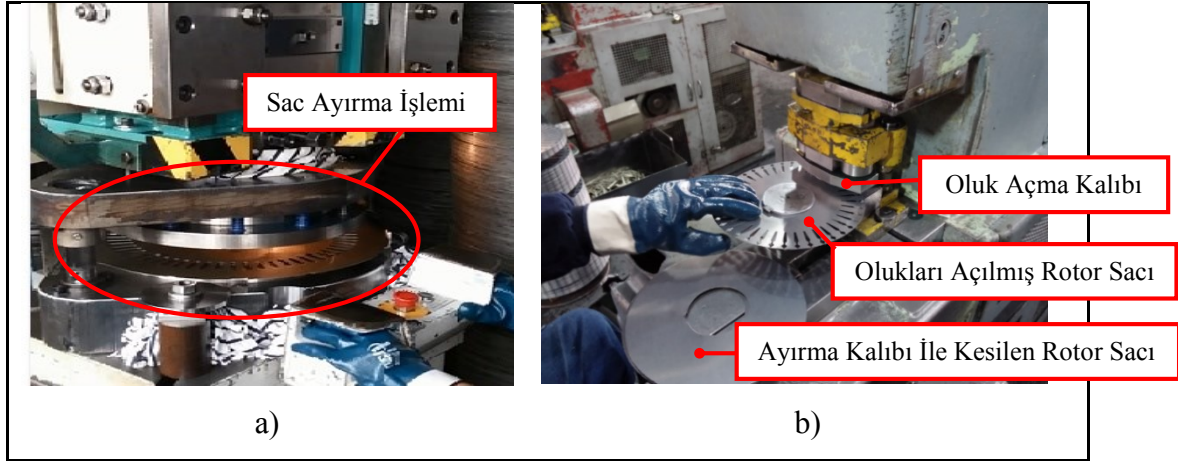
Resim 7.8. Stator sacın kesme kalıbı ile kesilmesi

Kesme kalıbı ile stator sacın ilk üretim aşaması tamamlandıktan sonra, ikinci aşamada sac ayırma kalıbı kullanılarak rotor sacın bu sac içerisinden ayrılması işlemi yapılmış ve oluk açma kalıbı ile rotor sacı üzerindeki oluklar açılmıştır (Şekil 7.8).



Şekil 7.8 a) Stator sacı içerisinden rotor sacının ayrılması, b) Rotor sacı üzerindeki olukların açılması

Resim 7.9'da rotor sacının ayırma kalıbı ile ayrılması ve bu rotor sacı üzerindeki olukların açılması işlemi gösterilmiştir.



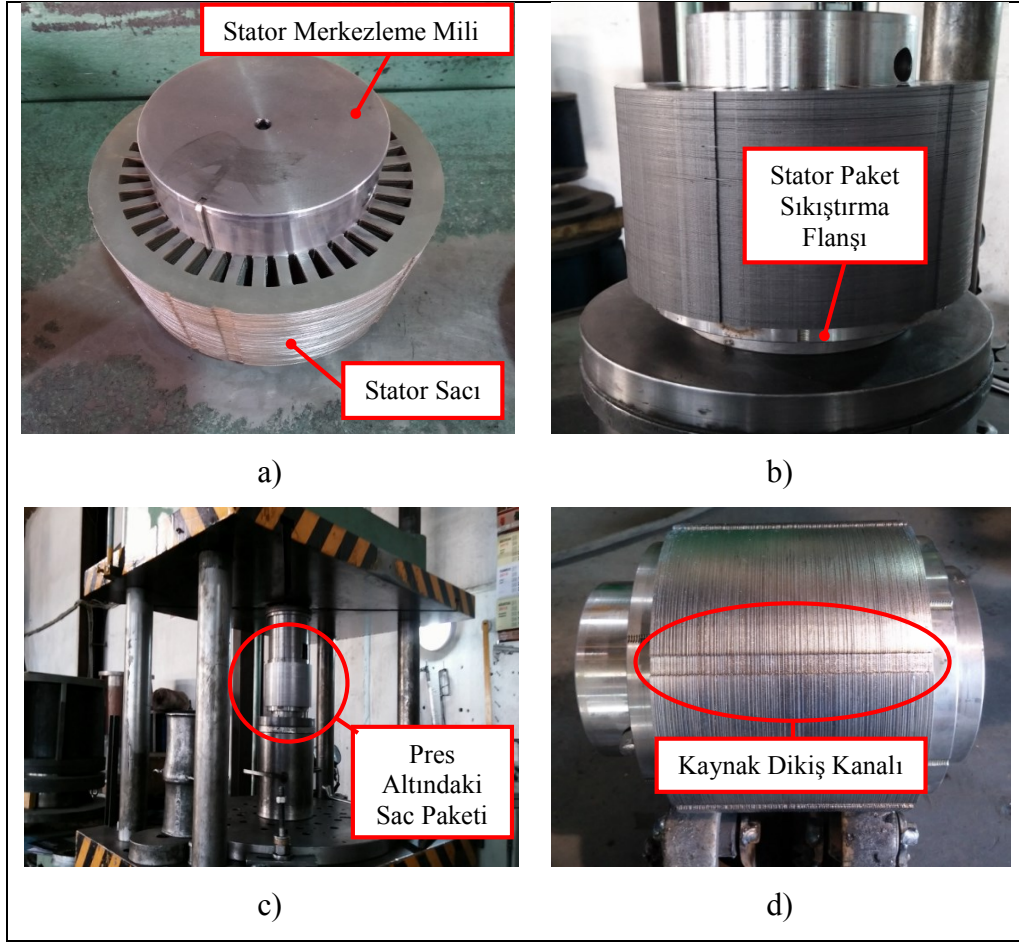
Resim 7.9. a) Stator sac içerisinde rotor sacının ayrılması, b) Rotor sacı üzerindeki olukların kesme kalıbı ile kesilmesi

Kesme kalıbı ile kesilen stator ve rotor sacları, Elsan Elektrik Sanayii ve Ticaret A.Ş.'nin seri üretimde kullandığı kalıp ile kesilmiştir. Elektrik motorlarının verimliliği ve toplam kayıpları üzerinde, kesme yöntemlerinin etkisinin belirlenmesi için stator sacları, lazer, aşındırıcılı su jeti, tel erezyon ve kesme kalıbı ile kesilmiştir. Bu kesme yöntemlerine göre üretilen dört adet motora ait rotor sacları ise sadece kesme kalıbı ile üretilmiştir.

7.6. Kesilen Stator Saclarının Paket Haline Getirilmesi

Elektrik motorlarının verimliliği üzerinde önemli etkiye sahip olan stator sac paketleri, motorların sabit bölümünü oluşturmaktadır. Bu paketlerin yapısını oluşturan silisli stator saclar, farklı kesme yöntemleri ile üretildikten sonra üst üste dizilerek belirli bir basınç altında sıkıştırılmaktadır. Sıkıştırma işlemi, stator saclarının mekanik ve manyetik özelliklerinin etkilenmeyeceği bir şekilde yapılması gerekmektedir. Ancak, kesme yöntemlerine göre farklılık gösteren ve stator saclarının kesme kenarında oluşabilecek aşırı çapaklanma ve termal etkilerden dolayı oluşan yanma veya cüruflar, stator saclarının paketlenmesini olumsuz etkilemektedir. Bu durum, teorik olarak hesaplanan stator sac yüksekliğinin deneysel olarak ölçülen sac yüksekliğine oranlanması ile ifade edilmektedir. Diğer bir ifade ile yığılma faktörü olarak ta adlandırılmaktadır.

Lazer, aşındırıcılı su jeti, tel erezyon, ve kesme kalıbı ile kesilen stator saclarının paketlenmesi için bağlama kalıbı tasarlanmıştır. Tasarlanan bağlama kalıbı, toplam beş



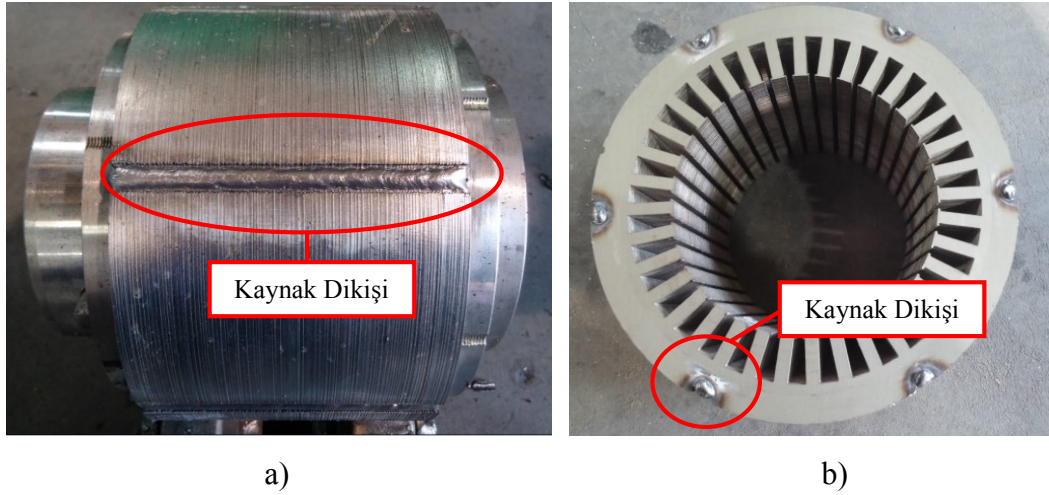
Resim 7.10. a) Stator sac paketin demonte halde üstten görünüşü, b) Stator sac paketin demonte halde önden görünüşü, c) Stator sac paketin preslenmesi, d) Stator sac paketinin bağlama kalıbı ile sabitlenmesi

Stator sacları üzerinde bulunan kaynak dikiş kanal sayısı, optimum paketleme işleminin yapılabilmesi için altı adet olacak şekilde belirlenmiştir. Kaynak dikiş kanal sayısının az olması, stator saclarının birbirleri arasında yeterli basma yüzeyinin elde edilememesine, fazla olması ise kaynak işleminden dolayı aşırı ısı oluşumu ile sacların manyetik özelliklerinin olumsuz etkilenmesine sebep olmaktadır. Kaynak işleminde seçilen tel elektrot ile sac malzeme özellikleri arasında kimyasal özellikler açısından benzerlik vardır. Bu sebeple kaynak yöntemi olarak elektrik ark kaynağı tercih edilmiştir. Kaynak işlemi, silisli sac manyetik özelliklerinin ve ısı tesiri altında kalan bölgenin asgari düzeyde etkilenebileceği, ancak arzu edilen bir düzeyde birleştirme için uygun parametreler, ön deneyler yapılarak belirlenmiştir. Buna göre, birleştirme işlemi için kullanılan kaynak parametreleri Çizelge 7.8’de verilmiştir.

Çizelge 7.8. Elektrik ark kaynak parametreleri

Elektrik ark kaynak parametreleri						
Tel ölçüleri [ÇapxBoy (mm)]	Kaynak Teli	Kaynak Tel Normu	Akım Türü	Akım Şiddeti (A)	Başlangıç Gerilimi (V)	Kaynak Gerilimi (V)
3,5x350	Magmaweld (Örtülü Elektrod- Alaşımsız Çelik)	DIN 1913/ TS 563	DC (+)	125	75	380

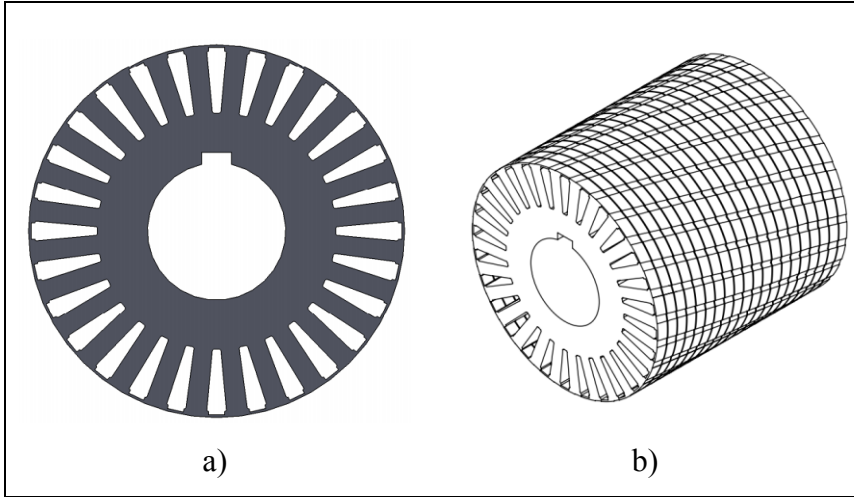
Bu amaçla, paket haline getirilen stator sacları, kaynak dikiş kanalları boyunca elektrik ark kaynağı ile birleştirilmiştir. Kaynak işlemi yapıldıktan sonra (Resim 7.11), stator paketleri üzerinde oluşan kaynak cürufırları tel fırça ve taşlama makinası ile temizlenerek gövde içerisine montaj için hazır hale getirilmiştir.



Resim 7.11. a) Kaynak dikişinin önden görünüşü, b) Kaynak dikişinin üstten görünüşü

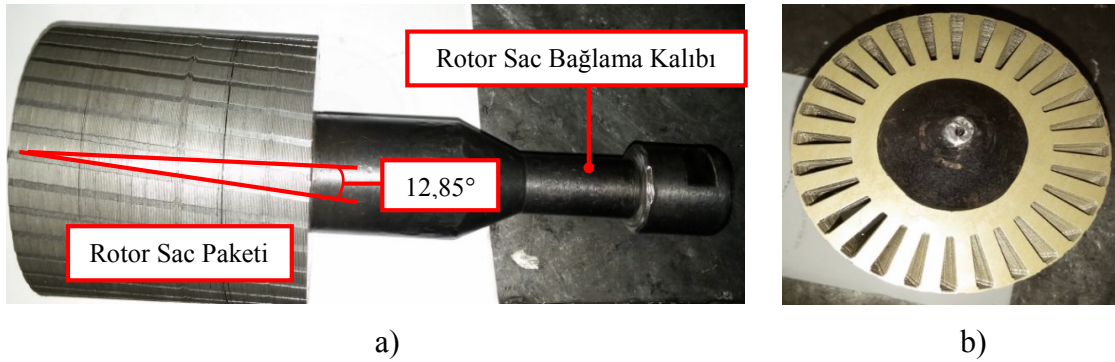
7.7. Rotor Saclarının Paket Haline Getirilmesi

Rotor, asenkron motorun dönen bölümünü oluşturmaktadır. Silisli sacların üst üste dizilerek paketlenmesi ile meydana gelmektedir. 5,5 kW asenkron elektrik motoru için stator sac paketleri lazer, aşındırıcılı su jeti, tel erezyon ve kesme kalıbı yöntemleri ile üretilmiştir. Ancak, rotor sac paketleri sadece kesme kalıbı ile üretilerek elektrik motorunun verimliliği üzerinde kesme yöntemlerinin etkisi, stator sac paketlerine göre araştırılmıştır. Rotor sac paketlerinin oluşturulmasında her bir motor için kesme kalıbı ile üretilen 255'er adet rotor sacı kullanılmıştır (Şekil 7.10).



Şekil 7.10. a) Silisli rotor sacının katı modeli, b) Rotor sac paketinin izometrik katı modeli

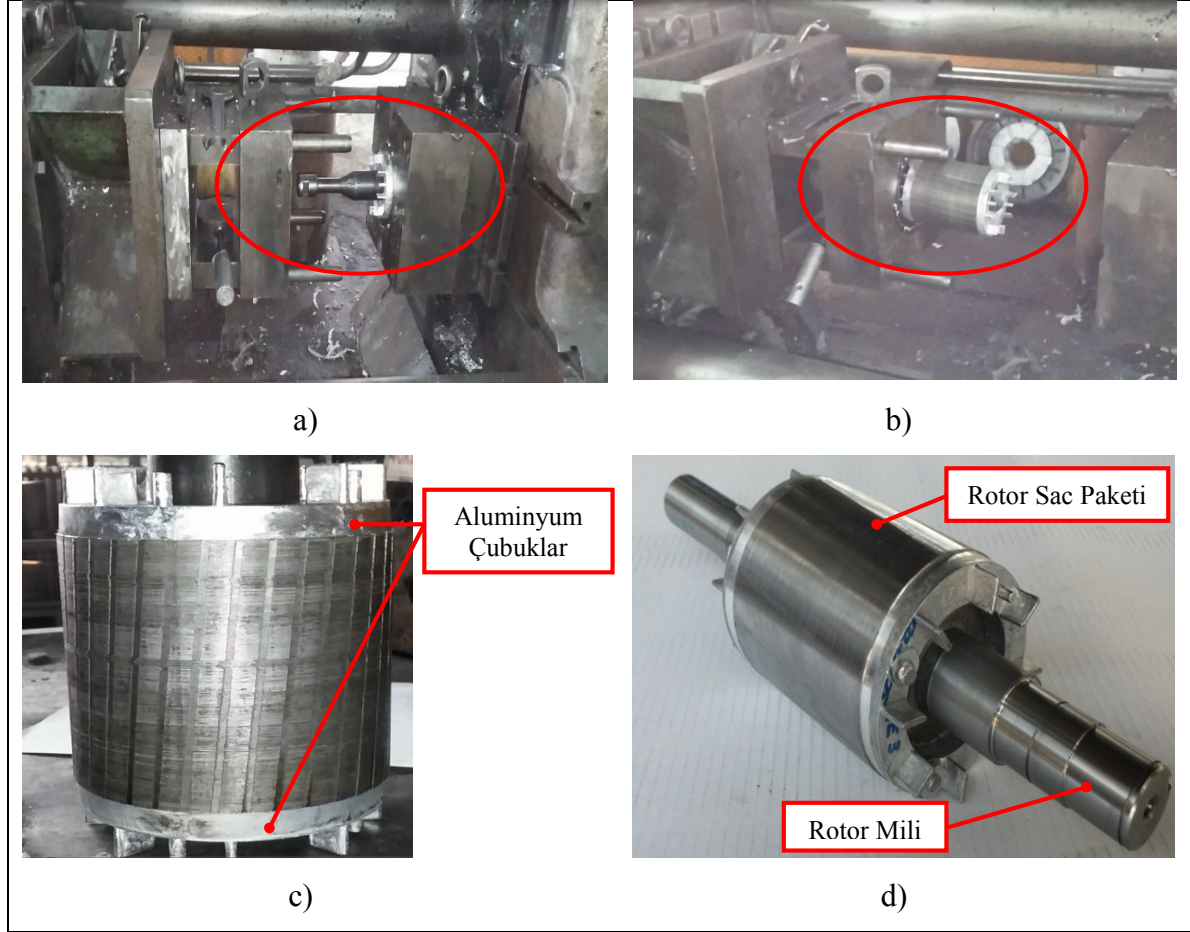
Rotor sacları, mil şeklindeki bir kalıp üzerine kayk (skewing) verilerek dizilmektedir. Kaykının verilmesindeki amaç, vurutu torkunun minimize edilmesi ve elektromanyetik gürültünün azaltılmasıdır. Kayk miktarı, rotorda kullanılan oluk sayısına bağı olarak iki oluk arasındaki aç değeri olarak belirlenmektedir. Bu çalışmada kullanılan rotor üzerinde, toplam 28 adet oluk bulunduğundan iki oluk arasındaki aç değeri $12,85^\circ$ olarak belirlenmiştir (Resim 7.12).



Resim 7.12. a) Rotor sac paketinin yandan görünüşü, b) Rotor sac paketinin önden görünüşü

Stator sac paketinin oluşturduğu manyetik alanın etkisi ile ikinci bir manyetik alanın oluşturulabilmesi için rotor gövdesi üzerine açılan oluklara alüminyum enjeksiyon yöntemi ile çubuklar konulmaktadır. Bu çalışmada, rotor sac paketinin üst ve alt çubukları, alüminyum enjeksiyon döküm yöntemi ile üretilmiştir (Resim 7.13-a,b,c). Enjeksiyon işlemi esnasında ergiyik malzeme, homojenliğin sağlanması için bir dakika süre ile kalıp içerisinde bekletilmiştir. Daha sonra, rotor sac paketi ile mil bağlantısı yapıldıktan sonra sürtünme ve

rüzgâr kayıplarına sebep olan salgının giderilmesi için tornalama işlemi yapılmıştır (Resim 7.13-d).

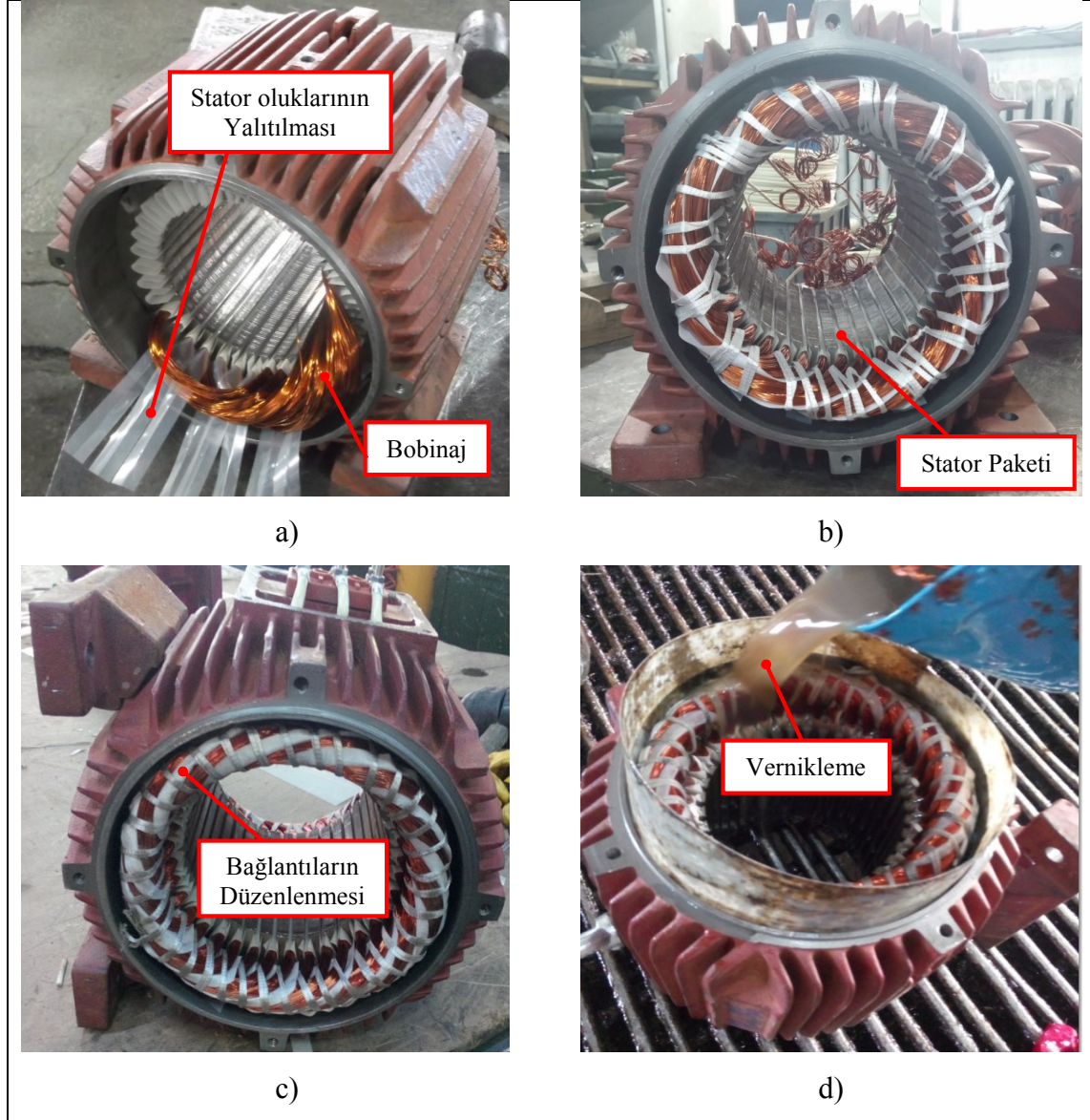


Resim 7.13. a) Rotor sac paketinin üzerine alüminyum enjeksiyon döküm yöntemi ile çubukların dökülmesi, b) Rotor sac paketinin döküm kalıbı içerisinde çıkartılması, c) Alüminyum çubukları konulmuş rotor sac paketi, d) Üretimi tamamlanmış rotor paketi

7.8. Elektrik Motorlarının Montajının Yapılması

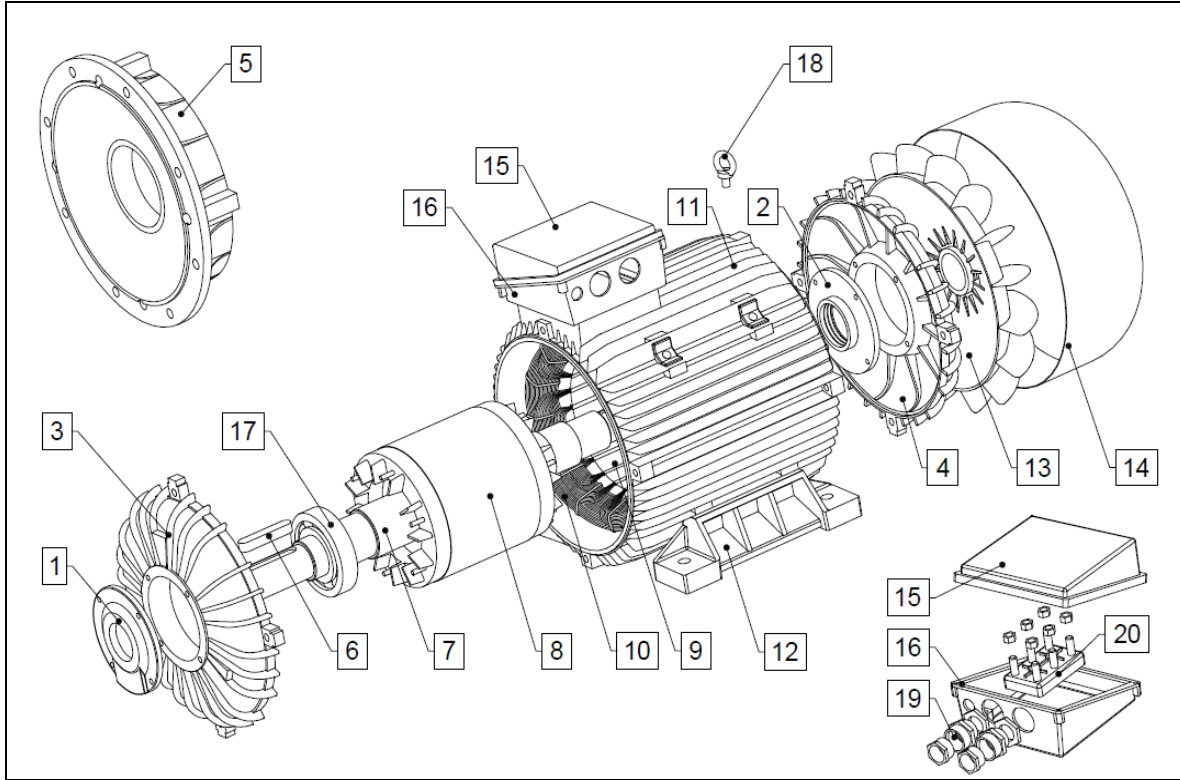
Asenkron elektrik motoruna ait stator ve rotor sac paketleri üretildikten sonra ilk olarak stator sac paketi, iç çap ölçüsüne göre önceden tornalanmış motor gövdesine sıkı geçirilerek bobinaj işlemi için hazır hale getirilmiştir. Stator sac paketi üzerindeki olukların yalıtılması işleminden sonra (Resim 7.14-a), bobinaj işlemine son hali verilmesi için bakır kablo bağlantılarının düzenlenmesi işlemi yapılmıştır (Resim 7.14-b,c). Bakır sargıların yalıtılması için su bazlı vernik kullanılarak vernikleme işlemi yapılmıştır (Resim 7.14-d). Vernikleme

işleminde sonra gövdeler, 155 °C’de 9 saat süre ile fırında bekletilerek montaja hazır hale getirilmiştir.



Resim 7.14. a) Stator oluklarının izolasyonu, b) Bobinaj işleminin yapılması, c) Bobinaj işleminde sonra bağlantıların düzenlenmesi, d) Vernikleme işleminin yapılması

Vernikleme işleminde sonra Şekil 7.11’de ve Çizelge 7.9’da verilen elektrik motoruna ait mekanik ve elektriksel sistem elemanlarının montajı yapılmıştır.

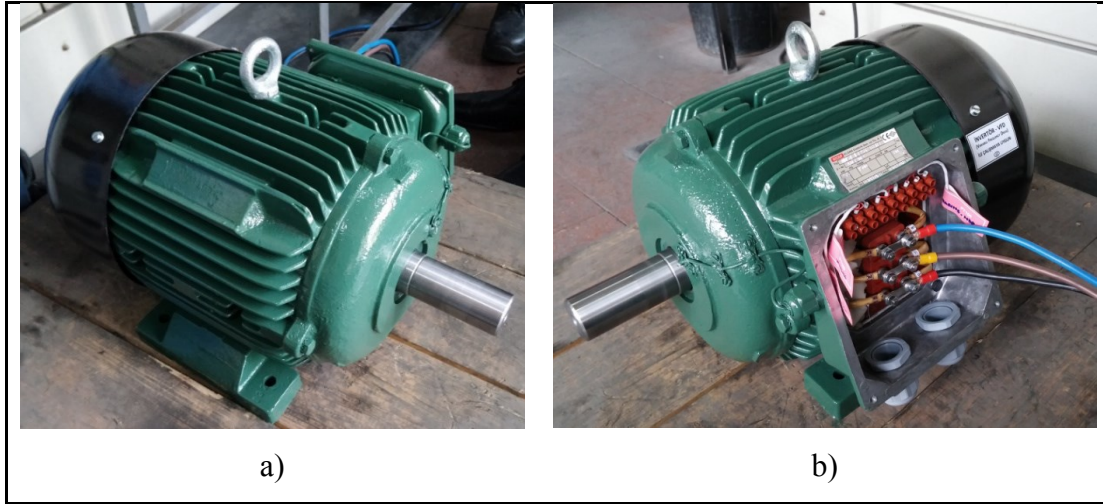


Şekil 7.11. 5,5 kW Asenkron elektrik motorunun montaj görüntüsü [168].

Çizelge 7.9. 5,5 kW asenkron motora ait montaj elemanları

5,5 kW Asenkron Elektrik Motoruna Ait Montaj Elemanları			
1	Dış Bilya Kapağı	11	Gövde
2	İç Bilya Kapağı	12	Ayak
3	Ön Kapak	13	Pervane
4	Arka Kapak	14	Pervane Muhafaza Tası
5	B5-Flanş	15	Klemens Kutusu Kapağı
6	Kama	16	Klemens Kutusu
7	Mil	17	Rulman
8	Rotor Sac Paketi	18	Askı Halkası
9	Stator Sac Paketi	19	Kablo Rakoru
10	Stator Sargıları	20	Klemens Tablası

Elektrik motorunun montaj işlemi yapıldıktan sonra gövdelere boyama işlemi yapılmıştır. Böylelikle, stator yapıları farklı kesme yöntemleri ile üretilen asenkron elektrik motorları, verimlilik testlerinin yapılabilmesi için hazır hale getirilmiştir (Resim 7.15).



Resim 7.15.a) Üretimi tamamlanmış asenkron motor, b) Motor bağlantı kutusu

Tüm kesim yöntemlerine göre üretilen 5,5 kW asenkron motorlarla ilgili yapılan işlemler Çizelge 7.10'da özetlenmiştir.

Çizelge 7.10. 5,5 kW asenkron motor için yapılan işlemler

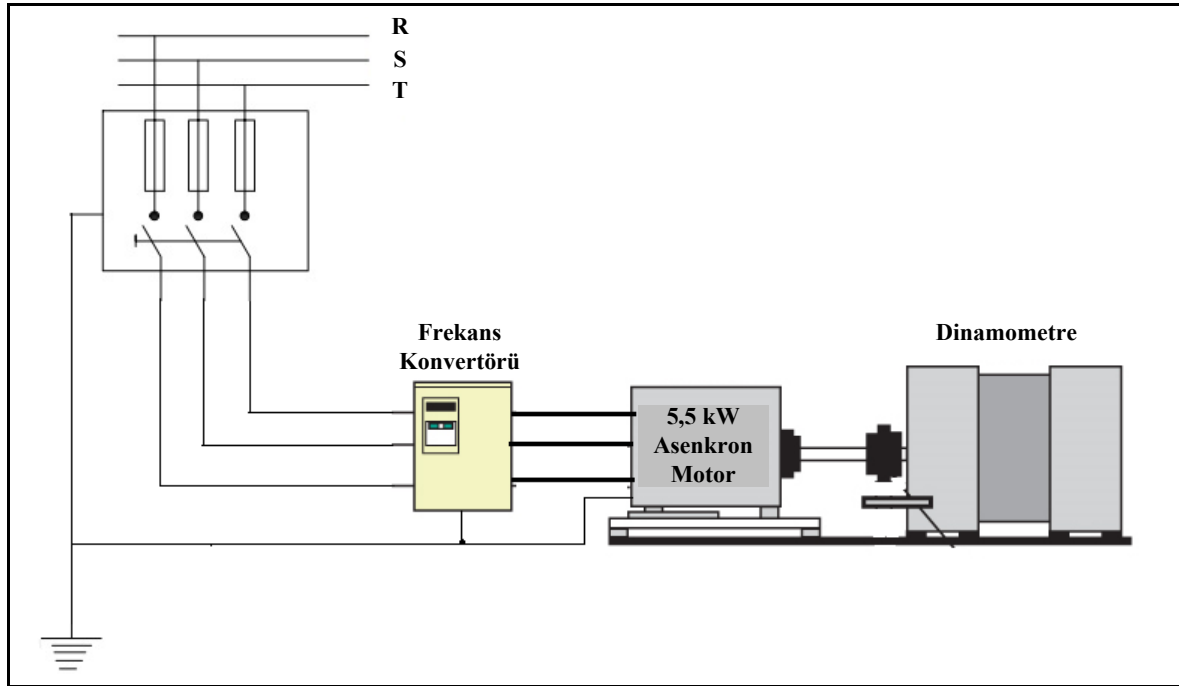
5,5 kW Asenkron Motor İçin Kullanılan Malzemeler	Lazer	Aşındırıcılı Su Jeti	Tel Erezyon	Kesme Kalıbı
1 Dış Bilya Kapağı	√	√	√	√
2 İç Bilya Kapağı	√	√	√	√
3 Ön Kapak	√	√	√	√
4 Arka Kapak	√	√	√	√
5 B5-Flanş	√	√	√	√
6 Kama	√	√	√	√
7 Mil	√	√	√	√
8 Rotor Sac Paketi	√	√	√	√
9 Stator Sac Paketi	X	X	X	X
10 Stator Sargıları	√	√	√	√
11 Gövde	√	√	√	√
12 Ayak	√	√	√	√
13 Pervane	√	√	√	√
14 Pervane Muhafaza Tası	√	√	√	√
15 Klemens Kutusu Kapağı	√	√	√	√
16 Klemens Kutusu	√	√	√	√
17 Rulman	√	√	√	√

Çizelge 7.10. (Devam) 5,5 kW asenkron motor için yapılan işlemler

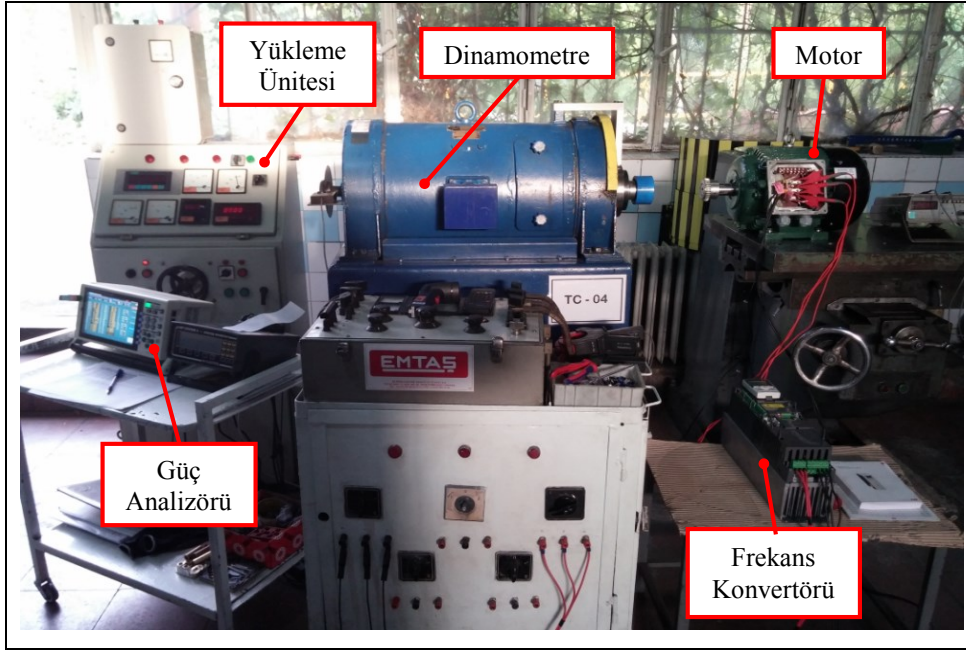
18	Askı Halkası	√	√	√	√
19	Kablo Rakoru	√	√	√	√
20	Klemens Tablası	√	√	√	√

7.9. Test Düzenine Hazırlanması

Test düzeneği, motor verimliliklerinin ölçülmesi için hazırlanan ve standartlarda belirtilen doğrudan (TS EN 60034-2-1-1A) ve kayıpların toplanması (TS EN 60034-2-1-1B) yöntemleri dikkate alınarak hazırlanmıştır. Doğrudan ölçme yöntemi için Elsan Elektrik Sanayii ve Ticaret A.Ş.'de bulunan ve şebeke kaynağından besleme gerilimi ile (R-S-T), frekans konvertörü, motor, dinamometre ve yükleme ünitesi bağlantıları yapılarak test düzeneği hazırlanmıştır (Şekil 7.12), (Resim 7.16).



Şekil 7.12. Asenkron motor test düzeneğinin şematik görünümü (doğrudan ölçme)



Resim 7.16. Asenkron motor deney düzeneği (doğrudan ölçme)

Bu test yönteminde, motorun farklı frekanslarda sürülmesi esnasında oluşan toplam kayıpların ve verimliliğinin belirlenmesi için frekans konvertörü ve motor anma gücüne göre farklı yükleme oranları kullanılmıştır. Bu amaçla, doğrudan ölçüm yöntemi için Çizelge 7.11’de verilen dört farklı frekans ve beş farklı yükleme değerlerine göre test parametreleri belirlenmiştir.

Çizelge 7.11. Doğrudan ölçme yöntemine göre test parametreleri

Frekans (Hz)	Yüklem (%)
50–75–100–125	25–50–75–100–125

Kayıpların toplanması yöntemine göre motor verimliliğinin yanı sıra demir, sürtünme ve rüzgâr, ilave yük, stator ve rotor kayıplarının belirlenebilmesi için test parametreleri Çizelge 7.12’de verilen, 50 Hz frekans ve altı farklı yükleme değeri dikkate alınarak belirlenmiştir. Şebeke kaynağından sağlanan besleme gerilimi ile R-S-T, motor ve dinamometre bağlantısı frekans konvertörü kullanılmadan test düzeneği hazırlanmıştır.

Çizelge 7.12. Kayıpların toplanması ile ölçme yöntemine göre test parametreleri

Frekans (Hz)	Yüklem (%)
50	25–50–75–100–115–125

8. DENEY SONUÇLARI ve TARTIŞMA

Bu çalışmada, elektrik motorlarında kullanılan silisli stator saclar, lazer, aşındırıcılı su jeti, tel erezyon ve kesme kalıbı ile kesilerek, bu kesme yöntemlerinin elektrik motorlarının verimliliği üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Asenkron motorların verimliliği, kayıpların toplanması (TS EN 60034-2-1-1B) ve doğrudan ölçme (TS EN 60034-2-1-1A) yöntemleri dikkate alınarak belirlenmiştir. Kayıpların toplanması yönteminde, sabit 50 Hz frekans ve altı farklı yükleme oranları (% 25-50-75-100-115-125) kullanılarak, demir, sürtünme ve rüzgâr, stator, rotor ve ilave yük kayıplarına bağlı olarak motor verimliliği hesaplanmıştır. Doğrudan ölçme yönteminde ise frekans konvertörü yardımıyla dört farklı frekans (50-75-100-125 Hz) ve beş farklı yükleme oranı (% 25-50-75-100-125) kullanılarak motorların verimlilikleri belirlenmiştir.

Doğrudan ölçme yönteminde, giriş parametreleri motor frekansı ve yükleme oranı, çıkış parametreleri olarak verimlilik ve toplam kayıplar belirlenerek yapay sinir ağları ile tahmini matematiksel model geliştirilmiştir. Her bir kesme yöntemi için motor verimliliği ve toplam kayıplar üzerine, frekans ve yükleme oranının ne kadar etki ettiği ANOVA ile tespit edilmiştir. Ayrıca, Ansys Maxwell programı ile çıkış gücü ve motor hızının motor verimliliği üzerindeki etkileri analiz edilmiştir.

8.1. Kayıpların Toplanması Yöntemi ile Sonuçların Değerlendirilmesi

Lazer kesme yöntemi ile üretilen asenkron motor, 50 Hz frekans ve altı farklı yükleme oranına göre test edilmiştir. Her bir yükleme değerinden elde edilen test sonuçlarına göre, ilave yük, stator, rotor kayıplarının yanı sıra güç faktörü ve verimlilik değerleri hesaplanmıştır. Ancak, demir, sürtünme ve rüzgâr kayıpları yükten bağımsız olduğu için bu kayıplar yüksüz testler ile belirlenmiştir (Çizelge 8.1). TS EN 60034-2-1-1B standardına göre, sürtünme ve rüzgâr kayıplarının yanı sıra demir kayıplarının da yükten bağımsız olduğu ifade edilmiştir [156].

Çizelge 8.1. Lazer kesme yöntemine göre elde edilen sonuçlar

Lazer Kesme Yöntemine Göre Sonuçlar								
Yükleme Oranı	$P_{2,\theta}$	%	%25	%50	%75	%100	%115	%125
Çıkış Gücü	$P_{2,\theta}$	Watt	1603,70	3101,84	4543,16	5992,42	6852,31	7420,9
Giriş Gücü	$P_{1,\theta}$	Watt	2187	3723	5313	7053	8121	8850
Demir Kayıpları	P_{fe}	Watt	663,92	663,92	663,92	663,92	663,92	663,92
Sürtünme ve Rüzgâr Kayıpları	$P_{fw,\theta}$	Watt	10,46	10,46	10,46	10,46	10,46	10,46
İlave Yük Kayıpları	P_{LL}	Watt	33,44	133,78	301	535,11	707,62	836,11
Stator kayıpları	$P_{s,\theta}$	Watt	0,23	0,3	0,44	0,65	0,82	0,95
Rotor kayıpları	$P_{r,\theta}$	Watt	13,03	54,34	131,52	247,99	343,4	414,67
Güç Faktörü	$\cos \varphi$	%	0,428	0,638	0,754	0,817	0,845	0,854
Verimlilik	η	%	% 71,51	% 81,11	% 83,35	% 83,47	% 82,87	% 82,35

Çizelge 8.1'e göre, yüklem oranının artmasıyla ilgili olarak ilave yük, stator ve rotor kayıplarının yanı sıra güç faktörünün de arttığı gözlenmiştir. Nominal (% 100) yüklem değerinde motorun verimliliği % 83,47 olarak hesaplanmıştır. Yüksüz testlerde, sürtünme ve rüzgâr kayıpları 10,46 W, demir kayıpları ise 663,92 W olarak hesaplanmıştır. Asenkron motor, boşta çalıştırılırken statorun demir, rotorun ise sürtünme kayıplarını karşılaması için şebekeden akımın enerji bileşenini çekmektedir. Ayrıca, motorun boştaki güç katsayısı da düşüktür. Bu sebeple, demir kayıpları, gerilime bağlı olduğundan yükten bağımsız olduğu kabul edilmektedir. Sürtünme ve rüzgâr kayıpları da motor hızına bağlı olarak değiştiği için yükten bağımsız olduğu ifade edilmektedir [169].

Stator sac paketi, aşındırıcılı su jeti kesme yöntemi ile üretilen asenkron motor için yapılan testlerden elde edilen veriler Çizelge 8.2'de verilmiştir.

Çizelge 8.2. Aşındırıcılı su jeti ile kesme yöntemine göre elde edilen sonuçlar

Aşındırıcılı Su Jeti ile Kesme Yöntemine Göre Sonuçlar								
Yüklem Oranı	$P_{2,\theta}$	%	%25	%50	%75	%100	%115	%125
Çıkış Gücü	$P_{2,\theta}$	Watt	1620,89	3051,25	4486,37	5930,94	6761,9	7322,03
Giriş Gücü	$P_{1,\theta}$	Watt	2240	3717	5325	6999	8025	8740
Demir Kayıpları	P_{fe}	Watt	712	712	712	712	712	712
Sürtünme ve Rüzgâr Kayıpları	$P_{fw,\theta}$	Watt	15,37	15,37	15,37	15,37	15,37	15,37
İlave Yük Kayıpları	P_{LL}	Watt	27,01	109,23	244,89	436,93	576,17	681,24
Stator kayıpları	$P_{s,\theta}$	Watt	0,25	0,33	0,47	0,67	0,83	0,96
Rotor kayıpları	$P_{r,\theta}$	Watt	18,09	67,21	157,79	297,76	404,08	496,39
Güç Faktörü	$\cos \varphi$	%	0,416	0,61	0,731	0,799	0,825	0,84
Verimlilik	η	%	% 69,5	% 79,68	% 82,77	% 83,1	% 82,71	% 82,19

Çizelge 8.2’de yüksüz testler sonucunda demir kayıpları 712 W, sürtünme ve rüzgar kayıpları ise 15,37 W olarak hesaplanmıştır. Motor yükleme oranının artırılması ile ilave yük, stator ve rotor kayıpları ile güç faktörünün arttığı gözlenmiştir. Nominal yükleme değerinde ise motorun verimliliği, % 83,1 olarak hesaplanmıştır. En düşük motor verimliliği ise % 25 yükleme değerinde gerçekleşmiştir.

Çizelge 8.3’te, stator sac paketi, tel erezyon kesim yöntemi ile üretilen asenkron motor için yapılan testler sonucunda elde edilen veriler gösterilmiştir.

Çizelge 8.3. Tel erezyon kesme yöntemine göre elde edilen sonuçlar

Tel Erezyon Kesme Yöntemine Göre Sonuçlar								
Yükleme Oranı	$P_{2,\theta}$	%	%25	%50	%75	%100	%115	%125
Çıkış Gücü	$P_{2,\theta}$	Watt	1480,55	2963,86	4340,68	5860,07	6850,17	7293,69
Giriş Gücü	$P_{1,\theta}$	Watt	1974	3488	5031	6723	7785	8478
Demir Kayıpları	P_{fe}	Watt	552,91	552,91	552,91	552,91	552,91	552,91
Sürtünme ve Rüzgâr Kayıpları	$P_{fw,\theta}$	Watt	8,25	8,25	8,25	8,25	8,25	8,25
İlave Yük Kayıpları	P_{LL}	Watt	28,04	112,16	252,35	448,61	593,2	699,4
Stator kayıpları	$P_{s,\theta}$	Watt	0,17	0,24	0,37	0,57	0,72	0,84
Rotor kayıpları	$P_{r,\theta}$	Watt	11,35	48,86	172,94	225,96	317,82	379,94
Güç Faktörü	$\cos \phi$	%	0,441	0,655	0,770	0,831	0,852	0,858
Verimlilik	η	%	% 73,57	% 83,29	% 84,39	% 85,61	% 85,08	% 84,64

Çizelge 8.3’te, 50 Hz frekansta yapılan yüksüz testler sonucunda, demir kayıpları 552,91 W, sürtünme ve rüzgar kayıpları da 8,25 W olarak hesaplanmıştır. Artan yükleme oranlarına bağlı olarak ilave yük, stator ve rotor kayıplarının yanı sıra güç faktörünün de arttığı belirlenmiştir. Nominal yükleme durumunda, motorun verimliliği ise % 85,61 olarak hesaplanmıştır. Nominal yükleme oranına kadar motorun veriminin arttığı, ancak yük, stator ve rotor kayıplarındaki artışlardan dolayı yükleme oranının artırılması ile motorun verimliliği azalmaktadır.

Çizelge 8.4’te stator sac paketi, kesme kalıbı ile üretilen asenkron motor için yapılan testler sonucunda elde edilen veriler gösterilmiştir.

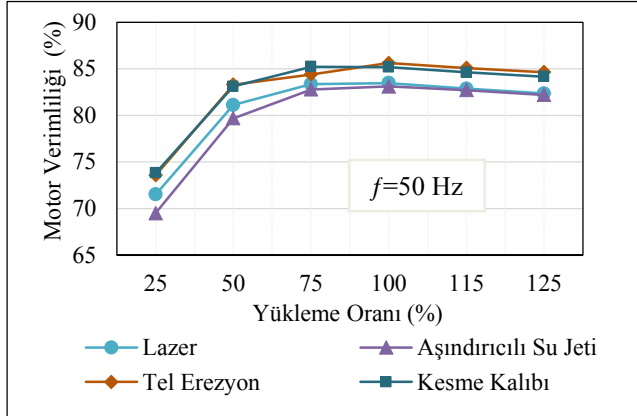
Çizelge 8.4. Kesme kalıbı ile kesme yöntemine göre elde edilen sonuçlar

Kesme Kalıbı ile Kesme Yöntemine Göre Sonuçlar								
Yükleme Oranı	$P_{2,\theta}$	%	%25	%50	%75	%100	%115	%125
Çıkış Gücü	$P_{2,\theta}$	Watt	1520,51	3003,32	4447,6	5889,3	6707,24	7340,45
Giriş Gücü	$P_{1,\theta}$	Watt	2005	3506	5094	6780	7845	8562
Demir Kayıpları	P_{fe}	Watt	562,25	562,25	562,25	562,25	562,25	562,25
Sürtünme ve Rüzgâr Kayıpları	$P_{fw,\theta}$	Watt	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89
İlave Yük Kayıpları	P_{LL}	Watt	29,62	118,6	266,75	473,88	627,24	741,08
Stator kayıpları	$P_{s,\theta}$	Watt	0,18	0,25	0,38	0,57	0,73	0,85
Rotor kayıpları	$P_{r,\theta}$	Watt	12,46	50,86	126,48	239,65	329,09	393,38
Güç Faktörü	$\cos \varphi$	%	0,436	0,657	0,768	0,829	0,852	0,859
Verimlilik	η	%	% 73,81	% 83,1	% 85,22	% 85,16	% 84,62	% 84,16

Çizelge 8.4’te, yüksüz testler sonucunda, demir kayıplarının 562,25 W, sürtünme ve rüzgar kayıpları da 0,89 W olarak hesaplanmıştır. Artan yüklem oranlarına bağlı olarak ilave yük, stator ve rotor kayıplarının yanı sıra güç faktörünün de arttığı belirlenmiştir. Nominal yüklem durumunda, motorun verimliliği ise % 85,16 olarak hesaplanmıştır. Nominal yüklem oranına kadar motorun veriminin arttığı, ancak yük, stator ve rotor kayıplarındaki artışlardan dolayı yüklem oranının arttırılması ile motorun verimliliği azalmaktadır.

Motorların verimliliği, giriş gücüne bağlı olarak çıkış gücü dikkate alınarak belirlenmektedir. Giriş ile çıkış gücü arasında oluşan farklar, toplam kayıplar olarak ifade edilmektedir. Silisli sacların farklı üretim yöntemlerinden dolayı, sac paketi üzerinde demir kayıpları meydana gelmektedir. Özellikle, sacı kesme işleminde, sac malzemenin kesme kenarında oluşan çapak, cüruf, yanma gibi istenmeyen durumlar sacların paketlenmesini olumsuz etkileyerek demir kayıplarının artmasına sebep olmaktadır. Demir kayıpları ise, sac paketi üzerinde kısa devre yollarını meydana getirerek, motor verimliliğini olumsuz etkilemektedir [170].

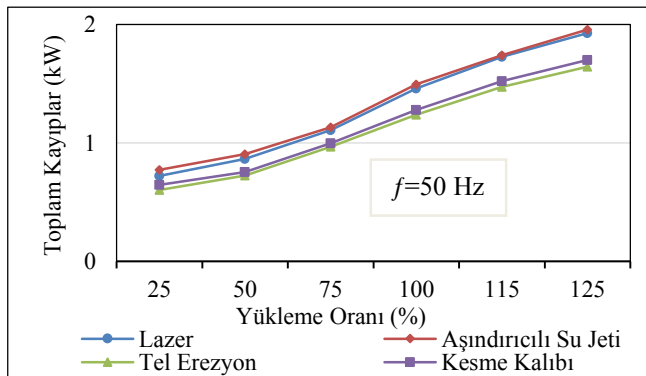
Şekil 8.1’de, kesme yöntemlerine göre yüklem oranının asenkron motorun verimliliği üzerindeki etkisini gösteren grafik verilmiştir. Sabit 50 Hz frekans ve altı farklı yüklem (% 25-50-75-100-115-125) oranında kullanılarak motor verimliliği için değerlendirmelerde bulunulmuştur.



Şekil 8.1. Kesme yöntemlerine göre motor verimlilikleri

Şekil 8.1’de de görüldüğü gibi, nominal yüklem oranına kadar tüm kesme yöntemlerinde motor verimliliğinin arttığı, ancak nominal yüklem değerinin üzerindeki yüklemelerde verimliliğin azaldığı tespit edilmiştir. Nominal yüklem değerinde sırasıyla motor verimlilikleri; tel erezyonda % 85,61, kesme kalıbında % 85,16, lazerde % 83,47 ve aşındırıcılı su jetinde ise % 83,1 olarak ölçülmüştür. Elektrik motorlarının tasarımı, nominal yükte en yüksek verim elde edilecek şekilde yapılmaktadır. Nominal yük değerinin üzerinde yüklem yapıldığında, güç elde etmek için motor zorlanmaya başlamaktadır. Stator sargıları nominal yüke göre akım geçişi olacak şekilde tasarlandığı için stator kayıpları nominal yüke göre daha fazla olmaktadır. Dolayısı ile motorun verimliliği de azalmaktadır.

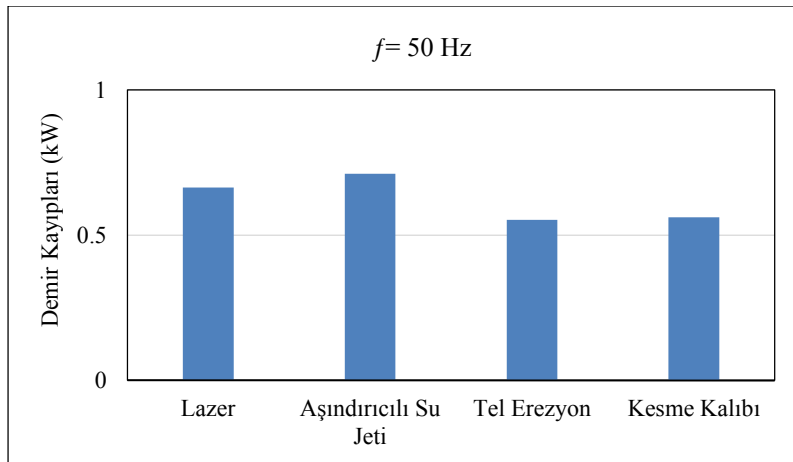
Şekil 8.2’de, 50 Hz frekans değerinde kesme yöntemlerine göre, farklı yüklem oranlarının toplam kayıplar üzerindeki etkisini gösteren grafik verilmiştir. Toplam kayıplar, motorda oluşan demir, sürtünme ve rüzgar, stator, rotor ve ilave yük kayıplarının toplamı olarak belirlenmiştir.



Şekil 8.2. Kesme yöntemlerine göre toplam kayıplar

Şekil 8.2’de, artan yükleme oranlarına göre tüm kesme yöntemlerinde toplam kayıpların arttığı görülmektedir. Aşındırıcılı su jeti ile üretilen motorda oluşan toplam kayıpların diğer kesme yöntemlerine göre daha fazla olduğu gözlenmiştir. Nominal yükleme oranında oluşan toplam kayıplar dikkate alındığında, aşındırıcılı su jetinde 1,46 kW, lazer kesimde 1,45 kW, kesme kalıbında 1,27 kW, tel erezyonda ise 1,23 kW olarak hesaplanmıştır.

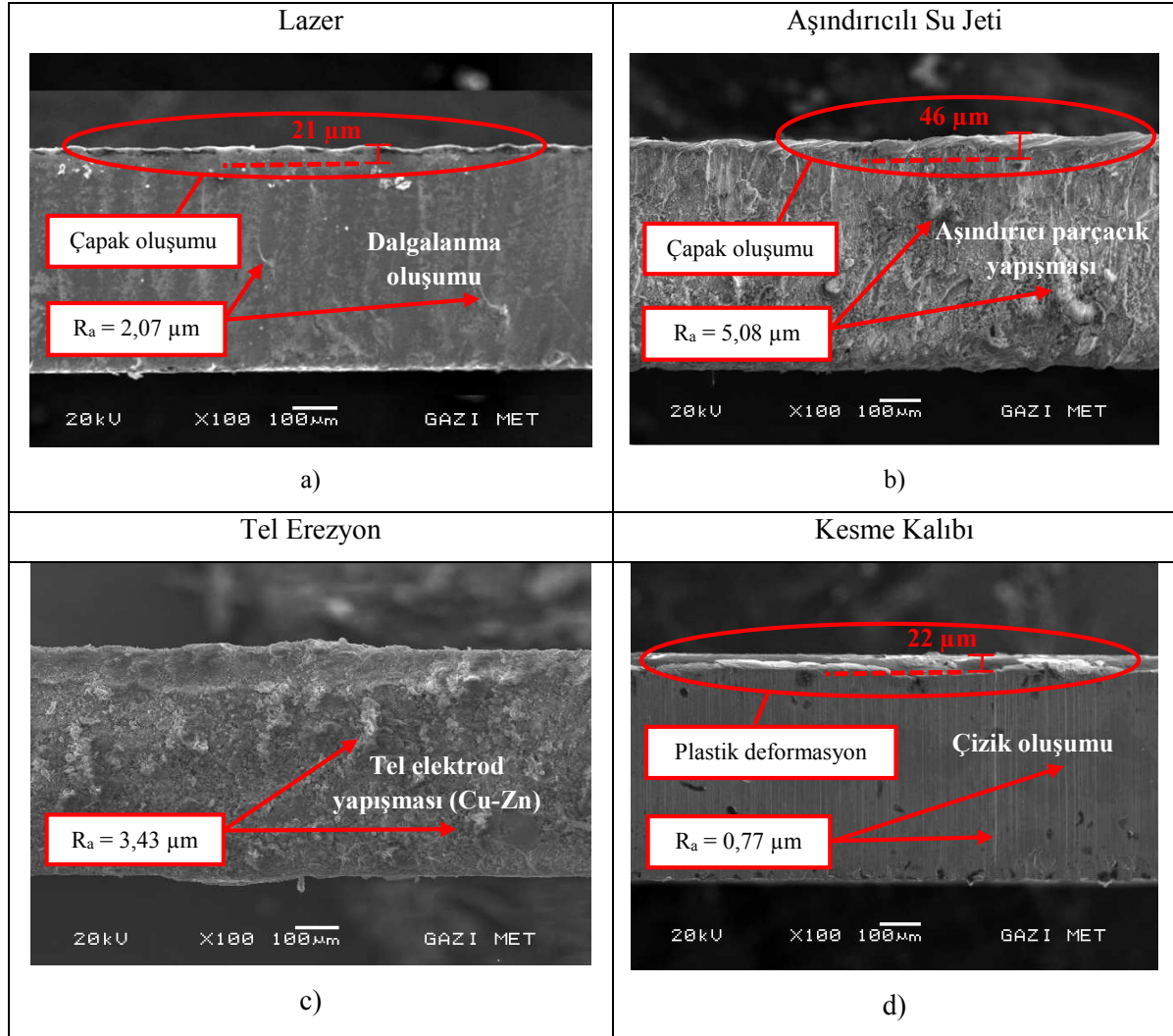
Stator sacların farklı yöntemler ile kesilmesi esnasında kesme kenarında termal etkiler ve plastik deformasyonlardan dolayı çapak oluşumu gözlenmektedir. Bu durum, silisli sacların paketlenmesini zorlaştırarak demir kayıplarının artmasına ve dolayısı ile kısa devre yollarının oluşmasına sebep olmaktadır. Kesme yöntemlerinden kaynaklanan bu olumsuz durumlar, en aza indirgenerek manyetik özelliklerdeki kayıpların kısmen de olsa önüne geçilmesi gerekmektedir. Aksi takdirde, manyetik kayıplar motor verimliliğinin azalmasına sebep olacaktır. Toplam kayıplar içerisindeki demir kayıpları, çoğunlukla silisli sacların kesme yöntemlerinden veya bu sacların paketlenmesi esnasında oluşan imalat hatalarından kaynaklanmaktadır. Dolayısı ile imalat sürecinden kaynaklanan bu kayıplar, elektrik motorlarının verimliliğini olumsuz etkilemektedir. Şekil 8.3’te, 50 Hz frekans değerinde, silisli stator sacların farklı kesme yöntemleri ile üretilmesi sonucunda motorlarda oluşan demir kayıpları verilmiştir.



Şekil 8.3. Farklı kesme yöntemlerine göre motorlarda oluşan demir kayıpları

Şekil 8.3’e göre en fazla demir kayıpları, aşındırıcılı su jeti ile kesme yönteminde 0,712 kW, en az demir kayıpları ise 0,553 kW ile tel erezyon ile üretilen motorda oluşmuştur. Çapak oluşumunun demir kayıpları üzerindeki etkisi dikkate alındığında, Resim 8.1’de,

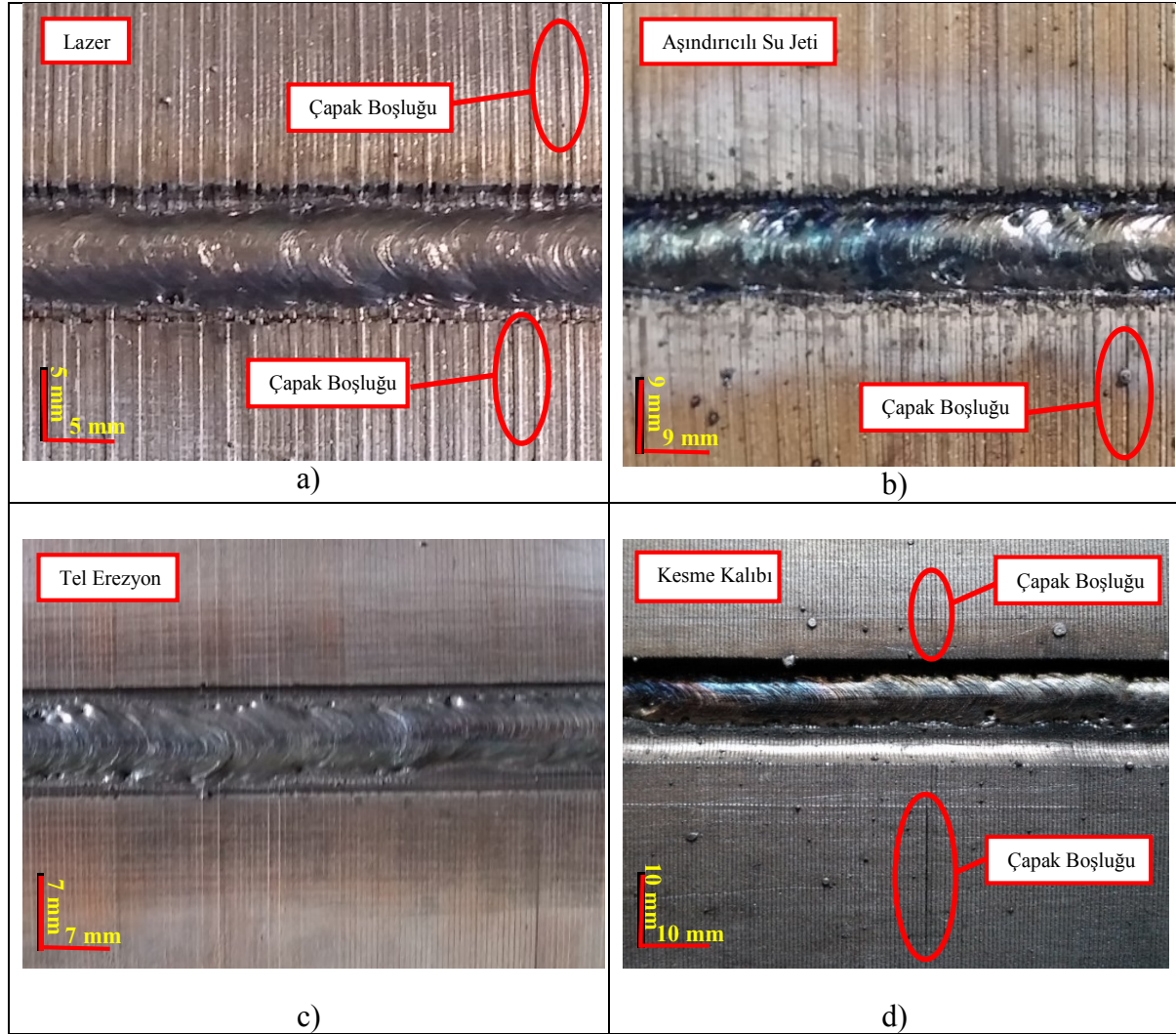
silisli stator sacların farklı kesme yöntemleri ile kesilmesi esnasında oluşan yüzey durumları gösterilmiştir.



Resim 8.1. Lazer, aşındırıcılı su jeti, tel erezyon ve kesme kalıbı ile silisli stator saclarının kesilmesi esnasında kesme kenarında oluşan yüzey durumu

Resim 8.1-a’da görüldüğü gibi lazer kesme yönteminde, ısı etkisine bağlı olarak kesme bölgesinde eriyen malzeme, yeniden katılaşıp çapak şeklini aldığı gözlenmiştir. Bu çapak oluşumu ise stator sacların üst üste dizilerek paketlenmesi esnasında, saclar arasında boşlukların oluşmasına neden olmaktadır (Resim 8.2-a). Bu durum ise manyetik akı yollarının değişimine sebep olduğu için demir kayıpların artmasına sebep olmaktadır. Kesme anında malzemede oluşan kısmi erime, kesilen kenarın sertliğinin yanı sıra mikroyapıda değişikliklere sebep olabilmektedir. Bu değişiklikler, demir kayıplarının artmasına bağlı olarak motorların verimliliğini azaltıcı bir etkiye sebep olmaktadır [16]. Daha yüksek lazer gücü, yüksek kesme hızı ve kesme gazı (azot) basıncının artırılması ile

kesme bölgesinde oluşabilecek yüzey hataları en aza indirgenebilmektedir [171]. Böylelikle, termal etkiler kısmen kontrol altına alınarak silisli sacların manyetik özelliklerindeki azalmaların önüne geçilebilmektedir [38, 172, 49].



Resim 8.2. Silisli stator sacların paketlenmesi ile oluşan yüzey durumları; a) Lazer, b) Aşındırıcı su jeti, c) Tel erezyon, d) Kesme kalıbı

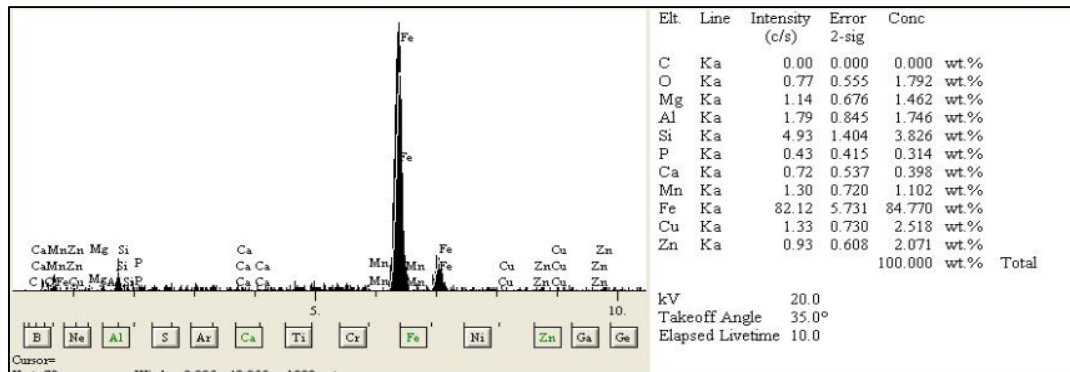
Tüm yöntemler ile kesilen 5-55-105-205-255'inci stator saclarına ait kesme kenarında oluşan ortalama yüzey pürüzlülükleri (R_a - μm), izleyici uçlu Mahr Perthometer yüzey pürüzlülüğü cihazı ile ölçülmüştür. Her bir parça için beşer adet ölçüm yapılmış ve ölçülen değerlerin aritmetik ortalaması alınarak yüzey pürüzlülükleri hesaplanmıştır (Çizelge 8.5).

Çizelge 8.5. Kesme yöntemlerine göre yüzey pürüzlülükleri

Stator Saclarının Kesim Sırası	Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü (Ra- μ m)			
	Lazer	Aşındırıcılı Su Jeti	Tel Erezyon	Kesme Kalıbı
5.Parça	2,127	5,474	3,382	1,046
55.Parça	2,749	6,243	3,006	0,699
105.Parça	1,846	5,218	3,546	0,506
155.Parça	2,341	6,356	3,645	0,971
205.Parça	1,747	5,677	3,375	0,685
255.Parça	1,642	6,066	3,631	0,721
Ortalama _{5,55,105,155,205,255}	2,075	5,083	3,430	0,771

Lazer kesme yöntemi ile stator saclarının kesilmesinde ölçülen ortalama yüzey pürüzlülüğü 2,075 μ m olarak ölçülmüştür. Kesilen yüzeyde, termal etkilere bağlı erimeden kaynaklanan dalgalanmalar meydana gelmektedir. Bu durum ise pürüzlülüğün artmasına sebep olmaktadır.

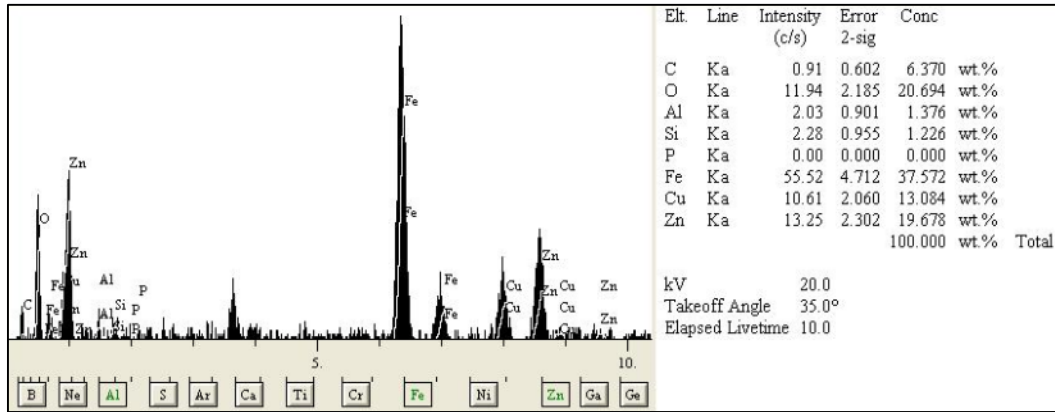
Aşındırıcılı su jeti ile kesme yöntemi, soğuk kesme işlemi olması açısından, kesme kenarında lazer kesme yönteminde olduğu gibi termal gerilmeler oluşmamaktadır. Ancak, üretilen stator saclarının kesme kenarında oluşan çapak miktarı, diğer kesme yöntemi ile üretilen saclara göre daha fazla olduğu gözlenmiştir (Resim 8.1-b). Bu durumun oluşmasında, aşındırıcı tane boyutu, kesme hızı ve nozul ile kesilen sac arasındaki mesafenin etkili olduğu düşünülmektedir. Ayrıca, aşındırıcılı su jeti ile kesilen stator saclarının ortalama yüzey pürüzlülüğü 5,083 μ m olarak ölçülmüştür. Küçük tane boyutuna sahip aşındırıcılar, yüzey pürüzlülüğünün artmasına sebep olmaktadır. Bu durum, aşındırıcı taneler arasındaki sınırların fazla olmasından kaynaklanmaktadır. Kesilen yüzey üzerinde çok sayıda pik noktası oluşmakta ve buna bağlı olarak yüzey pürüzlülüğü artmaktadır [173]. Ayrıca, kesme yüzeyine yapışan aşındırıcı parçacıkların da yüzey pürüzlülüğünün artmasında etkili olduğu düşünülmektedir (Şekil 8.4).



Şekil 8.4. Aşındırıcılı su jeti ile kesme yönteminde kesme yüzeyine ait EDS analizi

Nozul ile iş parçası arasındaki mesafenin artması, kesme basıncının azalmasına ve taneciklerin daha fazla alana yayılması ile çapak oluşumunun artmasına sebep olmaktadır. Yüksek kesme hızlarının seçilmesi de, aşındırıcı taneciklerin kesme bölgesinde plastik deformasyon oluşumunu hızlandırması çapak oluşumunda etkili olmaktadır (Resim 8.2-b). Düşük kesme hızları seçilerek bu durumun önüne geçilebilmektedir [174].

Motor verimliliği en yüksek olan tel erezyon kesme yönteminde, toplam kayıpların yanı sıra demir kayıpları açısından en az kayıpların oluştuğu belirlenmiştir. Resim 8.1-c’de tel erezyon kesme yöntemi ile kesilen silisli stator sac yüzeyinin gözenekli bir yapıya sahip olduğu görülmektedir. Kesme yüzeyinin gözenekli olması, bu işlemin uygulanması esnasında kullanılan bakır esaslı elektrot telin termal gerilmenin de etkisiyle katı halde çözünerek kesme yüzeyine yapışmasından kaynaklanmaktadır. Kesme yüzeyine yapışan Cu (bakır) ve Zn (Çinko) gibi elementleri içeren malzeme, iletken yapıya sahip olmasından dolayı sac paketlerin manyetik özelliklerini iyileştirici özelliğinin yanı sıra kesme kenarı sertliğinin azalmasına katkıda bulunmaktadır [32, 175, 176]. Silisli stator sacın kesilen yüzeyinde, bakır ve çinko malzemelerinin oranı sırasıyla, % 13,084 ve % 19,678 olarak ölçülmüştür (Şekil 8.5).



Şekil 8.5. Tel erezyon kesme yönteminde kesme yüzeyine ait EDS analizi

Tel erozyon ile kesilen stator sacları üzerinden yapılan ortalama yüzey pürüzlülüğü ölçümlerinde pürüzlülük 3,43 μm olarak belirlenmiştir (Çizelge 8.5). Pürüzlülük değerinin fazla olması, kesme esnasında termal etkiden dolayı tel elektrottan ayrılan parçaların tekrar katılarak kesme yüzeyine yapışmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Çapak oluşumu ise diğer kesme yöntemlerine göre daha az olduğu tespit edilmiştir. Dolayısı ile sac paketlerindeki, demir, stator ve rotor kayıpları en aza indirildiği için tel erezyon

kesme yöntemi ile üretilen asenkron motorun verimliliği, diğer üretilen motorlara göre daha yüksek çıkmıştır.

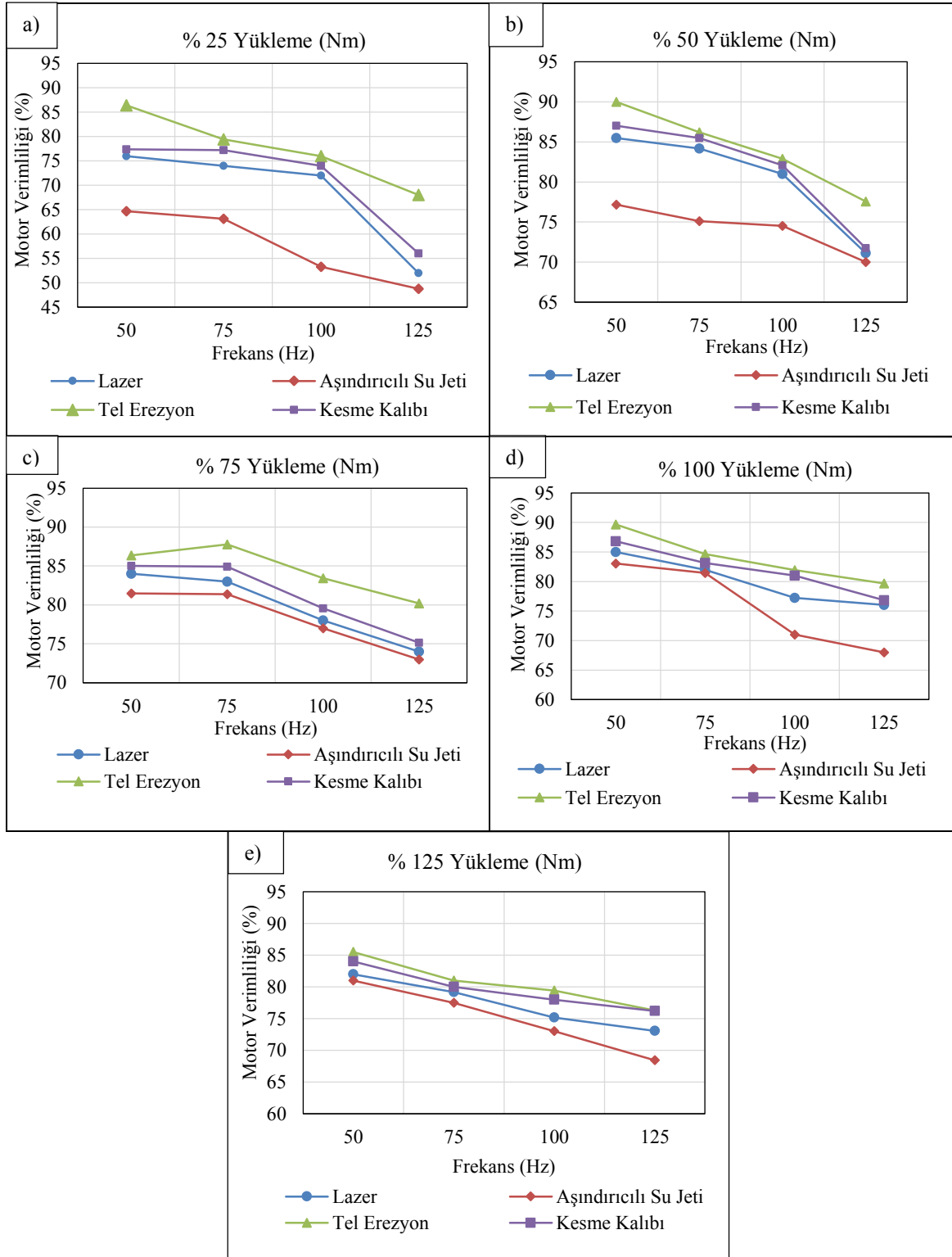
Nominal yükte, tel erezyon kesme yöntemi ile üretilen asenkron motordan sonra en iyi verimlilik sonuçları, kesme kalıbı ile üretilen motor ile elde edilmiştir. Buna bağlı olarak, tel erezyon kesme yönteminden sonra en az demir kayıpları, kesme kalıbı ile üretilen motorda gerçekleşmiştir (Şekil 8.3). Resim 8.1-d’de kesme kalıbı ile kesilen silisli sacın kesme kenarında, mekanik kesme gerilmelerine bağlı olarak plastik deformasyonun olduğu gözlenmiştir. Plastik deformasyon oluşumu, kesme kenarında silisli sacın mikro yapısında iç gerilmelere sebep olmaktadır. İç gerilmeler, silisli sacların manyetik özelliklerini olumsuz etkilemektedir [177]. Kesici zımbada oluşan aşınma, kesme işlemini zorlaştırarak plastik deformasyon oluşumunu hızlandırmaktadır. Kesici zımba aşınmasına bağlı olarak kesme kenarının alt bölgesinde çapak oluşumu gözlenebilmektedir. Çapak oluşumundan kaynaklanan ve silisli sacların paketlenmesinde saclar arasında oluşan boşluklar, demir kayıplarının artmasına sebep olmaktadır. Bu demir kayıpları ise sac paketi üzerinde kısa devrelerin oluşmasına bağlı olarak manyetik özelliklerin azalmasına sebep olmaktadır [47, 33]. Ayrıca, kalıp kesme boşluğu silisli sacların kesme kenarında oluşabilecek plastik deformasyon oluşumunu etkilemektedir. Kesme boşluğu ise iş parçası malzemesine ve kesilecek parça geometrisine göre değişmektedir. Buna göre, kesme zımbası ile silisli sacların kesilmesi esnasında kesici zımba kalitesinin ve kesme boşluğunun dikkate alınması gerekmektedir [178]. Silisli stator saclarının kesme kalıbı ile kesilmesi esnasında kesme zımbasının keskinliğinin yanı sıra kalıp kesme boşluğu, iş parçası malzemesi kalınlığı ve geometrisi dikkate alınarak deneme üretimleri ile belirlenmiştir. Buna göre, sac malzemenin kesme kenarında oluşabilecek plastik deformasyonlar, minimize edilerek sac paketinin manyetik özellikleri üzerinde oluşabilecek kayıpların önüne geçilebileceği öngörülmüştür. Böylelikle, manyetik kayıplar dikkate alınarak motor verimliliği üzerinde oluşabilecek olumsuz etkiler en aza indirgenmiştir.

Kesme kalıbı ile kesilen stator saclarının ortalama yüzey pürüzlülüğü, 0,77 μm olarak ölçülmüştür (Çizelge 8.5). Pürüzlülüğün oluşmasının sebebi, kesme işlemi esnasında kesme zımbası ile sac malzeme üzerinden kopan küçük partiküller, iş parçası ile kesici zımba arasına girerek sürtünmeden dolayı yüzeyde çiziklerin oluşmasından

kaynaklanmaktadır. Ancak, diğer kesme yöntemleri ile üretilen stator saclara göre kesilen yüzey kalitesinin daha iyi olduğu gözlenmiştir.

8.2. Doğrudan Ölçme Yöntemi ile Sonuçların Değerlendirilmesi

Şekil 8.6’da, doğrudan ölçme (TS EN 60034-2-1-1A) metoduna göre farklı yükleme değerlerinde (% 25-50-75-100-125) frekans değişimine (50-75-100-125 Hz) bağlı olarak motor verimliliğini gösteren grafikler verilmiştir.



Şekil 8.6. Farklı yükleme değerlerinde frekansa bağlı motor verimlilikleri, a) %25 yükleme, b) %50 yükleme, c) %75 yükleme, d) % 100 yükleme, e) % 125 yükleme

Şekil 8.6’da görüldüğü gibi motorların farklı oranlarda yüklenmesi sonucunda, frekans değerinin artmasına bağlı olarak motor verimliliğinin azaldığı gözlenmiştir. Motorlar açısından en iyi performans, 50 Hz frekans ve %100 yükleme değerlerinde elde edilmiştir. Bunun sebebi, motor tasarımlarının 50 Hz frekans ve tam yükleme değerlerine göre yapılmasıdır.

Kesme yöntemleri açısından değerlendirme yapıldığında, tüm yükleme ve frekans değerlerinde en iyi motor performansı sırasıyla tel erezyon, kesme kalıbı, lazer ve aşındırıcılı su jeti kesme yöntemi ile elde edilmiştir.

Tel erezyon kesme yöntemi ile silisli sacların kesilmesi esnasında, kesme kenarında çapak oluşumunun diğer kesme yöntemlerine göre çok az olduğu ve oluşan çapağın da tel elektrot yapısında bulunan bakır (Cu) ve Çinko (Zn) elementlerinin kesme yüzeyine yapışmasından kaynaklandığı düşünülmektedir [32, 175, 176]. Ayrıca, tel erozyonda çapak oluşumunun diğer kesme yöntemlerine göre az olması, demir kayıplarını azaltarak motor performansında olumlu sonuçların elde edilmesini sağlamıştır.

Aşındırıcılı su jeti ile kesme yönteminde motor verimliliğinin düşük olmasının bir sebebi de aşırı çapak oluşumudur. Bu durum, yüksek basınç altındaki aşındırıcı tanecikler ile suyun, kesme kenarında oluşturduğu plastik deformasyondan kaynaklandığı düşünülmektedir [174]. Kesme kenarında aşırı çapak oluşumu, silisli sacların paketlenmesini olumsuz etkilemesinin yanı sıra bu saclar arasında boşlukların oluşmasına ve bu boşluklara bağlı olarak demir kayıplarının artmasına sebep olmaktadır. Frekans değerinin artması ile motorun devir sayısı artmaktadır. Bu durum, motor sargılarında oluşan ısının artmasına ve dolayısı ile stator, rotor, ilave, sürtünme ve rüzgâr kayıplarının artmasına sebep olmaktadır. Bu kayıplar ise motorların doğrudan ölçme yöntemi ile test edilmesi esnasında toplam kayıplar olarak ortaya çıkmaktadır.

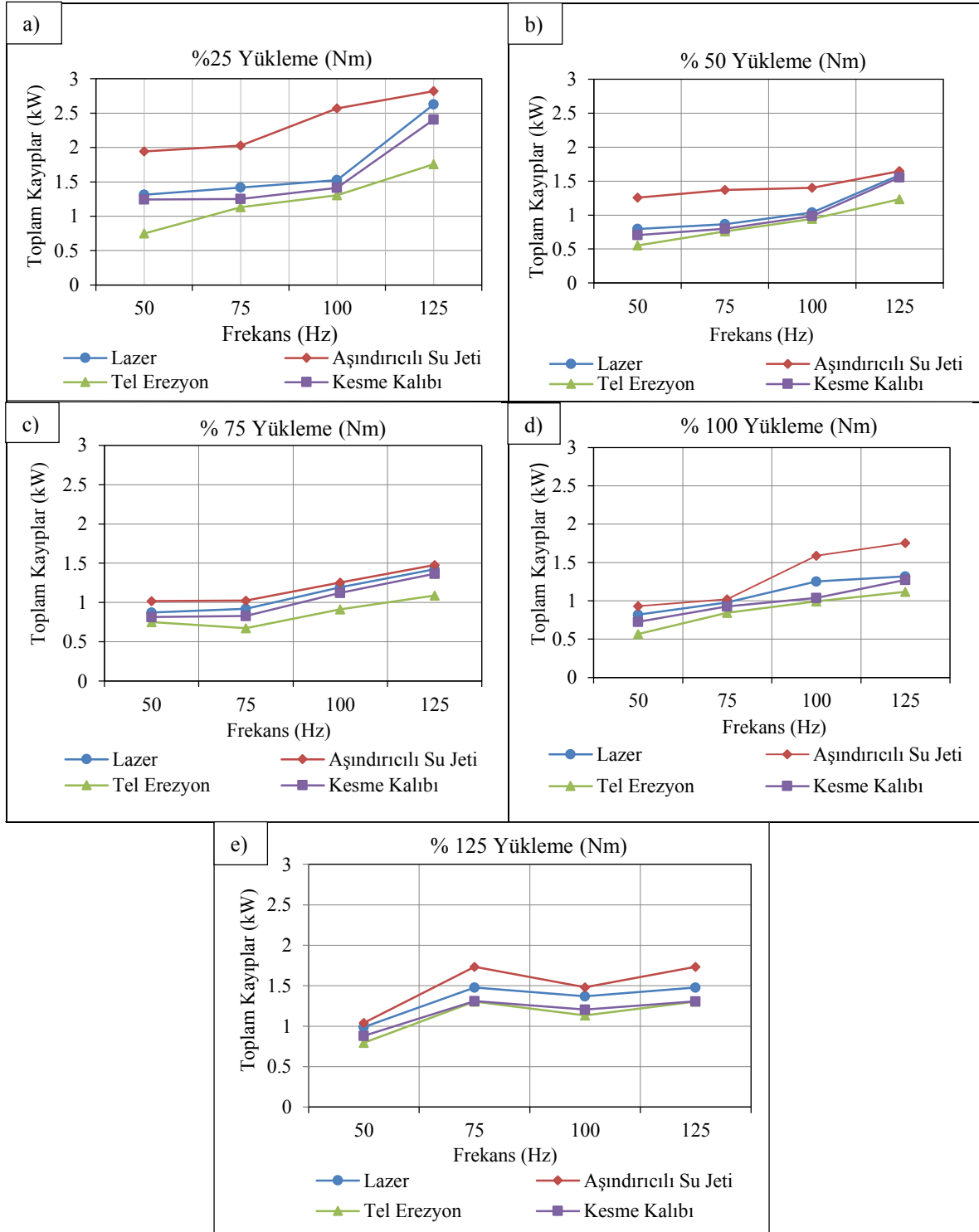
Motor performansı açısından tel erezyon kesme yönteminden sonra en iyi sonuçlar, kesme kalıbı ile elde edilmiştir (Şekil 8.6). Motor verimliliği değerlerinin tel erezyon ve kesme kalıbı ile üretilen motorlarda birbirine yakın olduğu belirlenmiştir. Tel erezyon kesme yönteminde olduğu gibi kesme kalıbı ile üretilen silisli saclarda da çapak oluşumunun çok az olduğu gözlenmiştir. Ancak, kesme kalıbı ile silisli sacların kesilmesi esnasında mekanik gerilmelere bağlı oluşan plastik deformasyonlar, bu sacların manyetik

özelliklerinin azalmasına sebep olmaktadır [173]. Manyetik özelliklerde meydana gelen azalmalar, özellikle frekans değerinin artması ile motorların performansını olumsuz etkilemektedir (Şekil 8.6).

Lazer ile kesme yönteminde, kesme bölgesinde termal etkiden dolayı eriyen malzeme, kenar alt bölgesinde tekrar katılaşarak çapak veya cüruf haline dönüşmektedir. Çapak oluşumu ise silisli sacların paketlenmesi esnasında saclar arasında boşlukların oluşmasına ve bu boşluklar ise demir kayıplarının artmasına sebep olmaktadır [16]. Frekans değerinin artması ile oluşan bu demir kayıpları daha da belirgin hale gelerek motor verimliliğinin azalmasına sebep olmaktadır (Şekil 8.6).

Elektrik motorları, günümüzde 50 Hz frekans ve % 100 yükte maksimum verim elde edilebilecek şekilde üretilmektedir. Şekil 8.6-d'de görüldüğü gibi 50 Hz frekans ve nominal yükleme değerlerinde elde edilen motor verimliliklerinin sırasıyla, tel erezyon kesme yönteminde % 89,68, kesme kalıbında % 86,81, lazerde % 85 ve aşındırıcılı su jetinde % 83,1 olduğu belirlenmiştir. 50 Hz frekans değerinde % 25 yükleme yapıldığında motor verimlilikleri sırasıyla, tel erezyon kesim yönteminde % 86,4, kesme kalıbında % 77,4, lazerde % 76,1 ve aşındırıcılı su jetinde % 64,6 olarak ölçülmüştür (Şekil 8.6-a). Tam yükleme oranına göre motor verimliliğindeki azalmanın sebebi, motorların mevcut kapasitesinin altındaki değerlerde yeterli gücü üretememesinden kaynaklanmaktadır. 50 Hz frekans ve %125 yükleme değerlerinde ise motorların verimlilikleri sırasıyla, tel erezyonda % 85,5, kesme kalıbında % 84, lazerde % 82 ve aşındırıcılı su jetinde % 81 olarak ölçülmüştür (Şekil 8.6-e). Nominal yüke göre motor verimliliklerindeki azalmanın sebebi, motorun nominal çalışma kapasitesinin üzerinde yapılan yüklemekten kaynaklanmaktadır. Ayrıca, motorun aşırı yüklenmesi stator sargılarında oluşan ısının artmasına, dolayısı ile kayıpların artmasına sebep olmaktadır.

Şekil 8.7'de, farklı yükleme değerlerinde frekans değişimine bağlı olarak elektrik motorlarında oluşan toplam kayıpları gösteren grafikler verilmiştir.



Şekil 8.7. Farklı yükleme değerlerinde frekans değişimine bağlı toplam kayıplar, a) %25 yükleme, b) %50 yükleme, c) %75 yükleme, d) %100 yükleme, e) %125 yükleme

Şekil 8.7’de görüldüğü gibi, tüm yükleme oranlarında, frekans değerinin artmasına bağlı olarak motorda oluşan toplam kayıplar arttığı gözlenmiştir. Toplam kayıplar, demir, sürtünme ve rüzgâr, ilave yük, stator ve rotor kayıplarından oluşmaktadır. Toplam kayıplar içerisinde bulunan demir kayıpları ise elektrik motorlarının imalat işlemlerine bağlı olarak değişmektedir. İmalat işlemleri içerisinde yer alan silisli sac kesme yöntemleri, demir kayıplarının belirlenmesinde önemli rol oynamaktadır. Mekanik imalat işlemlerinin hassas bir şekilde gerçekleştirilerek demir kayıplarının en aza indirgenmesi amaçlanmaktadır.

Ölçümler sonucunda, motorlarda oluşan toplam kayıplar, 50 Hz frekans ve nominal yükleme değerlerinde en az olduğu belirlenmiştir. Motorların elektromekanik tasarımlarının bu değerlere göre yapılması, toplam kayıpların azalmasında önemli bir etkindir.

Kesme yöntemleri açısından değerlendirme yapıldığında, tüm yükleme ve frekans değerlerinde oluşan toplam kayıplar, en az tel erezyon kesme yönteminde olmak üzere sırasıyla kesme kalıbı, lazer ve aşındırıcılı su jeti ile oluştuğu gözlenmiştir (Şekil 8.7).

Tel erezyon kesme yöntemi ile silisli sacların kesilmesi esnasında çapak miktarının çok az miktarda olması, diğer kesme yöntemlerine göre toplam kayıpların en az olmasında en önemli etken olmuştur. Çapak oluşumu ise paketlenmiş stator sac paketinde saclar arasında kısa devre akımlarının oluşmasına sebep olmaktadır [179]. Bu sebeple, silisli sacların paketlenmesi esnasında, saclar arasında çaptan dolayı oluşabilecek boşlukların kısmen önüne geçilerek manyetik demir kayıplarının azaltılması amaçlanmaktadır.

Aşındırıcılı su jeti ile kesme yönteminde oluşan toplam kayıpların diğer kesme yöntemlerine göre daha fazla olduğu gözlenmiştir. Silisli sacların kesilmesi esnasında, kesme kenarında aşırı çapak oluşumu (Resim 8.1-b), sacların preslenerek paketlenmesi esnasında bu saclar arasında boşlukların (Resim 8.2-b) oluşmasına sebep olmaktadır. Bu boşluklar, kısa devre oluşumundan dolayı akı yollarının değişimine, dolayısı ile sargılarda oluşan ısıнын artmasına bağlı olarak demir kayıplarının artmasına sebep olmaktadır (Şekil 8.3), [24]. Frekans değerinin artması, motorun daha yüksek devirlerde çalışmasını gerektirdiğinden, manyetik kayıplar doğrudan ölçüm yöntemi ile daha belirgin bir şekilde ortaya çıkmaktadır (Şekil 8.7).

Tel erezyon kesme yönteminden sonra en az toplam kayıplar, kesme kalıbı ile üretilen elektrik motorunda ölçülmüştür (Şekil 8.7). Tel erezyon ve kesme kalıbı ile motorlarda oluşan toplam kayıplar, birbirine çok yakın değerlerde olduğu gözlenmiştir. Kesme kalıbı ile silisli stator saclarının kesilmesi esnasında, çapak oluşumunun çok az olduğu, ancak kesme zımbasının malzemeye girişi esnasında oluşan plastik deformasyon etkisinden mekanik kalıntı gerilmeler meydana gelmektedir. Kesme kenarında oluşan bu gerilmeler ise toplam kayıpların artmasına sebep olmaktadır [48, 180].

Lazer ile silisli sacların kesilmesinde, kesme kenarında oluşan termal gerilmelere bağlı olarak silisli sacların mikro yapısında, kenar sertliğinde ve tane boyutunda artış, faz dağılımında ise düzensizlikler meydana gelmektedir. Oluşan bu değişiklikler ise silisli sacların manyetik özelliklerini olumsuz etkilemektedir. Ayrıca, kesme anında ısı etkisiyle eriyen malzeme, kesme kenarında tekrar katılaşma eğilimine girerek çapak oluşumuna sebep olmaktadır [181]. Lazer kesme yöntemi sonucunda oluşan bu olumsuz etkenler, elektrik motorlarında toplam kayıpların artmasına sebep olmaktadır. Özellikle, frekans değerinin artması ile motorlarda oluşan toplam kayıplar daha da artmaktadır (Şekil 8.7).

Elektrik motorlarından 50 Hz frekans ve tam yük değerlerinde maksimum verim elde edilebilmesi için manyetik kayıplar en aza indirgenecek şekilde tasarlanmaktadır. Şekil 8.7-d’de görüldüğü gibi, 50 Hz ve tam yükleme değerinde, toplam kayıplar diğer yükleme değerlerine göre daha az olmuştur. Yapılan ölçüm sonuçlarına göre toplam kayıplar sırasıyla, tel erezyon kesme yöntemi ile 0,567 kW, kesme kalıbı ile 0,725 kW, lazer ile 0,82 kW ve aşındırıcılı su jeti ile üretilen motorda 0,931 kW olarak ölçülmüştür. 50 Hz frekans değerinde % 25 yükleme yapıldığında sırasıyla, tel erezyon kesme yöntemi ile 0,747 kW, kesme kalıbı ile 1,243 kW, lazer ile 1,314 kW ve aşındırıcılı su jeti ile üretilen motorda ise toplam kayıplar 1,942 kW olarak ölçülmüştür. 50 Hz frekans değerinde % 125 yükleme yapıldığında sırasıyla, tel erezyon kesme yöntemi ile 0,796 kW, kesme kalıbı ile 0,878 kW, lazer ile 0,989 kW ve aşındırıcılı su jeti ile üretilen motorda oluşan toplam kayıplar 1,042 kW olarak ölçülmüştür.

8.3. Elektrik Motor Test Sonuçlarının YSA ile Analizi ve Değerlendirilmesi

8.3.1. Ağ yapısının oluşturulması

Yapay sinir ağları, literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde birçok mühendislik alanlarının yanı sıra istatistik alanında elde edilen verilerin değerlendirilmesinde kullanılmaktadır. Yapay sinir ağları, zaman ve maliyet açısından olumlu sonuçların elde edilmesine katkıda bulunmaktadır. Bu yöntem sonucunda elde edilen veriler ile deneysel çalışma sonucunda elde edilen veriler arasındaki hata oranının yapılan çalışmalarda, genellikle çok az olduğu tespit edilmiştir.

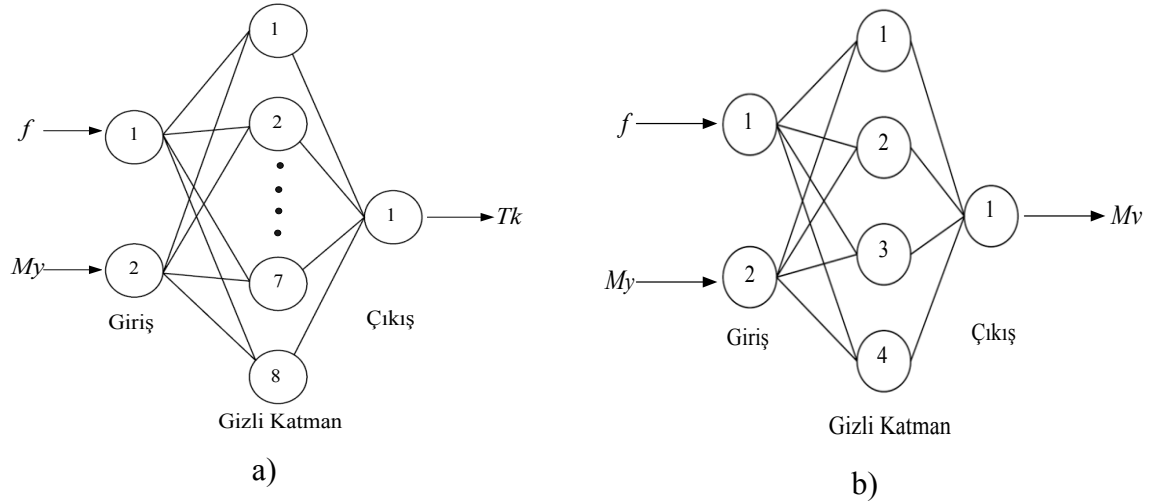
Toplam kayıplar ve motor verimliliği için YSA modellemesi, MATLAB yazılımında alt program yazılarak gerçekleştirilmiştir. MATLAB yazılımında, YSA ile modelleme işlemi, eğitim ve test süreci olmak üzere iki aşamadan oluşmaktadır. Eğitim sürecinde hata değerinin en aza indirgenmesi için ağa verilen girdi ve çıktı değerlerinin kontrol edilmesi sağlanır. Test aşamasında ise ağırlık değerleri değiştirilmeden giriş değerlerine göre sonuçların tahmin edilmesi sağlanmıştır.

Stator sac paketleri, kesme yöntemlerine göre her bir asenkron motor için frekans ve yükleme değerlerine bağlı olarak testler sonucunda ölçülen toplam kayıplar ve motor verimliliği, ayrı ayrı ileri beslemeli (Generalized Feed Forward) ağ yapısına göre YSA ile analiz edilmiştir. Bu yazılımda, frekans ve motor yükleme oranı giriş parametresi, toplam kayıplar ve motor verimliliği ise çıkış parametreleri olarak belirlenmiştir.

Farklı kesme yöntemleri ile üretilen her bir asenkron motordan elde edilen 13 adet deneysel veri, YSA'da eğitilmesi için seçilmiş, geri kalan diğer 7 veri ise MATLAB yazılımında test verisi olarak kullanılmıştır. Giriş ve çıkış verileri yazılıma aktararak matematiksel model için en uygun ağ yapısının belirlenmesi sağlanmıştır. En uygun ağ yapısının analizi ise giriş ve çıkış değerleri aracılığı ile denemeler yapılarak belirlenmiştir.

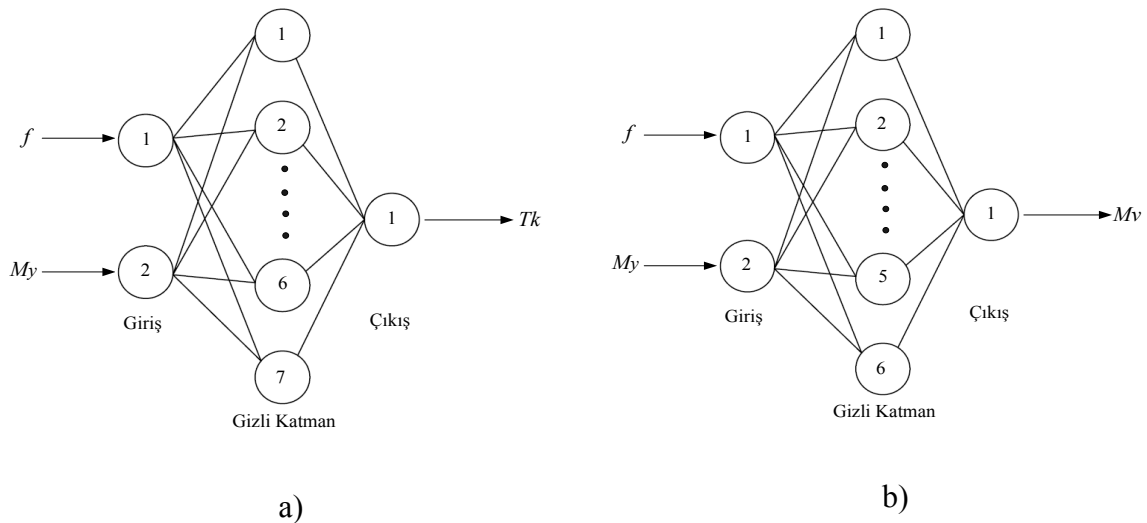
Lazer kesme yöntemi ile üretilen motorda oluşan toplam kayıpların YSA ile modellenmesinde en uygun ağ yapısı 2-8-1 olarak belirlenmiştir (Şekil 8.8-a). Motor verimliliği için en uygun ağ yapısı ise 2-4-1 olarak belirlenmiştir (Şekil 8.8-b). Buna göre, toplam kayıpların (Tk) modellenmesi için frekans (f) ve yükleme oranı (My) olmak üzere

iki adet girdi, gizli katmanda sekiz adet nöron ve bir adet çıktı (toplam kayıplar) parametresi kullanılmıştır. Motor verimliliği (Mv) için, iki adet girdi (frekans ve yükleme oranı), gizli katmanda dört adet nöron ve bir adet çıktı (motor verimliliği) parametresi belirlenmiştir.



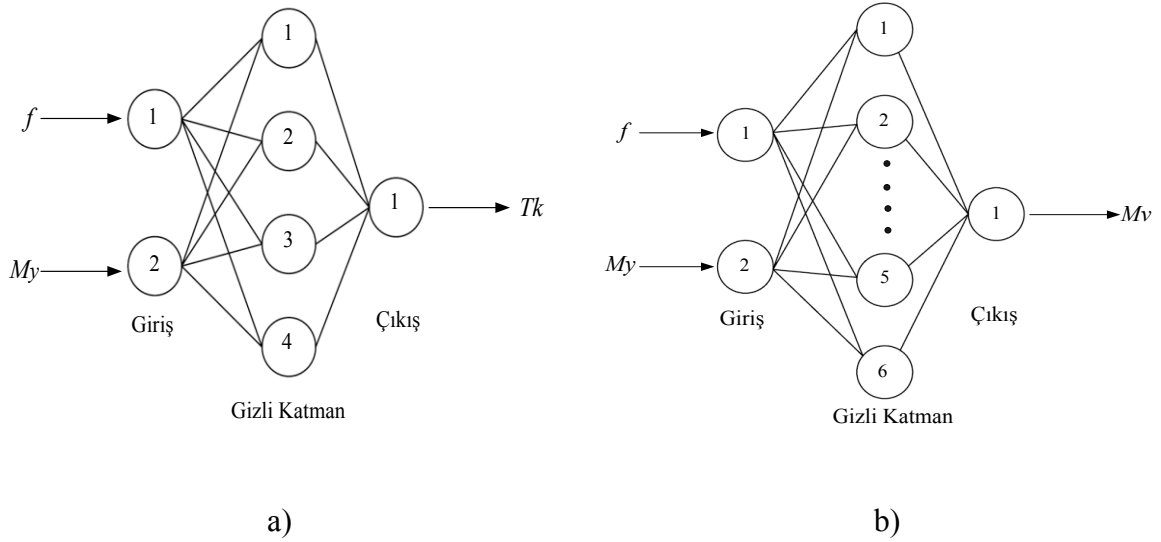
Şekil 8.8. Lazer kesme yöntemine ait ağ yapısı, a) Toplam kayıplar, b) Motor verimliliği

Aşındırıcılı su jeti ile üretilen motorda oluşan toplam kayıpların YSA ile modellenmesinde en uygun ağ yapısı 2-7-1 olarak belirlenmiştir (Şekil 8.9-a). Motor verimliliği için en uygun ağ yapısı ise 2-6-1 olarak belirlenmiştir (Şekil 8.9-b). Buna göre, toplam kayıpların modellenmesi için iki adet girdi, gizli katmanda yedi adet nöron ve bir adet çıktı parametresi kullanılmıştır. Motor verimliliği için, iki adet girdi, gizli katmanda altı adet nöron ve bir adet çıktı parametresi belirlenmiştir.



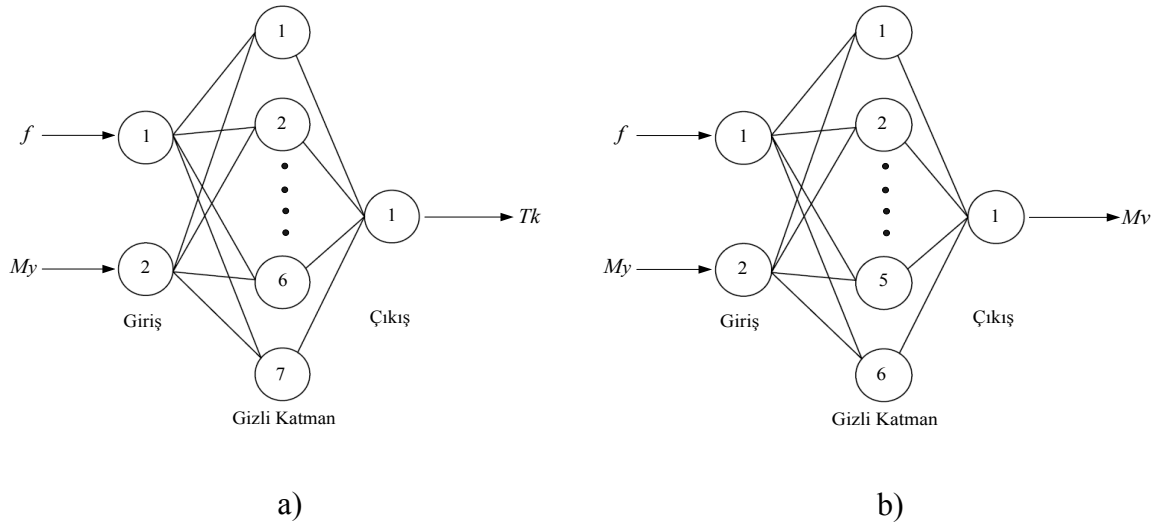
Şekil 8.9. Aşındırıcılı su jeti kesme yöntemine ait ağ yapısı, a) Toplam kayıplar, b) Motor verimliliği

Tel erezyon ile üretilen motorda oluşan toplam kayıpların YSA ile modellenmesinde en uygun ağ yapısı 2-4-1 olarak belirlenmiştir (Şekil 8.10-a). Motor verimliliği için en uygun ağ yapısı ise 2-6-1 olarak belirlenmiştir (Şekil 8.10-b). Buna göre, toplam kayıpların modellenmesi için iki adet girdi, gizli katmanda dört adet nöron ve bir adet çıktı parametresi kullanılmıştır. Motor verimliliği için iki adet girdi, gizli katmanda altı adet nöron ve bir adet çıktı parametresi belirlenmiştir.



Şekil 8.10. Tel erezyon kesme yöntemine ait ağ yapısı, a) Toplam kayıplar, b) Motor verimliliği

Kesme kalıbı ile üretilen motorda oluşan toplam kayıpların YSA ile modellenmesinde en uygun ağ yapısı 2-7-1 olarak belirlenmiştir (Şekil 8.11-a). Motor verimliliği için en uygun ağ yapısı ise 2-6-1 olarak belirlenmiştir (Şekil 8.11-b). Buna göre, toplam kayıpların modellenmesi için iki adet girdi, gizli katmanda yedi adet nöron ve bir adet çıktı parametresi kullanılmıştır. Motor verimliliği için, iki adet girdi, gizli katmanda altı adet nöron ve bir adet çıktı parametresi belirlenmiştir.



Şekil 8.11. Kesme kalıbı yöntemine ait ağ yapısı, a) Toplam kayıplar, b) Motor verimliliği

Farklı kesme yöntemlerine göre ağ yapılarının belirlenmesinden sonra, öğrenme algoritmaları belirlenmiştir. Öğrenme algoritmaları ise ağın eğitilmesinde başarıyı etkileyen en önemli kriterlerden bir tanesidir. Bu çalışma kapsamında Çizelge 8.6'da verilen öğrenme algoritmaları kullanılmıştır.

Çizelge 8.6. Öğrenme algoritmaları ve MATLAB programında kısa yazılışı

Öğrenme algoritması adı	Öğrenme algoritmasının kısaltması
Resilient backpropagation algorithm	trainrp
Scaled conjugate gradient backpropagation algorithm	trainscg
One-step secant backpropagation algorithm	trainoss
Levenberg-Marquardt backpropagation algorithm	trainlm

YSA'nın oluşturulmasında üç farklı transfer fonksiyonu (tansig-tanjant sigmoid, logsig-logaritmik sigmoid ve purelin-doğrusal) kullanılmıştır. Bu fonksiyonlar kullanılarak dışarıdan gelen giriş değerleri ile ağırlıklar etkileştirilerek bir sonraki katmana işlendikten sonra gönderilmiştir. Ağın oluşturulması esnasında bu fonksiyonların tüm kombinasyonları denenerek en uygun transfer fonksiyonu belirlenmeye çalışılmıştır.

YSA'da ağ öğrenme sürecinin iyileştirilebilmesi için girdi ve çıktı katmanları arasına gizli katman yerleştirilmektedir. Gizli katman sayısı ve her bir gizli katmanda yer alan nöronların sayıları da kurulan ağın eğitilip eğitilmemesinde önemli rol oynamaktadır. Genel olarak gizli katman ve nöron sayısının artması, ağ performansını olumlu yönde etkilemesi beklenmektedir. Fakat, belirtilen parametrelerin arttırılması ile her zaman başarı

Çizelge 8.7’de W_1 , frekans ve W_2 ise motor yükleme oranına ait ağırlık değerini ifade etmektedir. Aktivasyon fonksiyonuna göre girdi parametresi ile ağırlık değerleri çarpıldıktan sonra katmandaki her bir eşik değeri ile ayrı ayrı toplanarak belirlenen matematiksel modellere göre tahmini sonuçlar elde edilmiştir.

Çizelge 8.8. Aşındırıcılı su jeti kesme yönteminde toplam kayıplar ve motor verimliliği için her bir nörona ait ağırlık ve eşik değerleri

Toplam Kayıplar						Motor verimliliği					
i	W_1	W_2	Θ_i	L_W	Θ_j	i	W_1	W_2	Θ_i	L_W	Θ_j
1	-0,0347	-0,0224	13,8450	0,3557	0,4278	1	-0,0966	-0,1034	19,3260	0,1212	-0,3676
2	0,0489	-0,0115	-12,686	-0,0532	-	2	-0,0211	0,0553	22,3840	-0,6669	-
3	0,0352	-0,1256	0,3701	0,6931	-	3	0,7862	0,9569	-20,3610	0,4376	-
4	0,0392	-0,0143	-9,7631	-0,6331	-	4	-0,0176	0,0607	1,5200	1,3076	-
5	-0,1321	-2,539	5,5954	-0,7578	-	5	-0,5174	-0,4818	-3,681	-0,351	-
6	-0,0364	-0,0497	7,4683	-0,8944	-	6	0,2501	0,1378	4,9780	-0,0095	-
7	-0,0241	-0,0623	6,6834	0,7929	-	-	-	-	-	-	-

i : Nöron sayısı, W_1 : Birinci girdi değerine ait ağırlık değeri, W_2 : İkinci girdi değerine ait ağırlık değeri, Θ_i : Gizli katmandaki eşik değeri, L_W : Gizli-çıkı katmanı arasındaki ağırlık değeri, Θ_j : Çıkış katmanındaki eşik değeri

Çizelge 8.9. Tel erezyon kesme yönteminde toplam kayıplar ve motor verimliliği için her bir nörona ait ağırlık ve eşik değerleri

Toplam Kayıplar						Motor verimliliği					
i	W_1	W_2	Θ_i	L_W	Θ_j	i	W_1	W_2	Θ_i	L_W	Θ_j
1	0,5494	-1,1221	0,2377	-12,5840	332,4580	1	-0,1544	-0,0214	25,1640	2,6632	-0,2186
2	0,0047	0,0049	665,4600	-4,8310	-	2	0,0400	-0,1396	16,2520	1,0275	-
3	-0,8486	1,0708	-0,0881	5,8500	-	3	-0,1931	-0,0800	18,2100	-1,2460	-
4	-0,3920	-0,3300	-333,7	-6,3230	-	4	0,1934	-0,2399	-13,5610	-0,4779	-
-	-	-	-	-	-	5	0,1363	0,0423	-11,7770	-1,4773	-
-	-	-	-	-	-	6	0,0151	0,0073	0,4470	-0,9007	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

i : Nöron sayısı, W_1 : Birinci girdi değerine ait ağırlık değeri, W_2 : İkinci girdi değerine ait ağırlık değeri, Θ_i : Gizli katmandaki eşik değeri, L_W : Gizli-çıkı katmanı arasındaki ağırlık değeri, Θ_j : Çıkış katmanındaki eşik değeri

Çizelge 8.10. Kesme kalıbı yönteminde toplam kayıplar ve motor verimliliği için her bir nörona ait ağırlık ve eşik değerleri

Toplam Kayıplar						Motor verimliliği					
i	W_1	W_2	Θ_i	L_w	Θ_j	i	W_1	W_2	Θ_i	L_w	Θ_j
1	0,0962	0,2170	9,1776	0,9419	0,8014	1	0,1973	-0,0137	-25,7900	-2,8940	-0,7912
2	0,0661	-0,1190	12,6610	0,8026	-	2	-0,1934	-0,0841	22,8670	0,4770	-
3	0,1859	0,0598	-11,9760	0,1566	-	3	0,0180	-0,3487	8,4470	-0,8180	-
4	0,4011	0,0409	-2,7520	-0,5688	-	4	-13,5400	-0,1040	-14,8340	3,6780	-
5	0,013	0,1522	-4,5490	-0,5044	-	5	0,3577	0,2093	-14,7440	2,1450	-
6	-0,0449	0,0186	4,4750	-0,6096	-	6	-0,1768	0,0362	2,0060	-1,6160	-
7	0,0195	0,0434	-6,300	0,2098	-	-	-	-	-	-	-

i : Nöron sayısı, W_1 : Birinci girdi değerine ait ağırlık değeri, W_2 : İkinci girdi değerine ait ağırlık değeri, Θ_i : Gizli katmandaki eşik değeri, L_w : Gizli-çıkı katmanı arasındaki ağırlık değeri, Θ_j : Çıkış katmanındaki eşik değeri

Eş. 8.1’de lazer kesme yönteminde toplam kayıplar (L_{Tk}) için girdi ile gizli katman arasında tansig, Eş. 8.2 ve 8.3’te ise gizli katman ile çıktı katmanı arasında kullanılan purelin aktivasyon fonksiyonlarına göre belirlenen matematiksel modeller verilmiştir.

$$F_i = \frac{2}{1 + e^{-2(f \cdot W_{fFi} + M_y \cdot W_{MyFi} + \Theta_i)}} - 1 \quad (8.1)$$

$$L_{Tk} = \sum_{i=1}^8 F_i \cdot W_i + \Theta_j \quad veya \quad (8.2)$$

$$L_{Tk} = \sum_{i=1}^8 \left(\frac{2}{1 + e^{-2(f \cdot W_{fFi} + M_y \cdot W_{MyFi} + \Theta_i)}} - 1 \right) \cdot W_i + \Theta_j \quad (8.3)$$

Eş. 8.4’te lazer kesme yönteminde motor verimliliği (L_{Mv}) için girdi ile gizli katman arasında tansig, Eş. 8.5 ve 8.6’da ise gizli katman ile çıktı katmanı arasında kullanılan logsig aktivasyon fonksiyonlarına göre belirlenen matematiksel modeller verilmiştir.

$$F_i = \frac{2}{1 + e^{-2(f \cdot W_{fFi} + M_y \cdot W_{MyFi} + \Theta_i)}} - 1 \quad (8.4)$$

$$L_{Mv} = \frac{1}{1 + e^{-(\sum_{i=1}^4 F_i \cdot W_i + \Theta_j)}} \quad veya \quad (8.5)$$

$$L_{Mv} = \frac{1}{1 + e^{-\left(\sum_{i=1}^4 \left(\frac{2}{1 + e^{-2(f \cdot W_{fFi} + M_y \cdot W_{MyFi} + \Theta_i)}} - 1 \right) \cdot W_i + \Theta_j \right)}} \quad (8.6)$$

Eş. 8.7’te aşındırıcılı su jeti ile kesme yönteminde toplam kayıplar (A_{Tk}) için girdi ile gizli katman arasında tansig, Eş. 8.8 ve 8.9’da ise gizli katman ile çıktı katmanı arasında kullanılan purelin aktivasyon fonksiyonlarına göre belirlenen matematiksel modeller verilmiştir.

$$F_i = \frac{2}{1 + e^{-2(f.W_{fFi} + M_y.W_{MyFi} + \theta_i)}} - 1 \quad (8.7)$$

$$A_{Tk} = \sum_{i=1}^7 F_i \cdot W_i + \theta_j \quad \text{veya} \quad (8.8)$$

$$A_{Tk} = \sum_{i=1}^7 \left(\frac{2}{1 + e^{-2(f.W_{fFi} + M_y.W_{MyFi} + \theta_i)}} - 1 \right) \cdot W_i + \theta_j \quad (8.9)$$

Eş. 8.10’da aşındırıcılı su jeti ile kesme yönteminde motor verimliliği (A_{Mv}) için girdi ile gizli katman arasında logsig, Eş. 8.11 ve 8.12’de ise gizli katman ile çıktı katmanı arasında kullanılan purelin aktivasyon fonksiyonlarına göre belirlenen matematiksel modeller verilmiştir.

$$F_i = \frac{1}{1 + e^{-(f.W_{fFi} + M_y.W_{MyFi} + \theta_i)}} \quad (8.10)$$

$$A_{Mv} = \sum_{i=1}^6 F_i \cdot W_i + \theta_j \quad \text{veya} \quad (8.11)$$

$$A_{Mv} = \sum_{i=1}^6 \left(\frac{1}{1 + e^{-(f.W_{fFi} + M_y.W_{MyFi} + \theta_i)}} \right) \cdot W_i + \theta_j \quad (8.12)$$

Eş. 8.13’te tel erezyon kesme yönteminde toplam kayıplar (T_{Tk}) için girdi ile gizli katman arasında tansig, Eş. 8.14 ve 8.15’te ise gizli katman ile çıktı katmanı arasında kullanılan purelin aktivasyon fonksiyonlarına göre belirlenen matematiksel modeller verilmiştir.

$$F_i = \frac{2}{1 + e^{-2(f.W_{fFi} + M_y.W_{MyFi} + \theta_i)}} - 1 \quad (8.13)$$

$$T_{Tk} = \sum_{i=1}^4 F_i \cdot W_i + \theta_j \quad \text{veya} \quad (8.14)$$

$$T_{Tk} = \sum_{i=1}^4 \left(\frac{2}{1 + e^{-2(f \cdot W_{fFi} + M_y \cdot W_{MyFi} + \Theta_i)}} - 1 \right) \cdot W_i + \Theta_j \quad (8.15)$$

Eş. 8.16'da tel erezyon kesme yönteminde motor verimliliği (T_{Mv}) için girdi ile gizli katman arasında logsig, Eş. 8.17 ve 8.18'te ise gizli katman ile çıktı katmanı arasında kullanılan tansig aktivasyon fonksiyonlarına göre belirlenen matematiksel modeller verilmiştir.

$$F_i = \frac{1}{1 + e^{-(f \cdot W_{fFi} + M_y \cdot W_{MyFi} + \Theta_i)}} \quad (8.16)$$

$$T_{Mv} = \frac{2}{1 + e^{-2(\sum_{i=1}^6 F_i \cdot W_i + \Theta_j)}} - 1 \quad veya \quad (8.17)$$

$$T_{Mv} = \frac{2}{1 + e^{-2\left(\sum_{i=1}^6 \left(\frac{1}{1 + e^{-(f \cdot W_{fFi} + M_y \cdot W_{MyFi} + \Theta_i)}} \right) \cdot W_i + \Theta_j\right)}} - 1 \quad (8.18)$$

Eş. 8.19'da kesme kalıbı yönteminde toplam kayıplar (K_{Tk}) için girdi ile gizli katman arasında tansig, Eş. 8.20 ve 8.21'de ise gizli katman ile çıktı katmanı arasında kullanılan purelin aktivasyon fonksiyonlarına göre belirlenen matematiksel modeller verilmiştir.

$$F_i = \frac{2}{1 + e^{-2(f \cdot W_{fFi} + M_y \cdot W_{MyFi} + \Theta_i)}} - 1 \quad (8.19)$$

$$K_{Tk} = \sum_{i=1}^8 F_i \cdot W_i + \Theta_j \quad veya \quad (8.20)$$

$$K_{Tk} = \sum_{i=1}^8 \left(\frac{2}{1 + e^{-2(f \cdot W_{fFi} + M_y \cdot W_{MyFi} + \Theta_i)}} - 1 \right) \cdot W_i + \Theta_j \quad (8.21)$$

Eş. 8.22'de kesme kalıbı yönteminde motor verimliliği (K_{Mv}) için girdi ile gizli katman arasında logsig, Eş. 8.23 ve 8.24'de ise gizli katman ile çıktı katmanı arasında kullanılan tansig aktivasyon fonksiyonlarına göre belirlenen matematiksel modeller verilmiştir.

$$F_i = \frac{1}{1 + e^{-(f \cdot W_{fFi} + M_y \cdot W_{MyFi} + \Theta_i)}} \quad (8.22)$$

$$K_{Mv} = \frac{2}{1 + e^{-2(\sum_{i=1}^6 F_i \cdot W_i + \theta_j)}} - 1 \quad \text{veya} \quad (8.23)$$

$$K_{Mv} = \frac{2}{1 + e^{-2\left(\sum_{i=1}^6 \frac{1}{1 + e^{-(f \cdot W_{fFi} + M_y \cdot W_{MyFi} + \theta_i)}} \cdot W_i + \theta_j\right)}} - 1 \quad (8.24)$$

Ağın eğitilmesi ve test edilmesinde belirli bir hata oranı vardır. Ağdan daha iyi sonuçlar elde edebilmek için hata değerleri toplamının ortalamasının en aza indirgenmesi gerekir. Minimize edilmek istenen bu değer (Mean squared error, MSE) ağın performansının belirlenmesinde önemli bir etkidir (Eş. 8.25). Ağın eğitilmesi sonucunda elde edilen YSA model sonuçlarının deney sonuçları ile uygunluğunun değerlendirilmesinde; ortalama mutlak yüzde hata (Mean absolute percentage error, MAPE) (Eş. 8.26), karekök ortalama (Root-mean-squared, RMS) (Eş. 8.27), korelasyon katsayısı (R^2) değerleri dikkate alınmıştır (Eş. 8.28). Ayrıca, YSA sonucuna göre elde edilen tüm değerlerinin yüzde hata (% Hata) oranları da belirlenebilmektedir (Eş. 8.29);

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{n=i}^n (x_{i,gerçek} - x_{i,tahmin edilen})^2 \quad (8.25)$$

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{n=i}^n \left| \frac{x_{i,gerçek} - x_{i,tahmin edilen}}{x_{i,gerçek}} \right| \times 100 \quad (8.26)$$

$$RMS = \sqrt{MSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{n=i}^n (x_{i,gerçek} - x_{i,tahmin edilen})^2} \quad (8.27)$$

$$R^2 = 1 - \left[\sum_i (x_{i,gerçek} - x_{i,tahmin edilen})^2 / (x_{i,tahmin edilen})^2 \right] \quad (8.28)$$

$$\% Hata = \frac{x_{i,gerçek} - x_{i,tahmin edilen}}{x_{i,gerçek}} \times 100 \quad (8.29)$$

Burada, $x_{i,gerçek}$, deney sonucu elde edilen değeri, $x_{i,tahmin}$, YSA sonucunda elde edilen değeri ve n ise örnek sayısını ifade etmektedir.

Eş. 8.29’da, % hata bütün örnekler için bulunarak; bunların içinden en yüksek olanı maksimum yüzde hatayı vermektedir. Yüzde hataları toplamı, örnek sayısına bölünmesiyle ortalama mutlak yüzde hata (MAPE) değerleri bulunmaktadır. Eş. 8.27’de, RMS’nin sıfıra yaklaşması, YSA sonucu geliştirilen modelin başarı oranını gösteren önemli bir etken olarak kullanılmıştır. Eş. 8.28’de R^2 , gerçek deney sonuçları ile model sonuçları arasındaki uyumu belirtir. R^2 değeri 1’e yaklaştıkça geliştirilen modelin başarı oranı artmaktadır. Eş. 8.26’daki en küçük MAPE değeri ise modelin uygulanabilirlik başarısını göstermektedir.

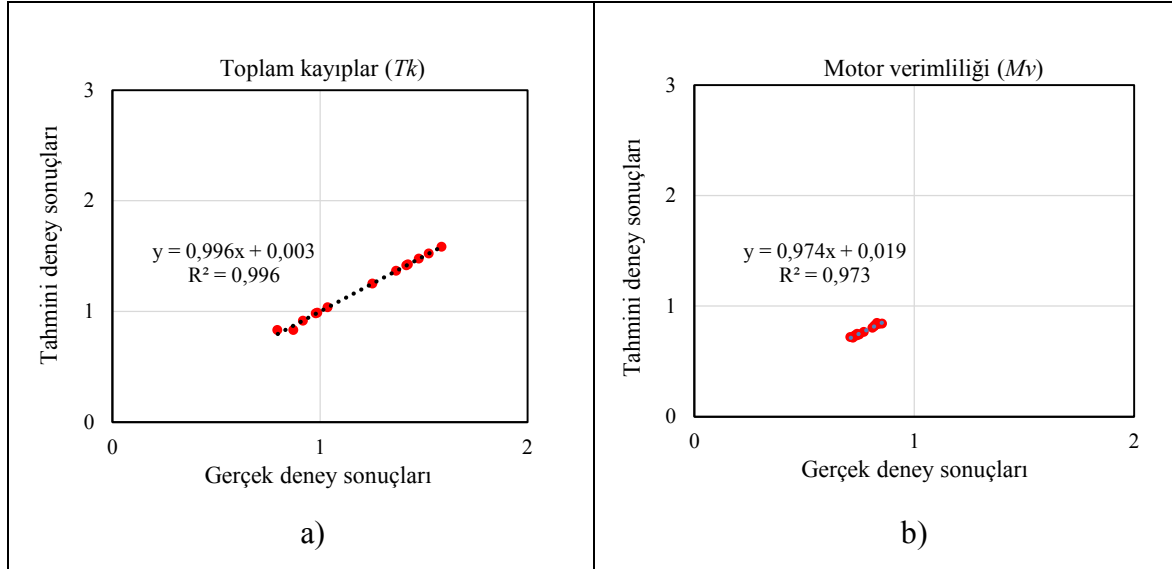
8.3.2. Elektrik motor test sonuçlarının YSA ile karşılaştırılması

Her bir kesme yöntemi için elde edilen toplam kayıplar ve motor verimliliğine ait deney sonuçları arasından ayrı ayrı olacak şekilde ağı eğitilmesi için 13 adet veri seçilmiştir. Geri kalan 7 adet veri ise ağı test edilmesi için kullanılmıştır. Buna göre Çizelge 8.11’de, lazer kesme yöntemi ile üretilen motor için farklı frekans ve yükleme oranına göre deney sonucu elde edilen toplam kayıp ve verimlilik değerlerinin YSA’da eğitilmesi sonucu elde edilen veriler gösterilmiştir.

Çizelge 8.11. Lazer kesme yönteminde toplam kayıplar ve motor verimliliği deney sonuçları ve ağı eğitilmesi sonucu elde edilen YSA sonuçları

Toplam kayıplar (Tk)			Motor verimliliği (Mv)			
Parametreler			Deney sonuçları	YSA Sonuçları	Deney sonuçları	YSA Sonuçları
No	f	My				
1	50	50	0,796	0,834	0,855	0,841
2	50	75	0,873	0,834	0,841	0,840
3	50	125	0,989	0,988	0,820	0,819
4	75	25	1,418	1,418	0,742	0,750
5	75	75	0,919	0,916	0,832	0,847
6	75	100	0,980	0,982	0,821	0,826
7	100	25	1,526	1,525	0,722	0,715
8	100	50	1,038	1,038	0,811	0,803
9	100	100	1,253	1,252	0,772	0,767
10	100	125	1,368	1,368	0,751	0,744
11	125	50	1,587	1,586	0,711	0,720
12	125	75	1,425	1,425	0,740	0,736
13	125	125	1,478	1,477	0,731	0,736

Çizelge 8.11’de görüldüğü gibi farklı frekans ve yükleme oranına göre deneyler sonucu ölçülen toplam kayıplar ve motor verimliliği değerleri ile YSA’da tahmin edilen değerlerin oldukça uyumlu olduğu gözlenmiştir. Şekil 8.12’de ise ağı eğitilmesi sonucunda, gerçek deney sonuçları ile tahmini sonuçlar arasındaki ilişkiyi gösteren grafikler verilmiştir.



Şekil 8.12. Lazer kesme yönteminde toplam kayıplar ve motor verimliliği değerlerinin eğitilmesi, a) Toplam kayıplar, b) Motor verimliliği

Toplam kayıplar için, veriler geri yayılmalı öğrenme algoritması (backpropagation algorithm) ile eğitilmiştir. Ayrıca, girdi katmanı ile gizli katman arasında tanjant sigmoid, gizli katman ile çıktı katmanı arasında ise purelin transfer fonksiyonu kullanılmıştır. İterasyon sayısı ise 2000 olarak belirlenmiştir. Buna göre, toplam kayıplar için ağı eğitilmesi sonucunda gerçek veriler ile YSA’da tahmin edilen değerler arasında $R^2 = 0,996$ korelasyon katsayısı elde edilmiştir (Şekil 8.12-a). Bu değer ağı eğitilmesinde başarı oranının yüksek olduğunu göstermektedir.

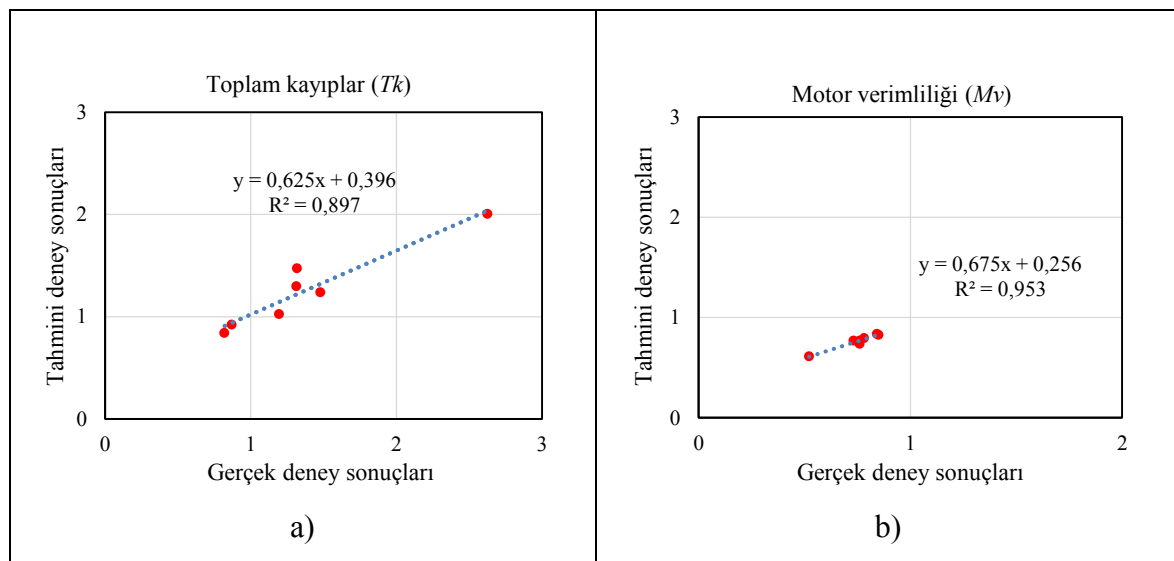
Şekil 8.12-b’de gerçek motor verimliliği için tahmini sonuçların elde edilmesinde geri yayılmalı öğrenme algoritması kullanılmıştır. Girdi katmanı ile gizli katman arasında tanjant sigmoid, gizli katman ile çıktı katmanı arasında ise logaritmik sigmoid transfer fonksiyonu kullanılmıştır. İterasyon sayısı ise 2000 olarak belirlenmiştir. Buna göre, motor verimliliği için ağı eğitilmesi sonucunda, gerçek veriler ile tahmin edilen değerler arasında $R^2 = 0,973$ korelasyon katsayısı elde edilmiştir.

Lazer kesme yöntemine göre toplam kayıplar ve motor verimliliğinin eğitilmesi işleminden sonra test işlemi yapılmıştır. Test işleminin yapılması için yedi adet deney verisi kullanılmıştır. Buna göre, Çizelge 8.12’de gerçek deney sonuçları ile YSA sonucunda elde edilen tahmini değerler verilmiştir.

Çizelge 8.12. Lazer kesme yönteminde toplam kayıplar ve motor verimliliği deney sonuçları ve ağırlık test edilmesi sonucunda elde edilen YSA sonuçları

Toplam kayıplar (Tk)			Motor verimliliği (Mv)			
Parametreler			Deney sonuçları	YSA Sonuçları	Deney sonuçları	YSA Sonuçları
No	f	M_y				
1	50	25	1,314	1,296	0,761	0,769
2	50	100	0,820	0,843	0,850	0,827
3	75	50	0,865	0,922	0,842	0,835
4	75	125	1,478	1,235	0,731	0,768
5	100	75	1,194	1,022	0,782	0,795
6	125	25	2,625	2,003	0,522	0,610
7	125	100	1,318	1,470	0,760	0,737

Şekil 8.13’de lazer kesme yöntemi ile üretilen motor için toplam kayıplar ve verimlilik değerlerinin test edilmesi sonucu elde edilen korelasyon ilişkisi gösterilmiştir. Buna göre, toplam kayıplar için değerlendirme yapıldığında, gerçek deney sonuçları ile YSA ile elde edilen tahmini sonuçlar arasında korelasyon katsayısının $R^2 = 0,897$ (Şekil 8.13-a), motor verimliliği için $R^2 = 0,953$ (Şekil 8.13-b) olarak hesaplanmıştır.



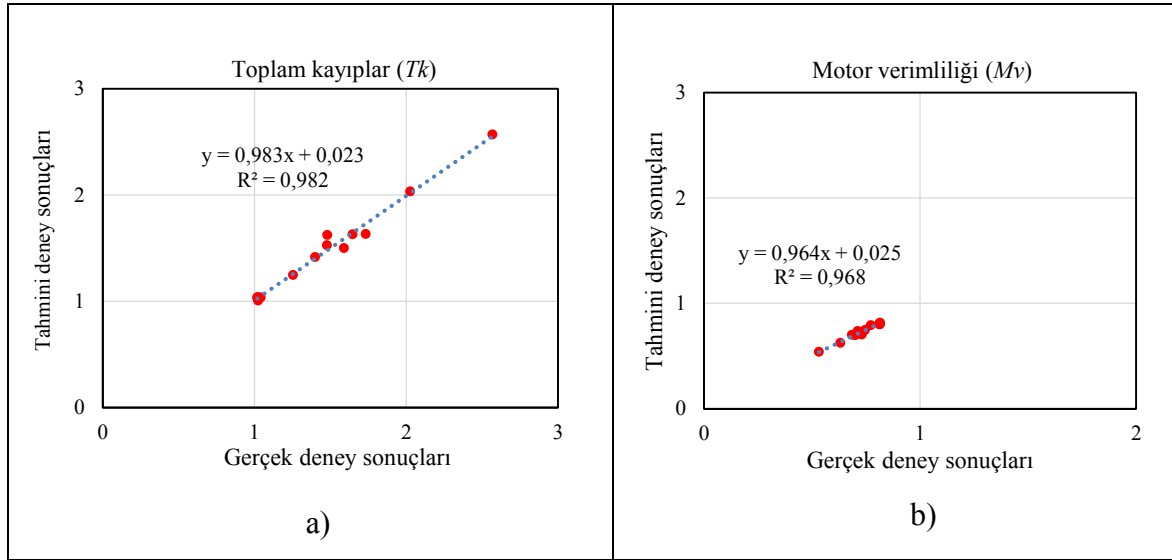
Şekil 8.13. Lazer kesme yönteminde toplam kayıplar ve motor verimliliği değerlerinin test edilmesi, a) Toplam kayıplar, b) Motor verimliliği

Çizelge 8.13'te, aşındırıcılı su jeti kesme yöntemi ile üretilen motordan elde edilen toplam kayıp ve verimlilik değerlerinin YSA'da eğitilmesi sonucu tahmin edilen veriler gösterilmiştir.

Çizelge 8.13. Aşındırıcılı su jeti ile kesme yönteminde toplam kayıplar ve motor verimliliği deney sonuçları ve ağı eğitilmesi sonucu elde edilen YSA sonuçları

Toplam kayıplar (T_k)			Motor verimliliği (M_v)			
Parametreler			Deney sonuçları	YSA Sonuçları	Deney sonuçları	YSA Sonuçları
No	f	M_y				
1	50	50	1,255	1,246	0,771	0,790
2	50	75	1,018	1,030	0,814	0,815
3	50	125	1,042	1,037	0,810	0,801
4	75	25	2,028	2,034	0,631	0,623
5	75	75	1,025	1,005	0,813	0,809
6	75	100	1,020	1,040	0,814	0,801
7	100	25	2,570	2,568	0,532	0,538
8	100	50	1,401	1,415	0,745	0,745
9	100	100	1,590	1,500	0,710	0,738
10	100	125	1,480	1,622	0,730	0,704
11	125	50	1,648	1,630	0,700	0,696
12	125	75	1,478	1,526	0,731	0,720
13	125	125	1,735	1,633	0,684	0,700

Çizelge 8.13'te de görüldüğü gibi farklı frekans ve yükleme oranına göre deneyler sonucu ölçülen toplam kayıplar ve motor verimliliği değerleri ile YSA'da tahmin edilen değerlerin oldukça uyumlu olduğu gözlenmiştir. Şekil 8.14'te ise ağı eğitilmesi sonucunda, gerçek deney sonuçları ile tahmini sonuçlar arasındaki ilişkiyi gösteren grafikler verilmiştir.



Şekil 8.14. Aşındırıcılı su jeti ile kesme yönteminde toplam kayıplar ve motor verimliliği değerlerinin eğitilmesi, a) Toplam kayıplar, b) Motor verimliliği

Şekil 8.14'te, toplam kayıplar için, veriler SCG öğrenme algoritması ile eğitilmiştir. Ayrıca, girdi katmanı ile gizli katman arasında tanjant sigmoid, gizli katman ile çıktı katmanı arasında ise purelin transfer fonksiyonu kullanılmıştır. İterasyon sayısı ise 2000 olarak belirlenmiştir. Buna göre, toplam kayıplar için ağın eğitilmesi sonucunda gerçek veriler ile YSA'da tahmin edilen değerler arasında $R^2 = 0.982$ korelasyon katsayısı elde edilmiştir (Şekil 8.14-a).

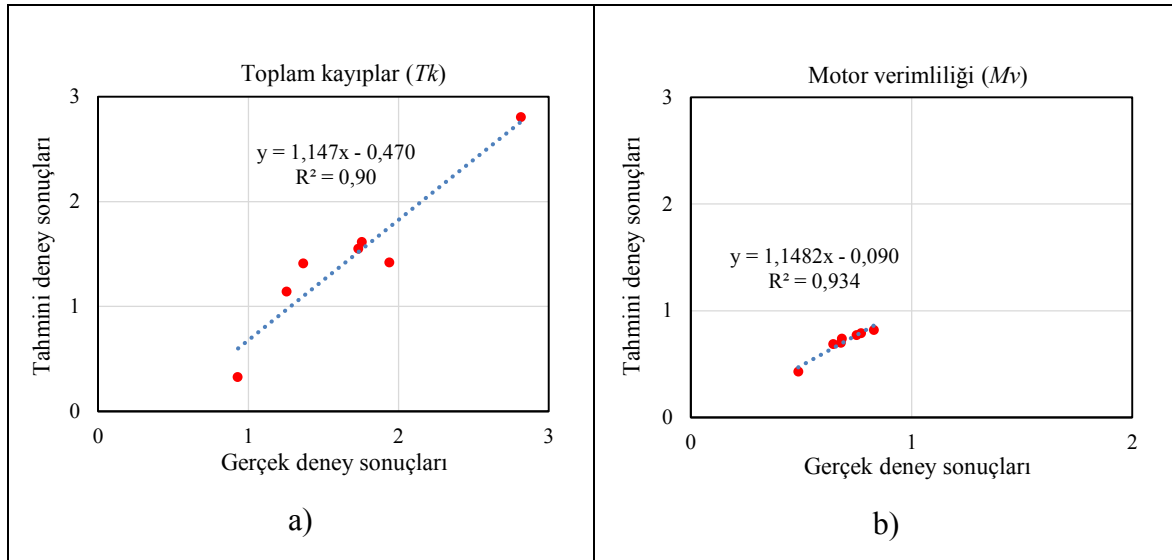
Şekil 8.14-b'de gerçek motor verimliliği için veriler OSS öğrenme algoritması ile eğitilmiştir. Girdi katmanı ile gizli katman arasında logaritmik sigmoid, gizli katman ile çıktı katmanı arasında ise purelin transfer fonksiyonu kullanılmıştır. İterasyon sayısı ise 2000 olarak belirlenmiştir. Buna göre, motor verimliliği için ağın eğitilmesi sonucunda, gerçek veriler ile tahmin edilen değerler arasında $R^2 = 0.968$ korelasyon katsayısı elde edilmiştir.

Çizelge 8.14'te, aşındırıcılı su jeti kesme yönteminde, toplam kayıplar ve motor verimliliğinin gerçek deney sonuçlarının test edilmesi sonucunda YSA'da tahmin edilen veriler gösterilmiştir.

Çizelge 8.14. Aşındırıcılı su jeti ile kesme yönteminde toplam kayıplar ve motor verimliliği deney sonuçları ve ağı test edilmesi sonucunda elde edilen YSA sonuçları

Toplam kayıplar (Tk)			Motor verimliliği (Mv)			
Parametreler			Deney sonuçları	YSA Sonuçları	Deney sonuçları	YSA Sonuçları
No	f	M_y				
1	50	25	1,942	1,417	0,646	0,687
2	50	100	0,931	0,324	0,830	0,819
3	75	50	1,367	1,408	0,751	0,772
4	75	125	1,735	1,550	0,684	0,737
5	100	75	1,256	1,139	0,771	0,789
6	125	25	2,818	2,804	0,487	0,427
7	125	100	1,757	1,615	0,680	0,700

Şekil 8.15'te aşındırıcılı su jeti kesme yöntemi ile üretilen motor için toplam kayıplar ve verimlilik değerlerinin test edilmesi sonucu elde edilen korelasyon ilişkisi gösterilmiştir.



Şekil 8.15. Aşındırıcılı su jeti ile kesme yönteminde toplam kayıplar ve motor verimliliği değerlerinin test edilmesi, a) Toplam kayıplar, b) Motor verimliliği

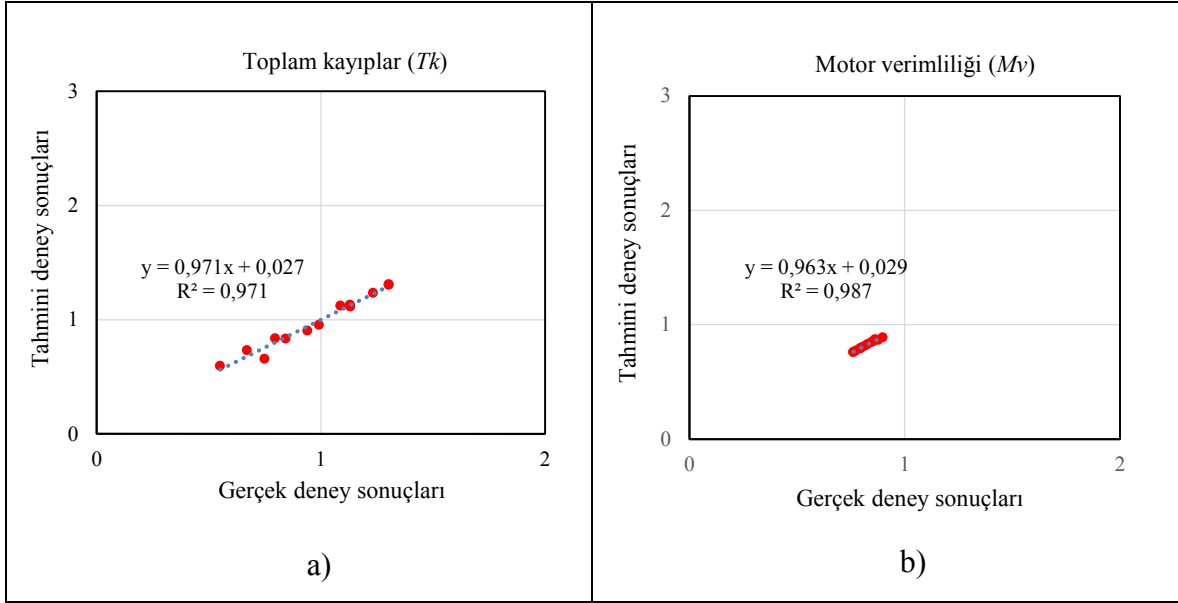
Buna göre, toplam kayıplar için değerlendirme yapıldığında, gerçek deney sonuçları ile YSA ile elde edilen tahmini sonuçlar arasında korelasyon katsayısının $R^2 = 0,90$ (Şekil 8.15-a), motor verimliliği için $R^2 = 0,934$ (Şekil 8.15-b) olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 8.15'te, tel erezyon kesme yöntemi ile üretilen motor için deney sonucu toplam kayıp ve verimlilik değerleri ve bu değerlerin YSA'da eğitilmesi sonucu elde edilen veriler gösterilmiştir.

Çizelge 8.15. Tel erezyon kesme yönteminde toplam kayıplar ve motor verimliliği deney sonuçları ve ağı eğitilmesi sonucu elde edilen YSA sonuçları

Toplam kayıplar (Tk)					Motor verimliliği (Mv)	
Parametreler			Deney sonuçları	YSA Sonuçları	Deney sonuçları	YSA Sonuçları
No	f	My				
1	50	50	0,551	0,597	0,899	0,888
2	50	75	0,750	0,658	0,863	0,872
3	50	125	0,796	0,838	0,855	0,855
4	75	25	1,131	1,131	0,794	0,795
5	75	75	0,671	0,733	0,877	0,867
6	75	100	0,843	0,833	0,846	0,848
7	100	25	1,304	1,304	0,762	0,761
8	100	50	0,941	0,905	0,828	0,831
9	100	100	0,992	0,953	0,819	0,818
0	100	125	1,132	1,114	0,794	0,794
11	125	50	1,234	1,234	0,775	0,775
12	125	75	1,088	1,123	0,802	0,802
13	125	125	1,304	1,309	0,762	0,761

Çizelge 8.15'te tel erezyon kesme yöntemine göre ölçülen toplam kayıplar ve motor verimliliği değerleri ile YSA'da tahmin edilen değerler arasında uyumlu bir ilişki olduğu gözlenmiştir. Şekil 8.16'da ise ağı eğitilmesi sonucunda, gerçek deney sonuçlarına göre tahmin edilen sonuçlar arasındaki ilişkiyi ifade eden grafikler verilmiştir.



Şekil 8.16. Tel erezyon kesme yönteminde toplam kayıplar ve motor verimliliği değerlerinin eğitilmesi, a) Toplam kayıplar, b) Motor verimliliği

Şekil 8.16’da, toplam kayıplar için veriler LM öğrenme algoritması ile eğitilmiştir. Ayrıca, girdi katmanı ile gizli katman arasında tanjant sigmoid, gizli katman ile çıktı katmanı arasında ise purelin transfer fonksiyonu kullanılmıştır. İterasyon sayısı ise 2000 olarak belirlenmiştir. Buna göre, toplam kayıplar için ağı eğitilmesi sonucunda gerçek veriler ile YSA’da tahmin edilen değerler arasında $R^2 = 0,971$ korelasyon katsayısı elde edilmiştir (Şekil 8.16-a).

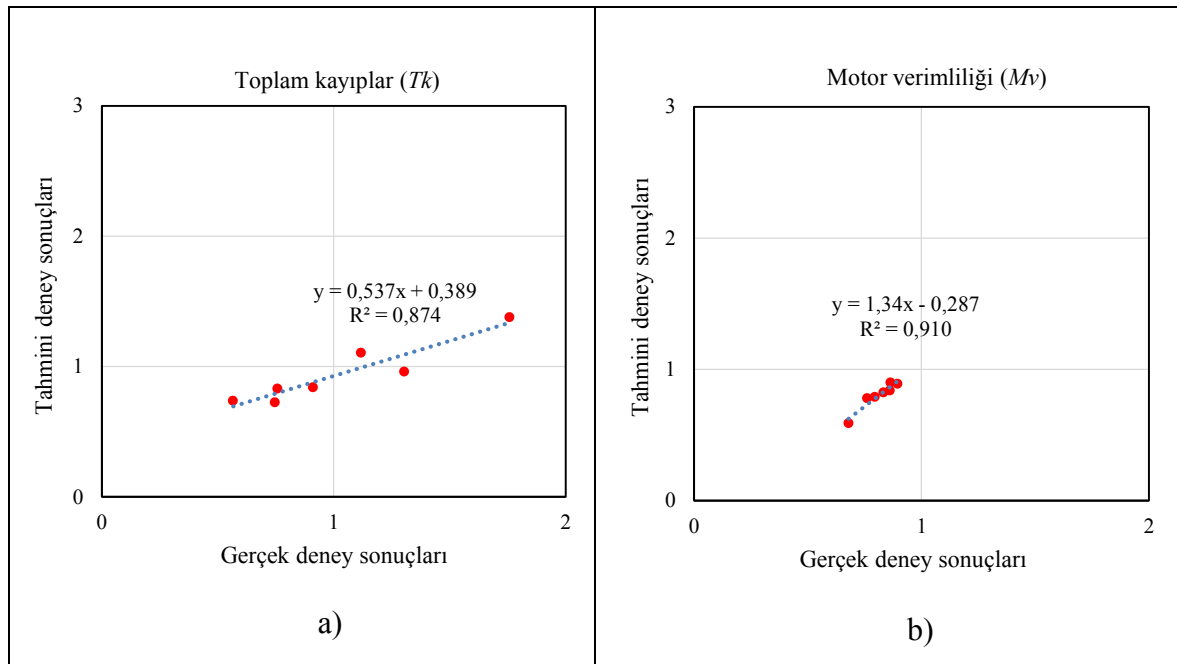
Şekil 8.16-b’de gerçek motor verimliliği için tahmini sonuçların elde edilmesinde SCG öğrenme algoritması kullanılmıştır. Girdi katmanı ile gizli katman arasında logaritmik sigmoid, gizli katman ile çıktı katmanı arasında ise tanjant sigmoid transfer fonksiyonu kullanılmıştır. İterasyon sayısı ise 2000 olarak belirlenmiştir. Buna göre, motor verimliliği için ağı eğitilmesi sonucunda, gerçek veriler ile tahmin edilen değerler arasında $R^2 = 0,987$ korelasyon katsayısı elde edilmiştir.

Çizelge 8.16’da, tel erezyon kesme yönteminde, toplam kayıplar ve motor verimliliği gerçek deney sonuçları ve bu sonuçların ağda test edilmesi sonucunda YSA’da tahmin edilen veriler gösterilmiştir.

Çizelge 8.16. Tel erezyon kesme yönteminde toplam kayıplar ve motor verimliliği deney sonuçları ve ağda test edilmesi sonucunda elde edilen YSA sonuçları

Toplam kayıplar (Tk)			Motor verimliliği (Mv)			
Parametreler			Deney sonuçları	YSA Sonuçları	Deney sonuçları	YSA Sonuçları
No	f	My				
1	50	25	0,747	0,725	0,864	0,901
2	50	100	0,567	0,737	0,896	0,890
3	75	50	0,758	0,831	0,862	0,839
4	75	125	1,304	0,960	0,762	0,781
5	100	75	0,911	0,840	0,834	0,824
6	125	25	1,758	1,377	0,680	0,590
7	125	100	1,118	1,106	0,796	0,790

Şekil 8.17’de tel erezyon kesme yöntemi ile üretilen motor için toplam kayıplar ve verimlilik değerlerinin test edilmesi sonucu elde edilen korelasyon ilişkisi gösterilmiştir.



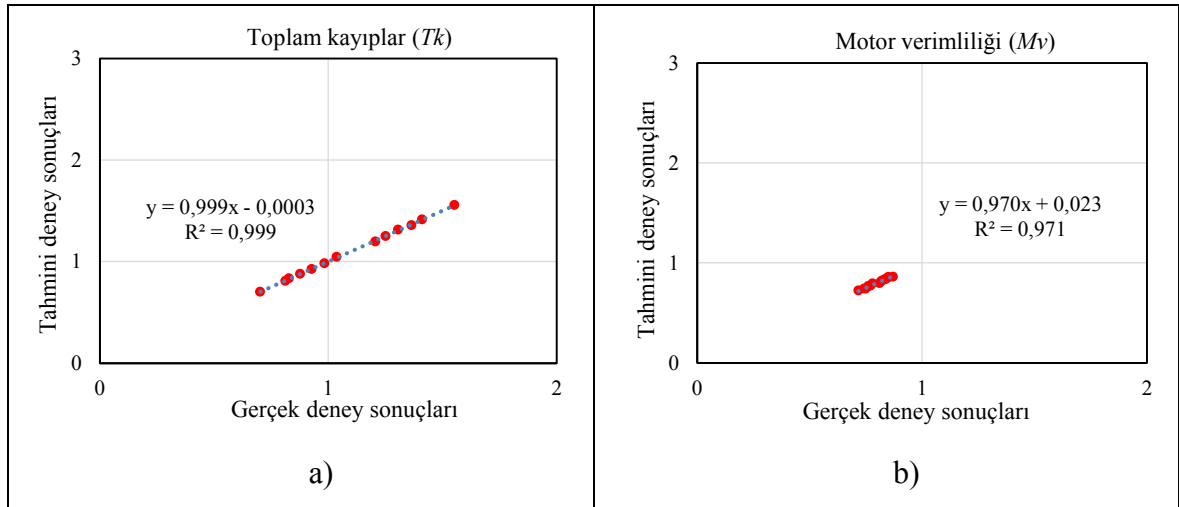
Şekil 8.17. Tel erezyon kesme yönteminde toplam kayıplar ve motor verimliliği değerlerinin test edilmesi, a) Toplam kayıplar, b) Motor verimliliği

Şekil 8.17’de toplam kayıplar açısından değerlendirme yapıldığında, gerçek deney sonuçları ile YSA ile elde edilen tahmini sonuçlar arasında korelasyon katsayısının $R^2 = 0,874$ (Şekil 8.17-a), motor verimliliği için $R^2 = 0,910$ (Şekil 8.17-b) olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 8.17. Kesme kalıbı yönteminde toplam kayıplar ve motor verimliliği deney sonuçları ve ağı eğitilmesi sonucu elde edilen YSA sonuçları

Toplam kayıplar (Tk)			Motor verimliliği (Mv)			
Parametreler			Deney sonuçları	YSA Sonuçları	Deney sonuçları	YSA Sonuçları
No	f	My				
1	50	50	0,703	0,703	0,872	0,860
2	50	75	0,813	0,809	0,852	0,858
3	50	125	0,878	0,878	0,840	0,839
4	75	25	1,252	1,250	0,772	0,772
5	75	75	0,829	0,834	0,849	0,855
6	75	100	0,928	0,925	0,831	0,830
7	100	25	1,412	1,413	0,743	0,743
8	100	50	0,985	0,983	0,820	0,819
9	100	100	1,038	1,045	0,811	0,795
10	100	125	1,207	1,196	0,780	0,794
11	125	50	1,554	1,557	0,717	0,721
12	125	75	1,366	1,359	0,751	0,741
13	125	125	1,307	1,314	0,762	0,767

Çizelge 8.17’de kesme kalıbı yöntemine göre ölçülen toplam kayıplar ve motor verimliliği değerleri ile YSA’da tahmin edilen değerler arasında uyumlu bir ilişki olduğu gözlenmiştir. Şekil 8.18’de ise ağı eğitilmesi sonucunda, gerçek deney sonuçlarına göre tahmin edilen sonuçlar arasındaki ilişkiyi ifade eden grafikler verilmiştir.



Şekil 8.18. Kesme kalıbı yönteminde toplam kayıplar ve motor verimliliği değerlerinin eğitilmesi, a) Toplam kayıplar, b) Motor verimliliği

Şekil 8.18’de, toplam kayıplar için, veriler LM öğrenme algoritması ile eğitilmiştir. Ayrıca, girdi katmanı ile gizli katman arasında tanjant sigmoid, gizli katman ile çıktı katmanı arasında ise purelin transfer fonksiyonu kullanılmıştır. İterasyon sayısı ise 2000 olarak belirlenmiştir. Buna göre, toplam kayıplar için ağı eğitilmesi sonucunda gerçek veriler ile YSA’da tahmin edilen değerler arasında $R^2 = 0,999$ korelasyon katsayısı elde edilmiştir (Şekil 8.18-a).

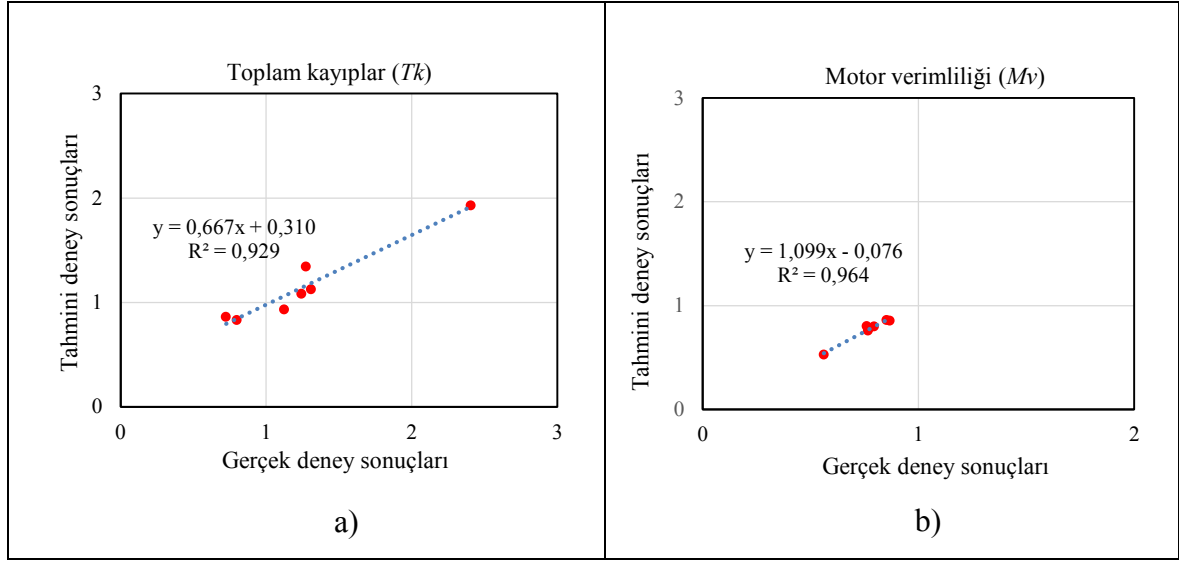
Şekil 8.18-b’de gerçek motor verimliliği için tahmini sonuçların elde edilmesinde SCG öğrenme algoritması kullanılmıştır. Girdi katmanı ile gizli katman arasında logaritmik sigmoid, gizli katman ile çıktı katmanı arasında ise logaritmik sigmoid transfer fonksiyonu kullanılmıştır. İterasyon sayısı ise 2000 olarak belirlenmiştir. Buna göre, motor verimliliği için ağı eğitilmesi sonucunda, gerçek veriler ile tahmin edilen değerler arasında $R^2 = 0,971$ korelasyon katsayısı elde edilmiştir.

Çizelge 8.18’de, kesme kalıbı yönteminde, toplam kayıplar ve motor verimliliği gerçek deney sonuçlarının test edilmesi sonucunda YSA’da tahmin edilen veriler gösterilmiştir.

Çizelge 8.18. Kesme kalıbı yönteminde toplam kayıplar ve motor verimliliği deney sonuçları ve ağı test edilmesi sonucunda elde edilen YSA sonuçları

Toplam kayıplar (Tk)					Motor verimliliği (Mv)	
Parametreler			Deney sonuçları	YSA Sonuçları	Deney sonuçları	YSA Sonuçları
No	f	My				
1	50	25	1,243	1,081	0,774	0,784
2	50	100	0,725	0,860	0,868	0,853
3	75	50	0,799	0,832	0,854	0,861
4	75	125	1,309	1,124	0,762	0,802
5	100	75	1,124	0,932	0,795	0,799
6	125	25	2,406	1,927	0,562	0,528
7	125	100	1,273	1,343	0,768	0,757

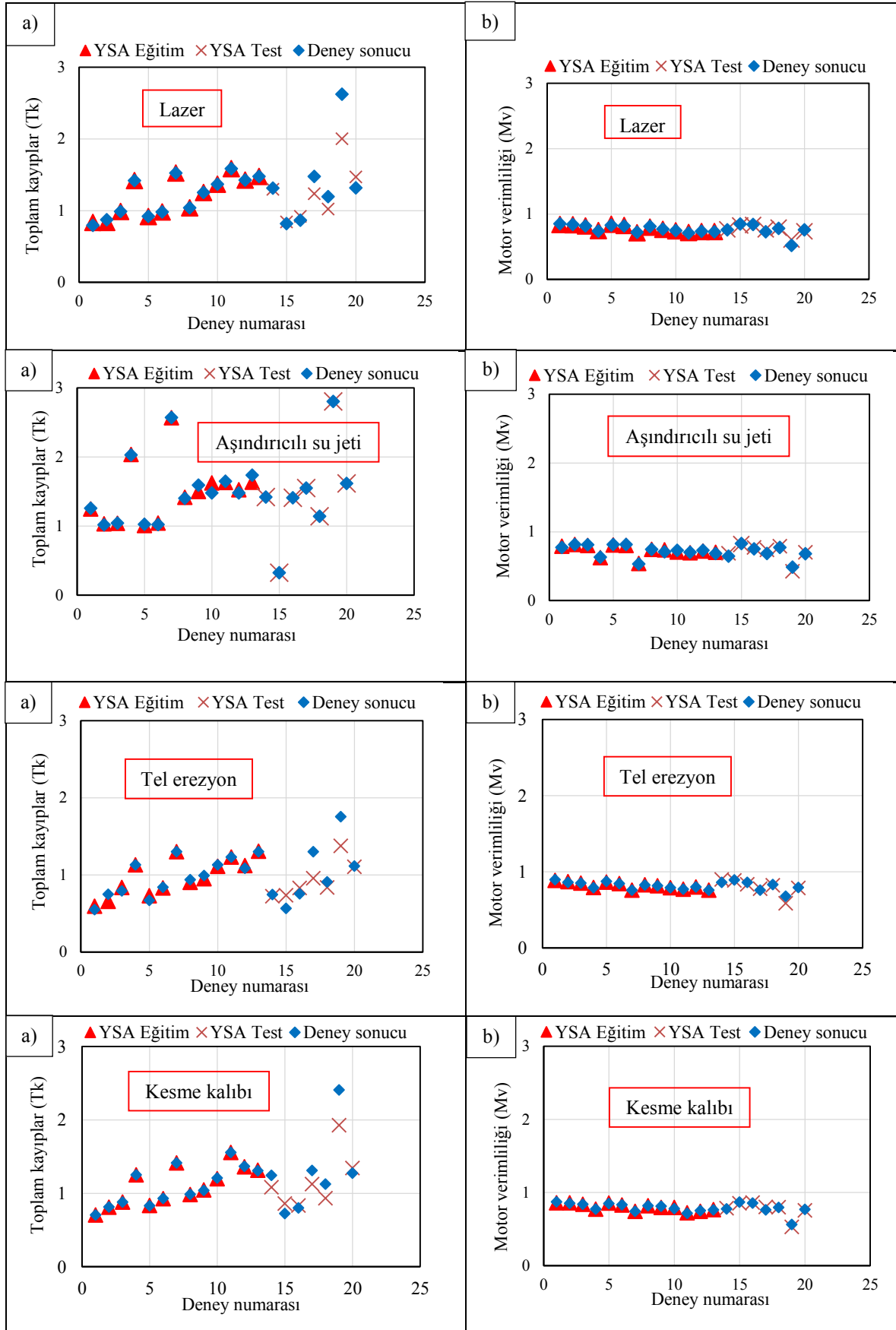
Şekil 8.19’da kesme kalıbı yöntemi ile üretilen motor için toplam kayıplar ve verimlilik değerleri ve ağı test edilmesi sonucu elde edilen korelasyon ilişkisi gösterilmiştir.



Şekil 8.19. Kesme kalıbı yönteminde toplam kayıplar ve motor verimliliği değerlerinin test edilmesi, a) Toplam kayıplar, b) Motor verimliliği

Şekil 8.19'da toplam kayıplar açısından değerlendirme yapıldığında, gerçek deney sonuçları ile YSA ile elde edilen tahmini sonuçlar arasında korelasyon katsayısının $R^2 = 0,929$ (Şekil 8.19-a), motor verimliliği için $R^2 = 0,964$ (Şekil 8.19-b) olarak hesaplanmıştır.

Şekil 8.20'de, lazer, aşındırıcılı su jeti, tel erezyon ve kesme kalıbı yöntemi ile üretilen motorlar üzerinden ölçülen toplam kayıplar ve motor verimliliği değerleri ve bu değerlere bağlı olarak YSA'da elde edilen eğitim ve test sonuçları gösterilmiştir.



Şekil 8.20. Farklı kesme yöntemlerine göre YSA eğitim, YSA test ve deney sonuçları, a) Toplam kayıplar, b) Motor verimliliği

Şekil 8.20’de, toplam kayıplar ve motor verimliliğinin ölçülmesi ile belirlenen gerçek deney sonuçları ile YSA’da verilerin eğitilmesi ve test edilmesi sonucuyla elde edilen değerlerin birbiri ile örtüştüğü gözlenmektedir. Buna göre, grafiklerden elde edilen verilere bakıldığında korelasyon katsayılarının yüksek olduğu ve bu da ağın eğitilmesi ve test edilmesi işlemlerinin başarılı bir şekilde gerçekleştirildiğini ortaya koymaktadır.

Çizelge 8.19’da, farklı kesme yöntemleri ile üretilen motorlar için toplam kayıplar ve motor verimliliğinin YSA’da modellenmesi sonucunda, ağın eğitilmesi ve test edilmesine bağlı olarak hesaplanan karekök ortalama (RMS), ortalama mutlak yüzde hata (MAPE) ve korelasyon katsayı (R^2) değerleri verilmiştir.

Çizelge 8.19. Farklı kesme yöntemlerine göre YSA’da elde edilen modele ait veriler

<i>Toplam kayıplar</i>	Lazer kesme yöntemi		
	RMS	MAPE	R^2
YSA Eğitim verisi	0,015	0,769	0,996
YSA Test verisi	0,267	10,976	0,897
<i>Motor verimliliği</i>			
YSA Eğitim verisi	0,007	0,857	0,973
YSA Test verisi	0,038	4,490	0,953
<i>Toplam kayıplar</i>	Aşındırıcılı su jeti ile kesme yöntemi		
YSA Eğitim verisi	0,056	2,536	0,982
YSA Test verisi	0,318	17,655	0,900
<i>Motor verimliliği</i>			
YSA Eğitim verisi	0,013	1,528	0,968
YSA Test verisi	0,036	5,141	0,934
<i>Toplam kayıplar</i>	Tel erezyon kesme yöntemi		
YSA Eğitim verisi	0,039	3,783	0,971
YSA Test verisi	0,208	14,226	0,874
<i>Motor verimliliği</i>			
YSA Eğitim verisi	0,004	0,349	0,987
YSA Test verisi	0,038	3,609	0,910
<i>Toplam kayıplar</i>	Kesme kalıbı yöntemi		
YSA Eğitim verisi	0,005	0,364	0,999
YSA Test verisi	0,223	13,310	0,929
<i>Motor verimliliği</i>			
YSA Eğitim verisi	0,007	0,731	0,971
YSA Test verisi	0,021	2,447	0,964

8.3.3. Elektrik motor test sonuçlarının ANOVA ile değerlendirilmesi

Bağımsız değişkenlerin sonuçlar üzerinde ne kadar etkili olduğunun belirlenmesinde ANOVA yöntemi kullanılmaktadır. Bu amaçla, bağımsız değişkenler frekans ve yükleme oranı olarak seçilmiştir. Lazer, aşındırıcılı su jeti, tel erezyon ve kesme kalıbı yönteminde, bu bağımsız değişkenlerin her birinin toplam kayıplar ve motor verimliliği üzerindeki etkisi sayısal olarak belirlenmiştir. Bağımsız değişkenlerin sonuç üzerindeki etkisinin belirlenmesinde, P değerlerinin $\alpha=0,05$ 'e göre ilişkisi dikkate alınmaktadır. $P < \alpha=0,05$ ise, bağımsız değişkenin sonuçlar üzerinde belirli bir etkiye sahip olduğu ancak, $P > \alpha=0,05$ olması durumunda ise bağımsız değişkenin etkisinin olmadığı kabul edilmektedir [182].

Çizelge 8.20'de, lazer ve aşındırıcılı su jeti kesme yönteminde toplam kayıpların yanı sıra motor verimliliği üzerinde, frekans ve motor yükleme oranının etkisi sayısal olarak gösterilmiştir. Buna göre, lazer kesme yönteminde toplam kayıplar için frekans değişkenine ait anlamlılık değeri $P=0,01 < \alpha$ ve motor yükleme oranı için $P=0,39 > \alpha$ olduğu gözlenmiştir. Yüzdelik dağılım açısından bakıldığında, frekans değeri % 28,25'lik bir etki payı ile toplam kayıplar üzerinde en fazla etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. Motor verimliliği açısından değerlendirme yapıldığında, frekans değerine ait anlamlılık değeri $P=0,009 < \alpha$ ve motor yükleme oranı için $P=0,386 > \alpha$ olduğu gözlenmiştir. Bu durumda, frekans değerinin % 28,57'lik bir etki payı ile motor verimliliği üzerinde en fazla etkiye sahip olduğu belirlenmiştir.

Çizelge 8.20. Lazer ve aşındırıcılı su jeti ile kesme yöntemi için ANOVA sonuçları

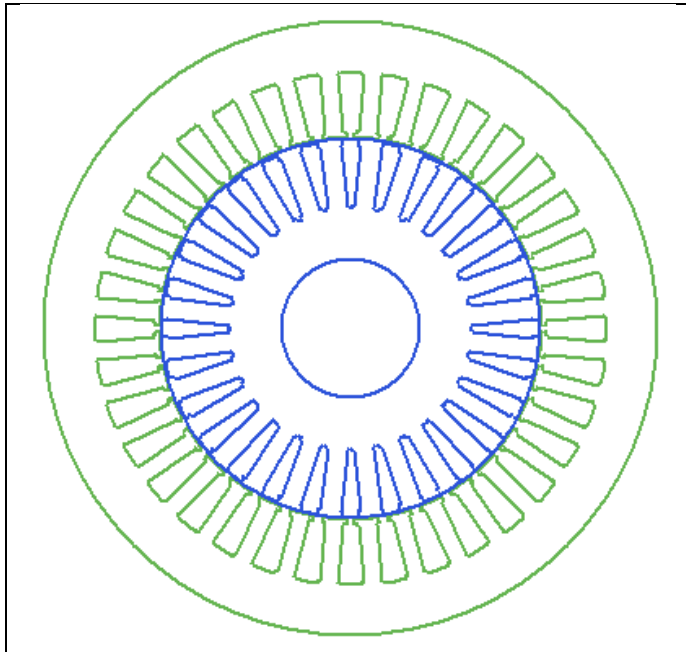
Lazer kesme yönteminde toplam kayıplar için ANOVA sonuçları							
Kaynak	Bağımsız değişkenler	SD	KT	KO	F	P	YD (%)
Model	-	3	1,777	0,592	6,47	0,004	21,14
Doğrusal	-	2	1,759	0,879	9,61	0,002	31,39
A	Frekans (Hz)	1	0,791	0,791	8,64	0,010	28,25
B	Motor yükleme oranı (%)	1	0,071	0,071	0,78	0,390	2,53
İkili etkileşim	-	1	0,188	0,188	2,06	0,170	6,71
A*B	-	1	0,188	0,188	2,06	0,170	6,71
Hata	-	16	1,464	0,091			3,21
Toplam	-	19	3,242	2,8			100
Lazer kesme yönteminde motor verimliliği için ANOVA sonuçları							
Model	-	3	0,058	0,019	6,52	0,004	20,87
Doğrusal	-	2	0,058	0,029	9,68	0,002	31,86
A	Frekans (Hz)	1	0,026	0,026	8,73	0,009	28,57
B	Motor yükleme oranı (%)	1	0,002	0,002	0,80	0,386	2,19
İkili etkileşim	-	1	0,006	0,006	2,1	0,167	6,59
A*B	-	1	0,006	0,006	2,1	0,167	6,59
Hata	-	16	0,048	0,003			3,29
Toplam	-	19	0,107	0,091			100
Aşındırıcılı su jeti ile kesme yönteminde toplam kayıplar için ANOVA sonuçları							
Model	-	3	2,446	0,815	5,38	0,009	32,73
Doğrusal	-	2	2,340	1,170	7,72	0,005	46,98
A	Frekans (Hz)	1	0,268	0,268	1,77	0,048	10,76
B	Motor yükleme oranı (%)	1	0,080	0,080	0,530	0,476	3,21
İkili etkileşim	-	1	0,003	0,003	0,02	0,878	0,12
A*B	-	1	0,003	0,003	0,02	0,878	0,12
Hata	-	16	2,426	0,151			6,06
Toplam	-	19	4,872	2,49			100
Aşındırıcılı su jeti ile kesme yönteminde motor verimliliği için ANOVA sonuçları							
Model	-	3	0,080	0,026	5,35	0,01	32,91
Doğrusal	-	2	0,077	0,038	7,68	0,05	48,10
A	Frekans (Hz)	1	0,008	0,008	1,75	0,048	10,12
B	Motor yükleme oranı (%)	1	0,002	0,002	0,53	0,475	2,53
İkili etkileşim	-	1	0,000	0,000	0,02	0,881	0
A*B	-	1	0,000	0,000	0,02	0,881	0
Hata	-	16	0,080	0,005			6,32
Toplam	-	19	0,161	0,079			100
SD: Serbestlik derecesi, KT: Kareler toplamı, KO: Kareler ortalaması, F: Test istatistiği, P: Anlamlılık değeri, YD: Yüzdelik dağılım							

Aşındırıcılı su jeti ile kesme yönteminde toplam kayıplar için frekans değerine ait anlamlılık değeri $P=0,048 < \alpha$ ve motor yükleme oranı için $P=0,476 > \alpha$ olduğu gözlenmiştir. Bu durumda, frekans değeri % 10,76'lık bir etki payı ile toplam kayıplar üzerinde en fazla etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. Motor verimliliği için frekans değerine ait anlamlılık değeri ise $P=0,048 < \alpha$ ve motor yükleme oranı için $P=0,475 > \alpha$ olduğu gözlenmiştir. Böylelikle, frekans değeri % 10,12'lik bir etki payı ile motor verimliliği üzerinde en fazla etkiye sahip olduğu belirlenmiştir.

Kesme kalıbı yönteminde ise toplam kayıplar için frekans değerine ait anlamlılık değeri $P=0,005=\alpha$ ve motor yükleme oranı için $P=0,376>\alpha$ olarak belirlenmiştir. Buna göre, frekans değeri % 27,94'lik bir etki payı ile toplam kayıplar üzerinde en fazla etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. Motor verimliliği için frekans değerine ait anlamlılık değeri ise $P=0,05=\alpha$ ve motor yükleme oranı için $P=0,374>\alpha$ olarak hesaplanmıştır. Bu durumda, frekans değeri % 28,57'lik bir etki payı ile motor verimliliği üzerinde en fazla etkiye sahip olduğu belirlenmiştir.

8.4. Ansys Maxwell RMxpert ile Sonuçların Değerlendirilmesi

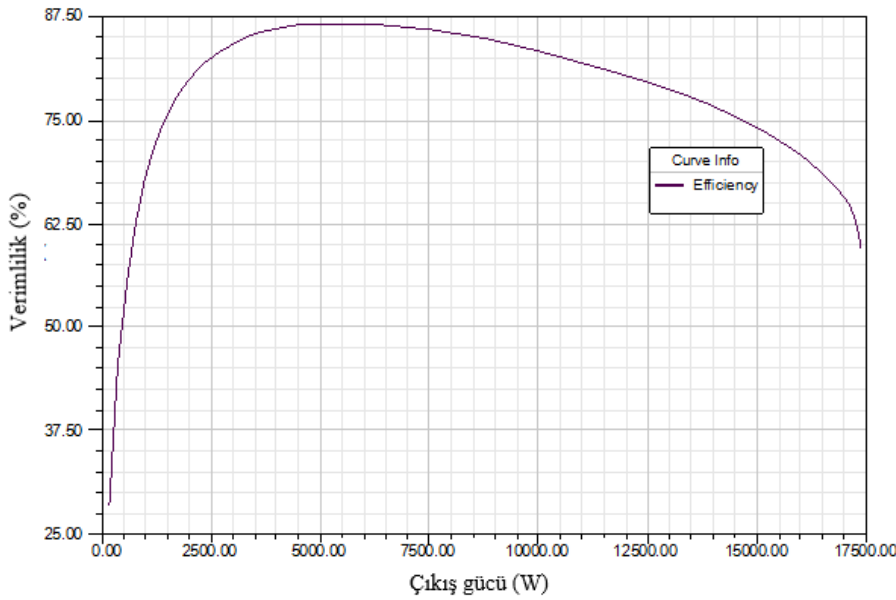
Ansys Maxwell programı ile uyumlu çalışabilen RMxpert modülü, elektrik motor tasarımının ilk adımında kullanılan, tasarımcıyı yönlendiren ve tasarım sonucu oluşturulan motorun analitik çözümlerinin detaylı olarak hesaplanabildiği yazılımdır. Bu amaçla, elektrik motoru ilk olarak RMxpert ortamında tasarlanmıştır. Motor gücü (5,5 kW), devir (1500 dev/dak) ve kutup sayısı (4), laminasyon (M400-50A) ve rotor malzemesi (Alüminyum bar çubuk) gibi hususlar, başlıca tasarım kriteri olarak dikkate alınmıştır. Bu parametreler göz önüne alınarak belirlenen malzemeler ile motor tasarımı yapılmıştır (Şekil 8.21). Böylelikle, yazılım çıktısı olarak analiz sonuçları elde edilmiştir.



Şekil 8.21. Ansys Maxwell RMxpert yazılımında elektrik motorunun tasarımı

Bu çalışma kapsamında yapılan tasarıma göre, stator sac paketi kesme kalıbı ile üretilen motor için analiz çalışması yapılmıştır. Lazer, aşındırıcılı su jeti ve tel erezyon kesme yönteminde kesme parametreleri, birçok değişkene bağlı olduğu için analiz metodu geliştirilemediği ve en yakın sonuçlar ise kesme kalıbı yönteminde elde edildiği gözlenmiştir. Analiz çalışmaları, dört farklı frekans (50-75-100-125 Hz) ve nominal yükleme (% 100) değerine göre motor verimliliği-çıkış gücü ve motor verimliliği-hız grafikleri dikkate alınarak yapılmıştır.

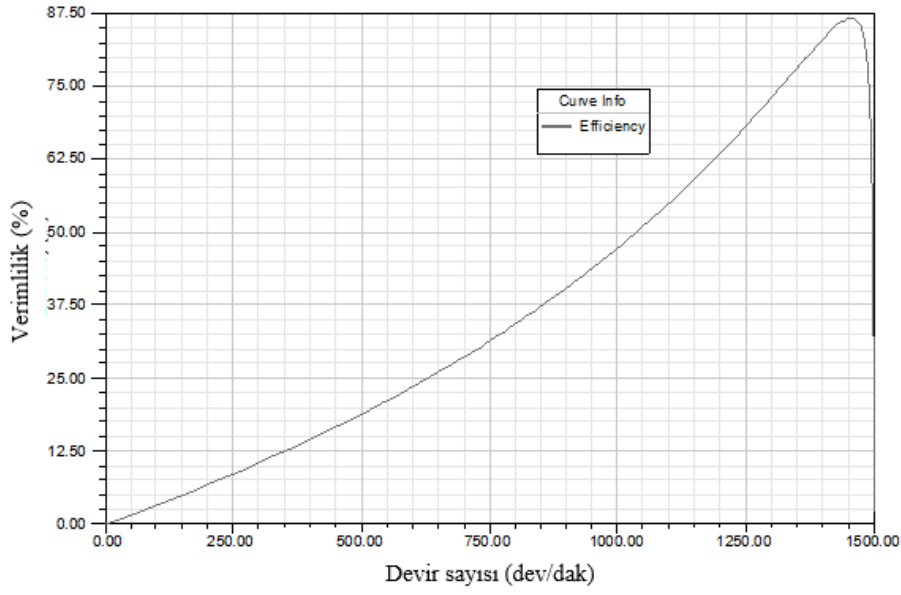
Şekil 8.22’de, 50 Hz frekans ve nominal yükleme değerlerine göre çıkış gücüne bağlı olarak motor verimliliğindeki değişimi gösteren grafik verilmiştir.



Şekil 8.22. Çıkış gücüne bağlı olarak motor verimliliğindeki değişim ($f=50$ Hz).

Şekil 8.22’de, 50 Hz frekans ve nominal yükleme değerinde elde edilen çıkış gücü, yaklaşık olarak 5,5 kW’a ulaşınca kadar elektrik motorunun verimliliğinin arttığı ve nominal yükleme değerinde maksimum verimliliğin % 86,58 olduğu belirlenmiştir. Ancak, çıkış gücünün 5,5 kW’ı aşması durumunda motor verimliliğinin azaldığı ve yaklaşık olarak % 59~60’a kadar düştüğü gözlenmiştir.

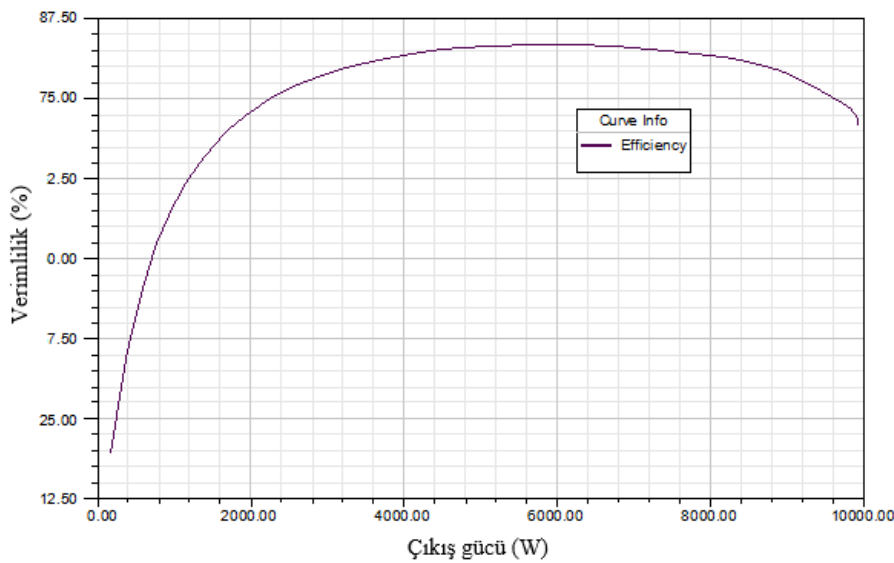
Şekil 8.23’te, 50 Hz frekans ve nominal yükleme değerlerine göre, hıza bağlı olarak motor verimliliğindeki değişimi gösteren grafik verilmiştir.



Şekil 8.23. Hıza bağlı olarak motor verimliliğindeki değişim ($f=50$ Hz).

Şekil 8.23'te, 50 Hz frekans ve nominal yükleme değerinde, motor hızının 1452 dev/dak değerine ulaşması durumunda motor verimliliğinin maksimum noktaya çıktığı (% 86,58) gözlenmiştir. Ancak, motor hızının artmasına bağlı olarak oluşan manyetik kayıplar arttığı için verimlilik değerinin azaldığı belirlenmiştir.

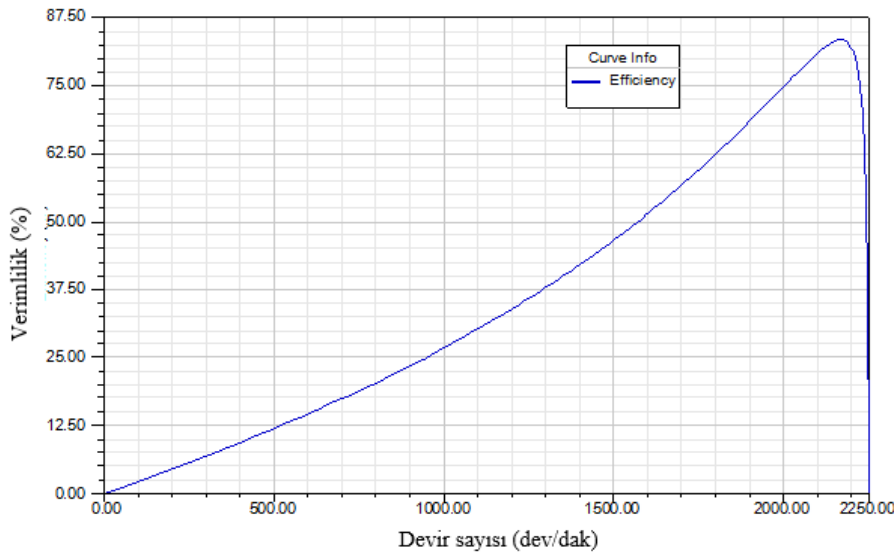
Şekil 8.24'te, 75 Hz ve nominal yük değerinde çıkış gücüne bağlı olarak motor verimliliğindeki değişimi gösteren grafik verilmiştir.



Şekil 8.24. Çıkış gücüne bağlı olarak motor verimliliğindeki değişim ($f=75$ Hz).

Şekil 8.24'te, 75 Hz frekans ve nominal yükleme değerinde (%100) elde edilen çıkış gücü, yaklaşık olarak 5,5 kW'a ulaşıncaya kadar elektrik motorunun verimliliğinin arttığı ve bu çıkış gücünde maksimum verimliliğin % 83,36 olduğu belirlenmiştir. Ancak, çıkış gücü 5,5 kW'ı aşması durumunda motor verimliliğinin azaldığı ve yaklaşık olarak % 70'e kadar düştüğü gözlenmiştir.

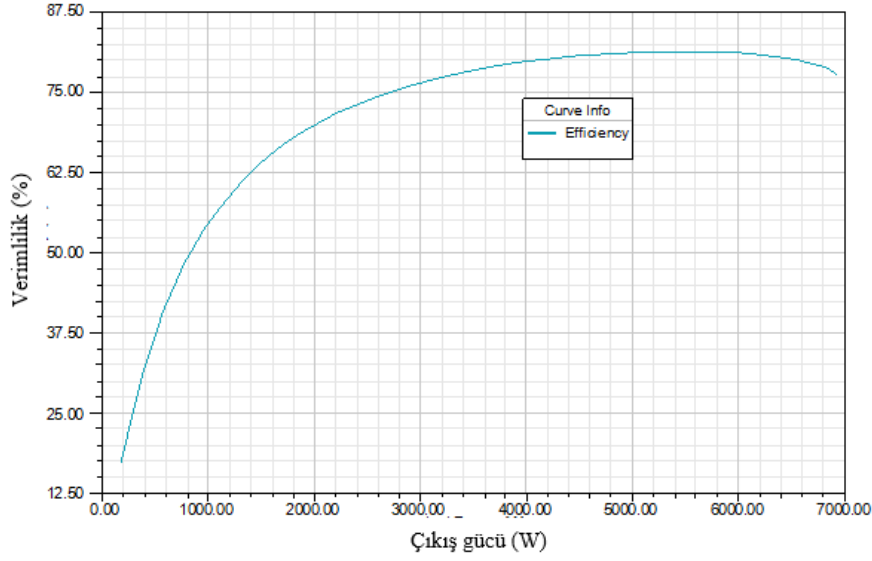
Şekil 8.25'te, 75 Hz frekans ve nominal yükleme değerlerinde hıza bağlı olarak motor verimliliğindeki değişimi gösteren grafik verilmiştir.



Şekil 8.25. Hıza bağlı olarak motor verimliliğindeki değişim ($f=75$ Hz).

Şekil 8.25'te, 75 Hz frekans ve nominal yükleme değerinde, motor hızının 2150 dev/dak değerine ulaşması ile motor verimliliğinin maksimum noktaya çıktığı (% 83,36) gözlenmiştir. Ancak, motor hızının artmasına bağlı olarak oluşan manyetik kayıplara bağlı olarak verimlilik değerinin hızla azaldığı belirlenmiştir.

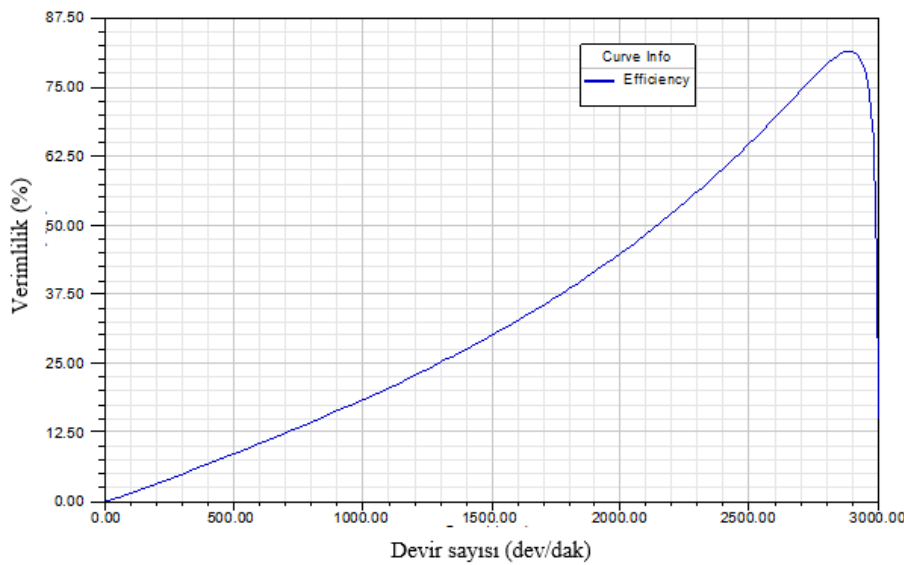
Şekil 8.26'da, 100 Hz frekans ve nominal yükleme değerinde çıkış gücüne bağlı olarak motor verimliliğindeki değişimi gösteren grafik verilmiştir.



Şekil 8.26. Çıkış gücüne bağlı olarak motor verimliliğindeki değişim ($f=100$ Hz).

Şekil 8.26’da, 100 Hz frekans ve nominal yükleme değerinde elde edilen çıkış gücü, yaklaşık olarak 5,5 kW’a ulaşmaya kadar elektrik motorunun verimliliğinin arttığı ve bu çıkış gücünde maksimum verimliliğin % 81,28 olduğu belirlenmiştir. Ancak, çıkış gücü 5,5 kW’ı aşması durumunda motor verimliliğinin azaldığı ve yaklaşık olarak % 72,5’e kadar düştüğü gözlenmiştir.

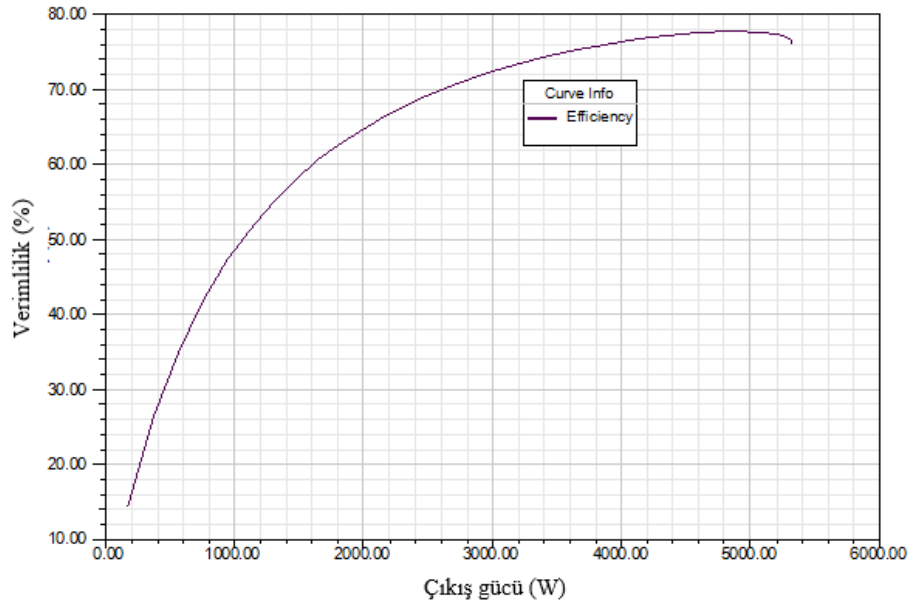
Şekil 8.27’de, 100 Hz frekans ve nominal yükleme değerlerinde hıza bağlı olarak motor verimliliğindeki değişimi gösteren grafik verilmiştir.



Şekil 8.27. Hıza bağlı olarak motor verimliliğindeki değişim ($f=100$ Hz).

Şekil 8.27’de, 100 Hz frekans ve nominal yükleme değerinde, motor hızının 2870 dev/dak değerine ulaşması ile motor verimliliğinin maksimum noktaya çıktığı (% 81,28) gözlenmiştir. Ancak, motor hızının artması sonucunda oluşan manyetik kayıplar, verimlilik değerinin hızla azalmasına sebep olmuştur.

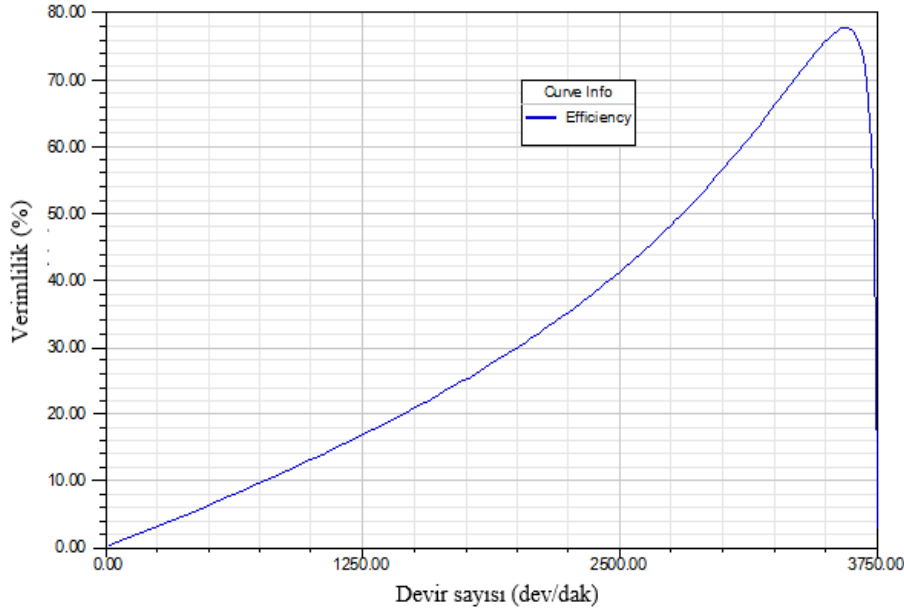
Şekil 8.28’de, 125 Hz ve nominal yükleme değerinde çıkış gücüne bağlı olarak motor verimliliğindeki değişimi gösteren grafik verilmiştir.



Şekil 8.28. Çıkış gücüne bağlı olarak motor verimliliğindeki değişim ($f=125$ Hz).

Şekil 8.28’de, 125 Hz frekans ve nominal yükleme değerinde elde edilen çıkış gücü, yaklaşık olarak 5,5 kW’a ulaşınca kadar elektrik motorunun verimliliğinin arttığı ve bu çıkış gücünde maksimum verimliliğin % 78,13 olduğu belirlenmiştir. Ancak, çıkış gücü 5,5 kW’ı aşması durumunda motor verimliliğinin azaldığı ve yaklaşık olarak % 76’ya kadar düştüğü gözlenmiştir.

Şekil 8.29’da, 125 Hz ve nominal yükleme değerinde hıza bağlı olarak motor verimliliğindeki değişimi gösteren grafik verilmiştir.



Şekil 8.29. Hıza bağlı olarak motor verimliliğindeki değişim ($f=125$ Hz).

Şekil 8.29'da, 125 Hz frekans ve nominal yükleme değerinde, motor hızının 3600 dev/dak değerine ulaşması ile motor verimliliğinin maksimum noktaya çıktığı (%78,13) gözlenmiştir. Ancak, motor hızının artması sonucunda oluşan manyetik kayıplar, verimlilik değerinin hızla azalmasına sebep olmuştur.

8.5. Maliyet Analizi

8.5.1. Motor maliyeti

Gelişen teknoloji ve nüfus artışına bağlı olarak elektrik enerjisi tüketimi dünyada artmaktadır. Teknolojinin ve nüfusun gelişimi yaşam standartlarını yükseltmiş ve insanların daha rahat yaşamaları için konforlu ortamların oluşmasını sağlamıştır. Bu durumun ana kaynağı sanayi sektörüdür. Gelişen teknolojinin ihtiyaçlarına, sanayi sektörü cevap vermeye çalışmaktadır. Sanayi sektörünün gelişimi ve üretimin artması, en büyük maliyet kalemlerinden olan elektrik enerjisi maliyetinin artmasına sebep olmaktadır.

Sanayide tüketilen enerjinin büyük bir bölümü elektrik motorları tarafından harcanmaktadır. Özellikle, enerjinin temel girdi olduğu bazı sanayi dallarında, enerjinin verimli kullanılması çok ciddi kazançlar sağlamaktadır. Gelişmiş ülkelerde, enerjinin verimli kullanılabilmesi için birçok çalışma yapılmaktadır [183]. Bu çalışmaların bir

bölümü, elektrik motorlarının verimliliği üzerinde önemli etkiye sahip olan motorun mekanik üretimi üzerinedir. Mekanik üretim, motorların stator ve rotor saclarının kesilme yöntemleri, gövde, rulman yatakları, rotor mili, kama kanalı, iç ve dış bilya ve ön kapakların hassas bir şekilde işlenebilmesi gibi prosesleri kapsamaktadır. Bu proseslerin uygulanması esnasında oluşan mekanik üretim hataları, elektrik motorlarında demir, sürtünme ve rüzgar kayıplarının artmasına sebep olmaktadır. Bu kayıplar, aynı zamanda motorların verimliliğinin düşmesine sebep olmaktadır. Bu amaçla, mekanik üretimden kaynaklanan hatalar en aza indirgenerek, elektrik motorunun verimliliği üzerindeki olumsuz etkilerin azaltılması istenmektedir. Elektrik motorlarında mekanik üretim, maliyet kalemlerinin önemli bir bölümünü oluşturmaktadır.

Bu bölümde, lazer, aşındırıcılı su jeti, tel erezyon ve kesme kalıbı ile üretilen silisli stator sac paketlerinin asenkron motorun maliyeti üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Her bir elektrik motorunun maliyet analizi değerlendirilirken, stator saclarının kesim yöntemleri ve bu kesim yöntemlerine uygun sac yerleşim ölçüleri dikkate alınarak yapılan giyotin makas kesim işçilikleri değişkenlik göstermektedir. Bu işlemler dışında, üretilen motorlara ait diğer işçilik ve malzeme maliyetleri; gövde, fan, muhafaza tası ve rulman montajı, bobinaj, rotor imalatı, vernikleme, boyama vb. işlemleri içermekte ve tüm motorlar için benzerlik göstermektedir. Çizelge 8.22-8.25’de stator sacları, farklı kesme yöntemlerine göre üretilen asenkron motorlarının üretim maliyetleri gösterilmiştir.

Çizelge 8.22. Lazer kesme yöntemi ile üretilen motor maliyeti

5,5 kW Asenkron Motor Üretimi	İmalat Süresi (dak/1 Adet Motor)	Motor Sayısı (Adet)			
		1	10	100	1000
		Maliyet (TL)/1 Adet Motor			
6 plaka 1000x2000x0,5 mm silisli sac giyotin kesim işçiliği	30	125	110	90	75
Stator sac kesim işçiliği	171	907	840	800	740
Diğer işçilik ve malzeme maliyetleri	565	500	450	400	350
Genel Toplam	766	1532	1400	1290	1165

Çizelge 8.23. Aşındırıcılı su jeti kesme yöntemi ile üretilen motor maliyeti

5,5 kW Asenkron Motor Üretimi	İmalat Süresi (dak/1 Adet Motor)	Motor Sayısı (Adet)			
		1	10	100	1000
		Maliyet (TL)/1 Adet Motor			
6 plaka 1000x2000x0,5 mm silisli sac giyotin kesim işçiliği	30	125	110	90	75
Stator sac kesim işçiliği	1440	3825	3700	3500	3250
Diğer işçilik ve malzeme maliyetleri	565	500	450	400	350
Genel Toplam	2035	4450	4260	3990	3675

Çizelge 8.24. Tel erezyon kesme yöntemi ile üretilen motor maliyeti

5,5 kW Asenkron Motor Üretimi	İmalat Süresi (dak/1 Adet Motor)	Motor Sayısı (Adet)			
		1	10	100	1000
		Maliyet (TL)/1 Adet Motor			
255 adet 250x250x0,5 mm silisli sac giyotin kesim işçiliği	60	174	160	140	110
Stator sac kesim işçiliği	5800	3000	2750	2500	2250
Diğer işçilik ve malzeme maliyetleri	565	500	450	400	350
Genel Toplam	6425	3674	3360	3040	2710

Çizelge 8.25. Kesme kalıbı ile üretilen motor maliyeti

5,5 kW Asenkron Motor Üretimi	İmalat Süresi (dak/1 Adet Motor)	Motor Sayısı (Adet)			
		1	10	100	1000
		Maliyet (TL)/1 Adet Motor			
200x1 500 000x0,5 mm silisli sac giyotin kesim işçiliği	30	100	90	80	70
Stator sac kesim işçiliği	5	350	300	250	200
Diğer işçilik ve malzeme maliyetleri	565	500	450	400	350
Genel Toplam	600	950	840	730	620

Çizelge 8.22-8.25'e göre maliyet açısından değerlendirme yapıldığında, kesme kalıbı yönteminin yüksek adetlerde motor üretimi için daha uygun olduğu belirlenmiştir. Ancak, bunun için 80 000 TL'lik kalıp yatırım maliyeti gerekmektedir. Bu sebeple, düşük adetlerde motor üretimi için kesme kalıbı yöntemine alternatif bir kesme yönteminin kullanılması gerekmektedir. Özellikle, prototip veya özel amaçlı motorların üretilmesinde, maliyet ve verimlilik kriterleri açısından lazer kesme yönteminin daha uygun olduğu tespit edilmiştir. Lazer kesme yönteminin yanı sıra tel erezyon ve aşındırıcılı su jeti kesme yöntemi de bu amaçla kullanılabilir. Buna göre, Çizelge 8.22-8.25'teki verilere göre

tüketici talepleri doğrultusunda, verimlilik ve maliyet açısından değerlendirme yapılarak motor üretimi için en uygun kesme yöntemi belirlenebilmektedir.

8.5.2. Enerji sarfiyatının hesaplanması

Ülkemizin enerji tüketiminde büyük paya sahip olan sanayinin yıllık elektrik enerjisi tüketim miktarı, yaklaşık olarak 68 000 GWsaat olarak tespit edilmiştir. Ülke olarak enerji alanında önemli oranda dışa bağımlı olduğumuz göz önünde bulundurulduğunda, sanayide enerji tasarrufunun ne kadar önemli olduğu ortaya çıkmaktadır. Harcanan bu enerjinin ortalama 48 000 GWsaat'ı, elektrik motorları üzerinde harcanmaktadır [183]. Bu miktar, sanayide tüketilen enerjinin % 60-70'ine tekabül etmektedir. Bu bağlamda, asenkron motorlarda yapılabilecek çok az miktarlardaki enerji tasarrufunun büyük öneme sahip olduğu düşünülmektedir.

Bu çalışma kapsamında, stator sac paketleri lazer, aşındırıcılı su jeti, tel erezyon ve kesme kalıbı ile üretilen asenkron motorların enerji sarfiyatı, TS-EN-60034-2-1-1B standardında belirtilen ve kayıpların toplanması yöntemine göre hesaplanan verimlilik değerleri dikkate alınarak belirlenmiştir. Motorların etiket değerleri, kayıpların toplanması metoduna göre belirlendiği için enerji sarfiyatının hesaplanmasında, bu yöntemde elde edilen değerler dikkate alınmıştır. Stator sac paketlerinin söz konusu kesme yöntemleri ile üretilmesi, manyetik kayıpların oluşmasına neden olmaktadır. Manyetik kayıpların oluşması ise bu motorların verimliliğinin azalmasına ve buna bağlı olarak enerji sarfiyatının artmasına sebep olmaktadır. Bu amaçla, yapılan testler sonucunda, en yüksek motor verimlilik değeri % 85,61 ile tel erezyon, en düşük değer ise % 83,1 ile su jeti kesim yöntemi ile elde edilmiştir. Buna göre, kesme yöntemlerine bağlı olarak elde edilen maksimum ve minimum verimlilik değerleri dikkate alınarak, silisli stator sacların kesme yöntemlerinden kaynaklanan verimlilik farkının, yıllık enerji sarfiyatı üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

Çizelge 8.26'da stator sac paketi tel erezyon, Çizelge 8.27'de ise aşındırıcılı su jeti kesme yöntemi ile üretilen asenkron motorun verimliliğine bağlı olarak hesaplanan yıllık enerji sarfiyatı gösterilmiştir. Enerji sarfiyatının belirlenmesinde motor verimliliği, saatte tüketilen enerji maliyeti, günlük çalışma saati, zamana bağlı şebekeden çekilen enerji miktarı gibi parametreler dikkate alınmıştır.

Çizelge 8.26. Tel erezyon kesme yöntemi ile üretilen motor için yıllık enerji sarfıyatı

Tel erezyon kesme yöntemi ile üretilen asenkron motor	Değer/Birim
P_{motor}	5,5 kW
Motor Devri	1500 dev/dak
$P_{şebeke}$	6,42 kW
Verim	% 85,61
Enerji Tüketim Maliyeti	0,28 TL/saat
1 Saatte Şebekeden Çekilen Enerji	6,42 kWsaat
Günlük Çalışma Saati	24
1 Günde Şebekeden Çekilen Enerji	154,08 kWsaat
Yıllık Çalışma Gün Sayısı	365
1 Yılda Şebekeden Çekilen Enerji	56239,2 kWsaat
1 Yılda Elektrik İdaresine Ödenen Ücret	15747 TL

Çizelge 8.27. Aşındırıcılı su jeti kesme yöntemi ile üretilen motor için yıllık enerji sarfıyatı

Aşındırıcılı su jeti kesme yöntemi ile üretilen asenkron motor	Değer/Birim
P_{motor}	5,5 kW
Motor Devri	1500 dev/dak
$P_{şebeke}$	6,61 kW
Verim	% 83,1
Enerji Tüketim Maliyeti	0,28 TL/saat
1 Saatte Şebekeden Çekilen Enerji	6,61 kWsaat
Günlük Çalışma Saati	24
1 Günde Şebekeden Çekilen Enerji	158,84 kWsaat
Yıllık Çalışma Gün Sayısı	365
1 Yılda Şebekeden Çekilen Enerji	57978,33 kWsaat
1 Yılda Elektrik İdaresine Ödenen Ücret	16234 TL

Çizelge 8.26’da görüldüğü gibi stator sac paketleri, tel erezyon kesme yöntemi ile üretilen asenkron motorun yıllık enerji sarfıyatı 15 747 TL olarak hesaplanmıştır. Çizelge 8.27’de ise stator sac paketi, aşındırıcılı su jeti ile kesilerek üretilen asenkron elektrik motorunun yıllık enerji sarfıyatı ise 16 234 TL olarak hesaplanmıştır. Stator sac paketlerinin farklı kesme yöntemleri ile üretilmesinden kaynaklanan motorlar arasındaki % 2,51’lik verimlilik farkı, bu iki motor arasında yıllık enerji sarfıyatında 487 TL’lik bir farkın oluşmasına sebep olmaktadır. Buradan da anlaşılabacağı gibi, yüksek verime sahip elektrik motorunun tercih edilmesi, işletmelerin ekonomik anlamda stratejilerinin doğru bir şekilde belirlenmesi açısından önem taşımaktadır. Örneğin, günlük üç vardiya esasına göre çalışan sanayi kuruluşlarında birçok elektrik motorunun çalıştığı düşünüldüğünde, hem küresel anlamda hem de işletmeler açısından enerjinin verimsiz kullanılması söz konusu olmaktadır.

9. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu çalışmada, silisli stator sac paketleri lazer, aşındırıcılı su jeti, tel erezyon ve kesme kalıbı ile kesilerek, bu kesme yöntemlerinin elektrik motorlarının performansları üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda kayıpların toplanması ve doğrudan ölçüm yöntemlerine göre ayrı ayrı verilmiştir;

- i. 50 Hz sabit frekans ve % 25-50-75-100 ve 125 yükleme değerlerinde kayıpların toplanması metodu (TS EN 60034-2-1-1B) ile yapılan test sonuçlarına göre;
 - Tüm yükleme oranlarında motor performansı en yüksekten düşüğe sırasıyla tel erezyon, kesme kalıbı, lazer ve aşındırıcılı su jeti ile kesme yönteminde olduğu belirlenmiştir.
 - Nominal yükleme değerinde (% 100) motor verimlilikleri sırasıyla, tel erezyon kesme yönteminde % 85,61, kesme kalıbında % 85,16, lazerde % 83,47 ve aşındırıcılı su jetinde % 83,1 olarak ölçülmüştür.
 - Nominal yükleme değerinde ölçülen demir kayıpları sırasıyla, aşındırıcılı su jetinde 0,712 kW, lazerde 0,663 kW, kesme kalıbında 0,562 kW ve tel erezyon kesme yönteminde ise 0,552 kW olarak ölçülmüştür.
 - Nominal yükleme değerinde toplam kayıplar, sırasıyla aşındırıcılı su jetinde 1,49 kW, lazerde 1,45 kW, kesme kalıbında 1,27 kW ve tel erezyon kesme yönteminde ise 1,23 kW olarak ölçülmüştür.
 - Tüm kesme yöntemlerinde en yüksek motor verimliliği, nominal yükleme değerinde elde edilmiştir.
 - Kesme kenarında oluşan çapak miktarı, en çok aşındırıcılı su jeti ile kesme yönteminde olduğu ve buna bağlı olarak demir kayıpları diğer kesme yöntemlerine göre daha fazla olduğu belirlenmiştir. Bu durum, motor performansının da azalmasına sebep olmuştur. Çapak oluşumunun en az olduğu tel erezyon kesme yönteminde ise tüm yükleme oranları için motor performansının daha iyi olduğu belirlenmiştir.
 - Silisli sacların kesilmesi esnasında kesme kenarında oluşan ortalama yüzey pürüzlülükleri, aşındırıcılı su jeti ile kesilen silisli saclarda 5,083 μm , lazerde 2,075 μm , tel erezyonda 3,43 μm ve kesme kalıbı yönteminde ise 0,771 μm olarak ölçülmüştür.

- ii. 50-75-100 ve 125 Hz frekans ve % 25-50-75-100 ve 125 yükleme değerlerinde doğrudan ölçme (TS EN 60034-2-1-1A) metodu ile yapılan test sonuçlarına göre;
- Tüm kesme yöntemlerinde, frekans ve yükleme oranının artması ile toplam kayıpların arttığı ve buna bağlı olarak motor performansının azaldığı tespit edilmiştir.
 - Frekans ve yükleme değerleri dikkate alındığında, en iyi motor verimlilikleri 50 Hz frekans ve nominal yükleme değerlerinde elde edilmiştir.
 - 50 Hz frekans ve nominal yükleme değerinde motor verimlilikleri; tel erezyonda % 89,68, kesme kalıbında % 86,81, lazerde % 85, aşındırıcılı su jetinde ise % 83,06 olarak tespit edilmiştir.
 - En düşük motor verimliliği, 125 Hz frekans ve % 25 yükleme oranında % 48,76 ile aşındırıcılı su jetinde, en yüksek motor performansı ise 50 Hz frekans ve nominal yüklemede % 89,68 ile tel erezyon kesme yönteminde ölçülmüştür.
 - Toplam kayıplar, en yüksek 125 Hz frekans ve % 25 yükleme değerlerinde aşındırıcılı su jetinde 2,81 kW, en düşük değerler ise 50 Hz frekans ve nominal yüklemede 0,567 kW olarak ölçülmüştür.
 - Lazer kesme yönteminde toplam kayıplar için oluşturulan YSA modelinde verilerin eğitilmesi ve test edilmesi sonucunda korelasyon katsayıları, sırasıyla $R^2=0,996$ ve $R^2=0,897$, motor verimliliği için oluşturulan YSA modelinde ise sırasıyla $R^2=0,973$ ve $R^2=0,953$ olarak hesaplanmıştır.
 - Aşındırıcılı su jeti ile kesme yönteminde toplam kayıplar için oluşturulan YSA modelinde verilerin eğitilmesi ve test edilmesi sonucunda korelasyon katsayıları, sırasıyla, $R^2=0,982$ ve $R^2=0,90$, motor verimliliği için oluşturulan YSA modelinde ise sırasıyla $R^2=0,968$ ve $R^2=0,934$ olarak hesaplanmıştır.
 - Tel erezyon kesme yönteminde ise toplam kayıplar için oluşturulan modelde verilerin eğitilmesi ve test edilmesi sonucunda elde edilen korelasyon katsayıları sırasıyla, $R^2=0,971$ ve $R^2=0,874$, motor verimliliği için $R^2=0,987$ ve $R^2=0,910$ olarak hesaplanmıştır.
 - Kesme kalıbı yönteminde toplam kayıplar için YSA modelinde ise verilerin eğitilmesi ve test edilmesi ile elde edilen korelasyon katsayıları sırasıyla, $R^2=0,999$ ve $R^2=0,929$, motor verimliliği için $R^2=0,971$ ve $R^2=0,964$ olarak belirlenmiştir.
 - ANOVA sonuçlarına göre, toplam kayıplar ve motor verimliliği üzerinde, yükleme oranının etkili olduğu belirlenmiştir.

- Lazer kesme yönteminde motor yükleme oranının, toplam kayıplar ve motor verimliliği üzerinde sırasıyla % 13,49 ve % 13,38'lik bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir.
- Aşındırıcılı su jeti ile kesme yönteminde motor yükleme oranının, toplam kayıplar ve motor verimliliği üzerinde sırasıyla % 26,86 ve % 26,82'lik bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir.
- Tel erezyon kesme yönteminde motor yükleme oranının, toplam kayıplar ve motor verimliliği üzerinde sırasıyla % 12,41 ve % 12,5'lik bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir.
- Kesme kalıbı yönteminde motor yükleme oranının, toplam kayıplar ve motor verimliliği üzerinde sırasıyla % 11,57 ve % 11,53'lik bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir.
- Ansys Maxwell RMaxprt yazılımı ile kesme kalıbı yöntemi için 50-75-100-125 Hz frekans ve nominal yükleme değerlerinde, motor hızı ve çıkış gücünün motor verimliliği üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Buna göre, nominal yük, 1500 dev/dak motor hızı ve 5,5 kW çıkış gücü değerlerinde maksimum verimlilik değerinin ölçüldüğü gözlenmiştir.
- Yüksek adetlerde motor üretimi için kesme kalıbı ile üretim yönteminin maliyet açısından daha elverişli olduğu, ancak prototip veya özel amaçlı motorların üretilmesinde lazer ve tel erezyon ile kesme yönteminin kullanılabileceği belirlenmiştir.
- Tel erezyon ve aşındırıcılı su jeti kesme yöntemleri ile üretilen motorların verimlilikleri arasındaki % 2,51'lik fark, bir adet motor için yıllık enerji tasarrufu 487 TL olmaktadır.

Çalışma sonucunda elde edilen veriler ışığında aşağıdaki öneriler yapılabilir;

- Rotorun üretilmesi esnasında kullanılan alüminyum enjeksiyon döküm yöntemine alternatif olarak bakır enjeksiyon yöntemi veya iletkenlik katsayısı yüksek malzemeler kullanılarak, bu üretim metodunun motor performansı üzerindeki etkisi araştırılabilir.
- Lazer ile kesme yöntemine alternatif olarak fiber lazer teknolojisi kullanılarak, bu kesme yönteminin motor performansı üzerindeki etkisi araştırılabilir.
- Silisli sacların paketlenmesinde kullanılan kaynaklı birleştirme metoduna alternatif olarak, perçinli veya özel tırnaklı birleştirme yöntemi kullanılarak, bunların sonuçları araştırılabilir.
- Motorda kullanılan mekanik bağlantı elemanlarının (rulman, segman, fan, rotor mili vb.) motor verimlilikleri üzerindeki etkileri araştırılabilir.

KAYNAKLAR

1. International Energy Agency. (2013). *World energy Outlook: Organisation for Economic Co-operation and Development*. Paris, France: International Energy Agency, 1026-1141.
2. Mecrow, B., and Jack, A. (2008). Efficiency trends in electric machines and drives. *Energy Policy*, 36(12), 4336-4341.
3. İnternet: Commission Regulation (EC). *Official Journal of the European Union*. URL: <http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Feur-lex.europa.eu%2Flegal-content%2FEN%2FTXT%2F%3Furi%3DCELEX%3A32009R0640&date=2015-12-27>. Son Erişim Tarihi: 27.12.2015.
4. International Standard IEC. (2014). 60034-30-1: *Rotating electrical machines – Part 30-1: Efficiency classes of line operated AC motors (IE code)*. Brussels: International Standard IEC.
5. Almeida, A., Ferreira, F., and Fong, J. (2011). Standards for efficiency of electric motors. *IEEE Industry Applications Magazine*, 17(1), 12-19.
6. Krings, A. (2014). *Iron Losses in Electrical Machines-Influence of Material Properties, Manufacturing Processes and Inverter Operation*, Ph.D. Thesis, KTH Electrical Engineering, Sweden, 1-3.
7. Elektrik İşleri Etüt İdaresi Genel Müdürlüğü. (2002). *Sanayide Enerji Yönetimi Esasları*. Ankara: Ulusal Enerji Tasarrufu Merkezi, 3.
8. İnternet: Elektrik Motor Sistemlerinde Enerji Verimliliği. *Elektrik İşleri Etüt İdaresi Genel Müdürlüğü*. URL: http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.eie.gov.tr%2Fverimlilik%2Fdocument%2FElektrik_Motorlari.pdf&date=2015-12-27. Son Erişim Tarihi: 27.12.2015.
9. Türkmen, B. (2011). Daha Verimli Pompa Sistemleri için Yeni Nesil PM-Destekli Senkron Elektrik Motorları. *Tesisat Mühendisliği*, 125,15-20.
10. Alkar, K. (2009). *Measuring Power Losses of Electrical Steel Sheets in One and Two Dimensional Magnetic Fields*, M.Sc. Thesis, Helsinki University of Technology, Department of Electrical and Communication Engineering, Helsinki, Finland.
11. Zhong, J., Guo, Y., Zhu, J., Lu, H., and Jin, J. (2007). Development of Measuring Techniques for Rotational Core Losses of Soft Magnetic Material. *Nature Sciences*. 2(1), 1-12.
12. Demir, A., ve Saraç, Z. (2013). Tek Sac Testi (SST) Yöntemi ile Nüve Malzemelerinin Manyetik Kayıplarının Ölçülmesi. *TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası*, 3(6), 99-105.

13. Nakata, T., Nakano, M., and Kawahara, K. (1992). Effects of stress due to cutting on magnetic characteristics of silicon steel. *IEEE Translation Journal on Magnetics in Japan*, 7(6), 453-457.
14. Moses, A.J., Derebasi, N., Loisos, G., and Schoppa, A. (2000). Aspects of the cut-edge effect stress on the power loss and flux density distribution in electrical steel sheets. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 215, 690-692.
15. Ossart, F., Hug, E., Hubert, O., Buvat, C., and Billardon, R. (2000). Effect of punching on electrical steels: Experimental and numerical coupled analysis. *IEEE Transactions on Magnetics*, 36(5), 3137-3140.
16. Wenmin, S., Jing, L., and Changyi, L. (2014). Effect of Cutting Techniques on the Structure and Magnetic Properties of a High-grade Non-oriented Electrical Steel. *Journal of Wuhan University of Technology-Materials Science*, 29(6), 1246-1251.
17. Emura, M., Landgraf, F.J.G., Ross, W., and Barreta, J.R. (2003). The influence of cutting technique on the magnetic properties of electrical steels. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 254, 358-360.
18. Belhadj, A., Baudouin, P., Breaban, F., Deffontaine, A., Dewulf, M., and Houbaert, Y. (2003). Effect of Laser Cutting on Microstructure and on Magnetic Properties of Grain Non-Oriented Electrical Steels. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 256(1), 20-31.
19. Dickmann, K. (1990). Influence of the laser cutting process on the magnetic properties of electrical sheets. *Anales De Fisica Serie B*, 86, 82.
20. Dupre, L.R., Kerr, R.V., and Melkebeek, J.A.A. (1998). *A Study of the Influence of laser cutting and punching on the electromagnetic behaviour of electrical steel sheets using a combined finite element-dynamic Preisach model*. Paper presented 4th International Workshop on Electric and Magnetic Fields, 195, Marseille, France.
21. Liu, Y., Kashif, S.K., and Sohail, A.M. (2008). *Enginnering considerations on additional iron losses due to rotational fields and sheet cutting*, Paper presented at the 18th Proceedings of the International Conference on Electrical Machines, 1-4, Portugal.
22. Lebouc, A.K., Cornut, B., Perrier, J.C., Manfe, P.H., and Chevalier, T.H. (2003). Punching influence on magnetic properties of the stator teeth of an induction motor. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 254, 124-126.
23. Boglietti, A., Cavagnino, A., Lazzari, M., and Pastorelli, M. (2001). *Effects of Punch Process on the Magnetic and Energetic Properties of Soft Magnetic Material*, Paper presented at the Electric Machines and Drives Conference IEEE International, 396-399, Cambridge, United Kingdom.
24. Oka, M., Kawano, M., Shimada, K., Kai, T., and Enokizono, M. (2011). Evaluation of the Magnetic Properties of the Rotating Machines for the Building Factor Clarification. *Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review)*, 87(9B), 43-46.

25. Smith, A.C., and Edey, K. (1995). *Influence of Manufacturing Processes on Iron Losses*. Paper presented at the 7th International Conference on Electrical Machines and Drives, 77-81, Durham, United Kingdom.
26. Gomes, E., Schneider, J., Verbeken, K., Pasquarellay, G. and Houbaert, Y. (2010). Dimensional Effects on Magnetic Properties of Fe-Si Steels due to Laser and Mechanical Cutting. *IEEE Transaction on Magnetics*, 46(2), 213-216.
27. Loisos, G., and Moses, A.J. (2005). Effect of mechanical and Nd:YAG laser cutting on magnetic flux distribution near the cut edge of non-oriented steels. *Journal of Materials Processing Technology*, 161(1), 151-155.
28. Howard, J.L., and Rhett, M.J. (2013). *Accelerated Prototyping of Electric Machine Laminates Using High Throughput Profile Milling*, Paper presented at the IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), 440-447, Chicago, USA.
29. Gmyrek, Z., Cavagnino, A. and Ferraris, L. (2012). *Estimation of Magnetic Properties and Damaged Area Width Due to Punching Process: Modeling and Experimental Research*, Paper presented at the XXth International Conference on Electrical Machines (ICEM), 1301-1308, Marseille, France.
30. Vandenbossche, L., Jacobs, S., Andreux, R., Labbe, N. and Attrazic, E. (2009). *An innovative approach for the evaluation of iron losses in magnetic laminations, applied to the optimization of highly saturated electric motors*, Paper presented at the Inductica Technical Conference Programme, 129-140, Berlin.
31. Siebert, R., Lütke, M., Wetzig, A., Thonig, H. and Beyer, E. (2009). *Experimental findings on high power laser cutting of non-oriented electrical steel*, Paper presented at the International Conference Magnetism and Metallurgy WMM'12, 5, 1-10, Ghent, Belgium.
32. Kurosaki, Y., Mogi, H., Fujii, H., Kubota, T. and Shiozaki, M. (2008). Importance of punching and workability in non-oriented electrical steel sheets. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 320 (20), 2474-2480.
33. Arshad, W.M., Ryckebusch, T., Magnussen, F., Lendenmann, H., Eriksson, B., Soulard, J., and Malmros, B. (2007). *Incorporating lamination processing and component manufacturing in electrical machine design tools*, Paper presented at the Industry Applications Conference on 42nd IAS Annual Meeting IEEE, 94-102, New Orleans, USA.
34. Schoppa, A., Louis, H., Pude, F. and Von, R.C. (2003). Influence of abrasive waterjet cutting on the magnetic properties of non-oriented electrical steels. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 254, 370-372.
35. Rygal, R., Moses, A.J., Derebasi, N., Schneider, J. and Schoppa, A. (2000). Influence of cutting stress on magnetic field and flux density distribution in non-oriented electrical steels. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 215(1), 687-689.

36. Boehm, A., and Hahn, I. (2014). *Influence of geometric parameters and cutting edge deterioration on the differential inductances*, Paper presented at the IEEE 5th International Symposium, 1-6, Hiroshima, Japan.
37. Crevecoeur, G., Sergeant, P., Dupre, L., Vandenbossche, L., and Walle, R.V. (2008). Analysis of the Local Material Degradation Near Cutting Edges of Electrical Steel Sheets. *IEEE Transactions On Magnetics*, 44(11), 3173-3176.
38. Siebert, R., Schneider, J., and Beyer, E. (2014). Laser Cutting and Mechanical Cutting of Electrical Steels and its Effect on the Magnetic Properties. *IEEE Transaction On Magnetics*, 50(4), 1-4.
39. Klimczyk, P.K., Anderson, P., Moses, A., and Davies, M. (2012). Influence of Cutting Techniques on Magnetostriction Under Stress of Grain Oriented Electrical Steel. *IEEE Transaction On Magnetics*, 48(4), 1417-1420.
40. Takahashi, N., Morimoto, H., Yunoki, Y., and Miyagi, D. (2008). Effect of shrink fitting and cutting on iron loss of permanent magnet motor. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 320, 925-928.
41. Gaworska-Koniarek, D., Szubzda, B., Wilczynski, W., Drosik, J., and Karas, K. (2011). The influence of assist gas on magnetic properties of electrotechnical steel sheets cut with laser. *Journal of Physics: Conference Series*, 1-7.
42. Bali, M., and Muetze, A. (2014). *Influences of CO₂ and FKL-laser cutting as well as mechanical cutting on the magnetic properties of electric steel sheets determined by Epstein frame and stator lamination stack measurements*, Paper presented at the IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 1443-1450, Pittsburgh, USA.
43. Mucha, J. (2010). An experimental analysis of effects of various material tool's wear on burr during generator sheets blanking. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 50(5), 495-507.
44. Clerc, A.J., and Muetze, A. (2012). Measurement of Stator Core Magnetic Degradation During the Manufacturing Process. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 48(4), 1344-1352.
45. Steentjes, S., Franck, D., Hameyer, K., Vogt, S., Bednarz, M., Volk, W., Dierdorf, J., Hirt, G., Schnabel, V., Mathur, H.N., and Korte-Kerzel, S. (2014). *On the Effect of Material Processing: Microstructural and Magnetic Properties of Electrical Steel Sheets*, Paper presented at the 4th International Electric Drives Production Conference (EDPC), 1-7, Nuremberg, Germany.
46. Krings, A., Nategh, S., Wallmark, O., and Soulard, J. (2012). *Influence of the Welding Process on the Magnetic Properties of a Slot-less Permanent Magnet Synchronous Machine Stator Core*, Paper presented at the XXth International Conference on Electrical Machines (ICEM), 1333-1338, Marseille, France.

47. Harstick, H.M.S., Ritter, M., and Riehemann, W. (2014). Influence of Punching and Tool Wear on the Magnetic Properties of Nonoriented Electrical Steel. *IEEE Transactions on Magnetics*, 50(4), 1-4.
48. Takezawa, M., Kitajima, K., Morimoto, Y., Yamasaki, J., and Kaido, C. (2006). Effect of Strain by Mechanical Punching on Nonoriented Si-Fe Electrical Sheets for a Nine-Slot Motor Core. *IEEE Transactions on Magnetics*, 42(10), 2790-2792.
49. Hamzehbahmani, H., Anderson, P., Hall, J., and Fox, D. (2013). Eddy Current Loss Estimation of Edge Burr-Affected Magnetic Laminations Based on Equivalent Electrical Network-Part 1: Fundamental Concepts and FEM Modeling. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 29(2), 642-650.
50. Maurel, V., Ossart, F., and Billardon, R. (2003). Residual stresses in punched laminations: Phenomenological analysis and influence on the magnetic behavior of electrical steels. *Journal of Applied Physics*, 93(10), 7106-7108.
51. Vandenbossche, L., Jacobs, S., Jannot, X., McClelland, M., Saint-Michel, J., and Attrazic, E. (2013). *Iron loss modeling which includes the impact of punching, applied to high-efficiency induction machines*, Paper presented at the 3rd International Electric Drives Production Conference (EDPC), 1-10, Nuremberg, Germany.
52. Senda, K., Ishida, M., Nakasu, Y., and Yagi, M. (2006). Influence of shearing process on domain structure and magnetic properties of non-oriented electrical steel. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 304(2), 513-515.
53. Wilczynski, W. (2003). Influence of magnetic circuit production for their magnetic properties. *Journal of Materials Science*, 38(24), 4905-4910.
54. Kut, S., Mucha, J., and Stachowicz, F. (2003). *TiN Coated Steels As a Material For Blanking Stamps*, Paper presented at the 5th International Multidisciplinary Conference, 307-312.
55. Hug, E., Marouani, H., and Rachik, M. (2005). *Experimental and Numerical Study of Ferromagnetic Sheet Punching: Effect of Velocity*, Paper presented at the 8th International Conference on Technology of Plasticity (ICTP), 75-81, Verone, Italy.
56. Landgraf, F.J.G., and Emura, M. (2002). Losses and permeability improvement by stress relieving fully processed electrical steels with previous small deformations. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 242(1), 152-156.
57. Scutaru, G., Gavrilă, H., and Peter, I. (2014). An Estimation Method of the Manufacturing Process' Effect on Iron Losses. *Advances in Electrical and Computer Engineering*, 14(2), 49-52.
58. Krings, A., Nategh, S., Wallmark, O., and Soulard, J. (2014). Influence of the Welding Process on the Performance of Slotless PM Motors With SiFe and NiFe Stator Laminations. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 50(1), 296-306.

59. Jeong, K., Ren, Z., Yoon, H., and Koh, C.S. (2014). Measurement of Stator Core Loss of an Induction Motor at Each Manufacturing Process. *Journal of Electrical Engineering&Technology*, 9(4), 1309-1314.
60. Marouani, H., Ismail, A.B., and Rachik, M. (2008). Rate-dependent constitutive model for sheet metal blanking investigation. *Materials Science&Engineering:A*, 487(1), 162-170.
61. Oka, M., Ogasawara, T., Kawano, N., and Enokizono, M. (2014). Estimation of Suppressed Iron Loss by Stress-Relief Annealing in an Actual Induction Motor Stator Core by Using the Excitation Inner Core Method. *IEEE Transaction on Magnetics*, 50(11), 1-4.
62. Hooper, I. (2011). *Development of in-wheel motor systems for formula sae electric cars*, M.Sc. Thesis, School of Electrical Electronic and Computer Engineering, The University of Western Australia.
63. Ocak, C. (2013). *Elektrikli Araçlar İçin Üç Kademeli Yeni Bir Fırçasız DA Motoru Tasarımı, Analizi ve Uygulaması*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
64. Rizzoni, G. (1996). *Principles and applications of electrical engineering* (6th Edition). London: Mc Graw-Hill.
65. Durak, B., Yeksan, A.Y., ve Ergene, L.T. (2014). *Anahtarlamalı Relüktans Motorlarda Sürücü Devrelerinin Karşılaştırılması*. Eleco Elektrik-Elektronik-Bilgisayar ve Biyomedikal Mühendisliği Sempozyumunda sunuldu, 282-287, Bursa.
66. Wang, S., Zhan, O., Ma, Z., and Zhou, L. (2005). Implementation of a 50-Kw Four-Phase Switched Reluctance Motor Drive System for Hybrid Electric Vehicle. *IEEE Transactions on Magnetics*, 41(1), 501-504.
67. Rolling bearings and seals in electric motors and generators. (2013). *SKF Group*.
68. Vrancik, J.E. (1968). Prediction of windage power loss in alternators, *NASA technical note TN D-4849*, 1-18.
69. Saari, J. (1998). *Thermal analysis of high-speed induction machines*, Ph.D. Thesis, Aalto University Electrical Engineering, Helsinki, Finland.
70. Pyrhonen, J., Jokinen, T., and Hrabovcova, V. (2009). *Design of Rotating Electrical Machines*. United Kingdom: John Wiley & Sons.
71. Jordan, H. (1924). Die ferromagnetischen Konstanten für schwache Wechselfelder. *Elektrische Nachrichtentechnik*, 1, 8.
72. Bertotti, G. (1988). General properties of power losses in soft ferromagnetic materials. *IEEE Transactions on Magnetics*, 24(1), 621-630.

73. Boll, R. (1990). *Weichmagnetische Werkstoffe: Einführung in den Magnetismus* (4th edition). Germany: Publicis Corporate Publishing.
74. Pry, R.H., and Bean, C.P. (1958). Calculation of the energy loss in magnetic sheet materials using a domain model. *Journal of Applied Physics*, 29(3), 532-533.
75. Bertotti, G. (1985). Physical interpretation of eddy current losses in ferromagnetic materials I. Theoretical considerations. *Journal of Applied Physics*, 57(6), 2110-2117.
76. Bertotti, G. (1985). Physical interpretation of eddy current losses in ferromagnetic materials II. Analysis of experimental results. *Journal of Applied Physics*, 57(6), 2118-2126.
77. Bertotti, G., Schino, G. D., Milone, A. F., and Fiorillo, F., (1985). On the effect of grain size on magnetic losses of 3% non-oriented SiFe. *Le Journal de Physique Colloques*, 46(6), 385.
78. Fiorillo, F., and Novikov, A. (1990). An improved approach to power losses in magnetic laminations under nonsinusoidal induction waveform. *IEEE Transactions on Magnetics*, 26(5), 2904-2910.
79. İnternet: International Electrotechnical Comission. URL: <http://www.webcitation.org/query?url=https%3A%2F%2Fwebstore.iec.ch%2Fpublication%2F2062&date=2015-12-27>. Son Erişim Tarihi: 27.12.2015.
80. İnternet: ASTM International A348/A348M. URL: <http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.astm.org%2FDATA%2FBASE%2FHISTORICAL%2FA348A348M-05.htm&date=2015-12-27>. Son Erişim Tarihi: 27.12.2015.
81. İnternet: ASTM International A343/A343M. URL: <http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.astm.org%2FStandards%2FA343.htm&date=2015-12-27>. Son Erişim Tarihi: 27.12.2015.
82. İnternet: International Standard IEC 60404-6. URL: <http://www.webcitation.org/query?url=https%3A%2F%2Fwebstore.iec.ch%2Fpublication%2F2079&date=2015-12-27>. Son Erişim Tarihi: 27.12.2015.
83. İnternet: International Standard IEC 60034-2-1. URL: <http://www.webcitation.org/query?url=https%3A%2F%2Fwebstore.iec.ch%2Fpublication%2F121&date=2015-12-27>. Son Erişim Tarihi: 27.12.2015.
84. Steinmetz, C. (1984). On the law of hysteresis (orjinal basım yılı 1892). *Proceedings of the IEEE*, 72(2), 197-221.
85. Hambli, R., Richir, S., Crubleau, P., and Taravel, B. (2003). Prediction of optimum clearance in sheet metal blanking processes. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 22(1), 20-25.

86. Choy, C.M., and Balendra, R. (1996). *Experimental analysis of parameters influencing sheared-edge profiles*. Paper presented at the 5th international conference on sheet metal, University of Twente, 101-110, Netherlands.
87. Kasuga, Y., Tsutsumi, S., and Mori, T. (1979). Investigation into shearing process of ductile sheet metals. *Mem. Faculty Engineering Nagoya University*, 1-46, Japan.
88. Lange, K. (1985). *Blanking and Piercing Handbook of Metal Forming*. USA: McGraw-Hill Book Company.
89. Grünbaum, M. (1996). *Influence of High Cutting Speeds on the Quality of Blanked Parts*. Report No. ERC/NSM-S-96-19, University of Stuttgart, Germany.
90. Luo, S.Y. (1999). Effect of the geometry and the surface treatment of punching tools on the tool life and wear conditions in the piercing of thick steel plate. *Journal of Materials Processing Technology*, 88(1), 122-133.
91. Lascoe, O.D. (1988). *Handbook of Fabrication Processes*. Ohio: ASM International.
92. Hambli, R. (2001). Finite element model fracture prediction during sheet-metal blanking processes. *Engineering Fracture Mechanics*, 68(3), 365-378.
93. Svahn, O. (1993). Superfast blanking prevents defects. *ASM International*, 144(4), 30-32.
94. Sun, S., and Brandt, M. (2013). *Laser beam machining*. Nontraditional Machining Processes, Chapter 2, Springer-Verlag, 47.
95. Ezpeleta, D.T. (2013). *Contribution to laser milling process parameters selection for process planning operations*, Ph.D. Thesis, University of Girona, Girona, Spain.
96. Pham, D.T., Dimov, S.S., Ji, C., Petkov, P.V., and Dobrev, P. (2004). Laser milling as a 'rapid' micromanufacturing process. *Proc. Inst. Mech. Eng. Pt. B: Journal Engineering Manufacture*, 218(1), 1-7.
97. Chichkov, B.N., Momma, C., Nolte, S., Alvensleben, F.V., and Tu, A. (1996). Femtosecond, picosecond and nanosecond ablation laser ablation of solids. *Applied Physics A*, 63(2), 109-115.
98. John, C.I. (2004). *Laser processing of engineering materials*. Great Britain: Butterworth-Heinemann, 347-365.
99. Patel, D.M. (2015). *Investigations on the performance characteristics of fiber Laser cutting during sheet metal cutting operations*, Ph.D. Thesis, Faculty of Engineering&Technology, Kherva-384012, Mehsana, India.
100. Tunna, L., Kearns, A., O'Neill, W., and Sutcliffe, C.J. (2001). Micromachining of copper using Nd:YAG laser radiation at 1064, 532, and 355 nm wavelengths. *Optics & Laser Technology*, 33(3), 135-143.

101. Li, K. (2011). *Laser Micro-processing of Silicon using Nanosecond Pulse Shaped Fibre Laser at 1 μm Wavelength*, Ph.D. Thesis, University of Cambridge, Institute for Manufacturing Department of Engineering, United Kingdom.
102. Ion, J.C. (2005). *Laser processing of engineering materials: principles, procedure and industrial application*. Oxford: Butterworth-Heinemann.
103. Gillner, A., Holtkamp, J., Hartmann, C., Olowinsky, A., Gedicke, J., Klages, K., Bosse, L., and Bayer, A. (2005). Laser applications in microtechnology. *Journal of Materials Processing Technology*, 167(2), 494-498.
104. Poprawe, R., and König, W. (2001). Modeling, monitoring and control in high quality laser cutting. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 50(1), 137-140.
105. Schuöcker, D., and Abel, W. (1984). *Material removal mechanism of laser cutting*. Paper presented at the Proceedings Industrial Applications and High Power Lasers, 455, 88-95, Linz, Austria.
106. Belic, I., and Stanic, J. (1987). A method to determine the parameters of laser iron and steel cutting. *Optics&Laser Technology*, 19(6), 309-311.
107. Belic, I. (1989). A method to determine the parameters of laser cutting. *Optics&Laser Technology*, 21(4), 277-278.
108. Xiao, Z. (2007). *Fiber laser cutting of mild steel*, M.Sc. Thesis, Department of mechanical engineering, Lappeenranta University of Technology, Finland.
109. Duflou, J.R., Kruth, J.P., and Bohez, E.L. (2001). Contour cutting of pre-formed parts with abrasive waterjet using 3-axis nozzle control. *Journal of Materials Processing Technology*, 115(1), 38-43.
110. Erik, N. (2014). *Application of water jet cutting for tunnel boring*, M.Sc. Thesis, University of Stavanger, Faculty of Science and Technology, Norway.
111. Kovacevic, R. (1991). Surface Texture in Abrasive Waterjet Cutting. *Journal of Manufacturing System*, 10(1), 6-32.
112. Momber, A.W., and Kovacevic, R. (1998). *Principle Abrasive of Water Jet Machining*, Newyork: Springer.
113. Hashish, M. (1984). *On the modeling abrasive water jet cutting*. Paper presented at the 7th The International Symposium on Jet Cutting Technology, 249-265, Ottawa, Canada.
114. Kovacevic, R. (1992). Monitoring the dept of abrasive water jet penetration. *International Journal of Machine Tool&Manufacture*, 32(5), 725-736.
115. El-Domiaty, A.A., Shabara, M.A., Abdel-Rahman, A.A., and Al-Sabaeh, A.K. (1996). On the modelling of abrasive waterjet cutting. *International of Advanced Manufacturing Technology*, 12(4), 255-265.

116. Hashish, M. (1984). A modelling study of metal cutting with abrasive waterjets. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 106(1), 88-100.
117. Hashish, M. (1989). Pressure effects in abrasive waterjet machining. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 111(3), 221-228.
118. Chang, J.C., Huang, S.B., and Lin, C.M. (2006). Effects of Inlet Surface Roughness, Texture, and Nozzle Material on Cavitation. *Atomization and Sprays*, 16(3), 299-317.
119. Nyantekyi-Kwakye, B. (2011). *Experimental Examination of Nozzle Geometry on Water Jet in a Subsonic Crossflow*, M.Sc. Thesis, The University of Manitoba, Department of Mechanical and Manufacturing Engineering, Manitoba, Canada.
120. Abd-Alaal, K.H.M. (2012). *Experimental and Theoretical Study of the Characteristics of Submerged Horizontal Gas Jets and Vertical Plunging Water Jets in Water Ambient*, Ph.D. Thesis, Polytechnic University of Valencia Institute for Energy Engineering Department of Chemical and Nuclear Engineering, Spain.
121. Chen, L., Siores, E., and Wong, W.C.K. (1996). Control of the Abrasive Waterjet Cutting Process. *Mechanical Engineering Transactions*, 21(1), 61-67.
122. Momber, A., and Kovacevic, R. (1994). Fundamental Investigations on Concrete Wear by High Velocity Water Flow. *Wear*, 177(1), 55-62.
123. Hoogstrate, A.M., Karpuschewski, B., Luttervelt, C.A.V., and, Kals, H.J.J. (2002). Modelling of high velocity, loose abrasive machining processes. *Annals of CIRP*, 51(1), 263-266.
124. Wang, J. (2003). *Abrasive waterjet machining of engineering materials*. Uetikon-Zuerich: Transactions Technology Publications, Switzerland.
125. Bortolussi, A., and Ciccu, R. (1998). *Contour cutting of thick steel plates*, Paper presented at the 14th International Conference Jetting Technology, 273-284, Brugge, Belgium.
126. Liao, Q.D., Jin, Q., Zhong, S.Y., and Zhao, X.D. (1989). *Multipass Cutting of High Velocity Water Jets Under the Condition of Equability of Energy*, Paper presented at the Proceeding of the 5th American Water Jet Conference, 379-387, Toronto, Canada.
127. Wang, J. (2000). *Analysis of the cutting performance in multipass abrasive water jet machining*, Paper presented at the Third International Symposium on Advances in Abrasive Technology, 241-248, Hawaii, USA.
128. Wang, J., and Guo, D.M. (2003). The cutting performance in multipass abrasive waterjet machining of industrial ceramics. *Journal of Material Processing Technology*, 133(3), 371-377.
129. Hashish, M. (1991). Optimization factors in abrasive-waterjet machining. *Journal of Engineering for Industry*, 113(1), 29-37.

130. Wang, J., Kuriyagawa, T., and Huang, C.Z. (2003). An Experimental Study to Enhance the Cutting Performance in Abrasive Waterjet Machining. *Machining Science and Technology*, 7(2), 191-207.
131. Ramulu, M., and Arola, D. (1994). Influence of abrasive water jet cutting conditions on the surface quality of graphite/epoxy laminates. *International Journal of Machine Tool&Manufacture*, 34(3), 295-313.
132. Ahmadi-Brooghani, S.Y., Hassanzadeh, H., and Kahhal, P. (2007). Modeling of Single-Particle Impact in Abrasive Water Jet Machining. *Proceeding of World Academy of Science: Engineering and Technology*, 26, 243-248.
133. Chen, W.L., and Geskin, E.S. (1990). *Measurement of the velocity of abrasive waterjet by the use of laser transit anemometer*, Paper presented at the Proceedings of 10th International Symposium on Jet Cutting Technology, 23-36, Amsterdam, Netherlands.
134. Liu, H. (2004). *A Study of the Cutting Performance in Abrasive Waterjet Contouring of Alumina Ceramics and Associated Jet Dynamic Characteristics*, Ph.D. Thesis, Manufacturing and Medical Engineering, Queensland University of Technology, Australia.
135. Li, F. (1996). *Experimental and Numerical Investigation of Abrasive Waterjet Polishing Technology*, Ph.D. Thesis, Department of Mechanical Engineering, New Jersey's Institute and Technology University, USA.
136. Finnie, I., Levy, A., and Fandden, D.H. (1977). Fundamental Mechanisms and the Erosive Wear of Ductile Metals by Solid Particles, *Erosion: Prevention and Useful Applications*, ASTM Publication, 664, 36-58.
137. Hebling, M. (1988). *Basic investigations into cutting rocks by abrasive water jets*, Ph.D. dissertation, RWTH Aachen, Germany.
138. Momber, A.W., and Kovacevic, R. (2000). Particle-size distribution influence in high-speed erosion of aluminium. *Particulate Science&Technology-Taylor&Francis*, 18(3), 199-212.
139. Hashish, M. (1986). *Aspects of abrasive waterjet performance optimization*, Paper presented at the Proceedings of the 8th International Symposium on Jet Cutting Technology, 297- 308, Durham.
140. Alman, D.E., Tylczak, J.H., and Hebsur, M.G. (1999). Solid Particle Erosion Behaviour of a $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-MoSi}_2$. *Materials Science and Engineering:A*, 261(1), 245-251.
141. Zeng, J., and Kim, T.J. (1992). *Development of an abrasive waterjet kerf cutting model brittle materials*, Paper presented at the Proceedings of 11th International Conference on Jet Cutting Technology, Kluwer Academic Publishers, 483-501, Scotland.

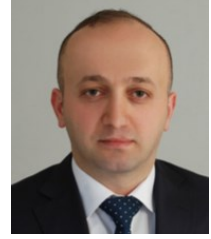
142. Chen, L., Siores, E., and Wong, W.C.K. (1996). Kerf characteristics in abrasive waterjet cutting of ceramic materials, *International Journal of Machine Tool&Manufacture*, 36(11), 1201-1206.
143. Hashish, M. (1984). *Abrasive-Waterjet Cutting Studies*, Paper presented at the Proceedings 11th Conference on Production Research and Technology, 101-111, Michigan, USA.
144. Hashish, M. (1991). Characteristics of surfaces machined with abrasive-waterjets. *Journal of Engineering Materials and Technology-Transactions of the ASME*, 113(3), 354-362.
145. Chung, Y., Geskin, E.S., and Singh, P. (1992). Prediction of the geometry of kerf created in the course of abrasive waterjet machining ductile materials. *In Jet Cutting Technology*, 13, 525-541.
146. Wang, J., and Wong, W.C.K. (2002). A Study of abrasive waterjet cutting of metallic coated sheet steels. *International Journal of Machine Tools&Manufacture*, 42(6), 717-722.
147. Hocheng, H., and Chang, K.R. (1994). Material removal analysis in abrasive waterjet cutting of ceramic plates. *Journal of Materials Processing Technology*, 40(3), 287-304.
148. Wang, J. (1999). A Machinability study of polymer matrix composites using abrasive waterjet cutting technology. *Journal of Materials Processing Technology*, 94(1), 30-35.
149. Shah, R.V., and Patel P.D.M. (2012). A Study Of Abrasive Water Jet Machining Process On Granite Material. *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)*, 2(4), 2031-2033.
150. Kozak, J., Rajurkar, K.P., and Chandarana, N.N. (2004). Machining of Low Electrical Conductive Materials by Wire Electrical Discharge Machining (WEDM) Process. *Journal of Materials Processing Technology*, 149(1), 266-271.
151. Pandey, A., and Singh, S. (2010). Current Research Trends in Variants of Electrical Discharge Machining: A Review. *International Journal of Engineering Science and Technology*, 2(6), 2172-2191.
152. Nourbakhsh, F. (2012). *Machining Stability of Wire EDM of Titanium*, M.Sc. Thesis, University of Nebraska-Lincoln, Industrial and Management Systems Engineering, USA.
153. Prasad, B.A., and Reddy, A.C. (2005). *Regression Analysis Approach for Predicting Process Output Variables in WEDM*, Paper presented at the National Conference on Computer Applications in Mechanical Engineering (CAME), 92-96.
154. McGeough, J.A. (1988). *Electro discharge machining*. London: Chapman & Hall, 130.

155. Garg, R. (2010). *Effect of Process Parameters on Performance Measures of Wire Electrical Discharge Machining*, Ph.D. Thesis, Mechanical Engineering Department National Institute of Technology, Kurukshetra, India.
156. Türk Standartları Enstitüsü. (2015). *Döner elektrik makinaları-Bölüm 2-1: Kayıplar ve verimin deneylerle belirlenmesinde kullanılan standart yöntemler (cer taşıtları için kullanılan makinalar hariç) (IEC 60034-2-1:2014)*. Ankara: Türk Standartları Enstitüsü, 19-20.
157. Chang, D.H., and Islam, S. (2000). Estimation of Soil Physical Properties Using Remote Sensing and Artificial Neural Network. *Remote Sensing of Environment*, 74(3), 534-544
158. Elmas, Ç. (2010). *Yapay zeka uygulamaları*. Ankara: Seçkin yayıncılık, 23, 87, 88, 89, 137.
159. İnternet: How Nerve Signals Work. URL: <http://www.webcitation.org/query?url=https%3A%2F%2Fblog.bufferapp.com%2Fwhy-practice-actually-makes-perfect-how-to-rewire-your-brain-for-better-performance&date=2015-12-27>. Son Erişim Tarihi: 27.12.2015.
160. Haykin, S. (1999). *Neural networks and learning machines*, Ontario: Prentice Hall, 3rd edition, McMaster University Hamilton, Canada.
161. Zurada, J.M. (1992). *Introduction to Artificial Neural Systems*. New York: West Publishing Company, USA.
162. Abramowitz, M., and Stegun, I.A. (1965). *Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs and Mathematical Tables*, New York: Dover Publications.
163. Leeuwen, B.V. (2012). *Artificial Neural Networks and Geographic Information System for Inland Excess Water Classification*, Ph.D. Thesis, Department of Physical Geography and Geoinformatics, University of Szeged, Hungary.
164. Churchland, P.S., and Sejnowski, T.J. (1992). *The Computational Brain*. Cambridge: MIT Press.
165. Barto, A.G., Sutton, R.S., and Anderson, C.W. (1983). Neuronlike adaptive elements that can solve difficult learning control problems. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, SMC-13, 834-846.
166. Priddy, K.L., and Keller, P.E. (2005). Artificial Neural Networks: An Introduction. *SPIE-International Society for Optical Engineering*, 68.
167. Chai, S.S. (2010). *An Artificial Neural Network Approach For Soil Moisture Retrieval Using Passive Microwave Data*. Ph.D. Thesis, The Western Australian School of Mines Department of Spatial Sciences, Curtin University of Technology, Australia.

168. Elsan Elektrik Sanayii ve Ticaret A.Ş. (2015). *Norm Elektrik Motorları*. Ankara: Elsan Elektrik Sanayii ve Ticaret A.Ş, 13.
169. Üser, Y., Yalçın, M.A., ve Özen, Ş. (2004). Endüstride Yüksek Verimli Motor Kullanımının Enerji Verimliliğine Etkileri. *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 8(1), 55-61.
170. Aimoniotis, M.B., and Moses, A.J. (1993). *Evaluation of induced eddy currents in transformer sheets due to edge-burrs*, Paper presented at the IEEE/NTUA Athens Power Tech Conference, 847, Greece.
171. Gabzdyl J.T. (1996). *Effects of gases on laser cutting of stainless steels*, Paper presented at the Processing: Proceedings of the International Congress on Applications of Lasers & ElectroOptics ICALEO '96 held in Detroit, 39-44, Michigan, USA.
172. Araujo, E.G., Schneider, J., Verbeken, K., Pasquarella, G., and Houbaert, Y. (2010). Dimensional Effects on Magnetic Properties of Fe-Si Steels Due to Laser and Mechanical Cutting. *IEEE Transactions on Magnetics*, 46(2), 213-216.
173. Karakurt, İ., Aydın, G., ve Aydın, K. (2011). Kayaç Tane Boyutunun Aşındırıcı Su Jeti (ASJ) Kesme Performansına Etkisi. *Madencilik*, 50(1), 23-32.
174. Dias, J.P.M.R. (2011). *The Effect of Velocity in Abrasive Waterjet Cutting*, M.Sc. Thesis, Mechanical Engineering, Linköping University, Sweden.
175. Manescu, V., Paltanea, G., Gavrilă, H., and Scutaru, G. (2015). The Effect of Mechanical and Electrical Discharge Cutting Technologies on the Magnetic Properties of Non-Oriented Silicon Iron Steels. *Revue Roumaine des Sciences Techniques*, 60(1), 59-68, Romania.
176. Manescu, V., Paltanea, G., Gavrilă, H., and Nicolaide, A. (2015). Analysis of the Cutting Area Obtained Through Mechanical and Electrical Discharge Technologies in Non-Oriented Silicon Iron Sheets. *Revue Roumaine des Sciences Techniques*, 60(2), 143-152, Romania.
177. Landgraf, F.J.G., Emura, M., Ito, K., and Carvalho, P.S.G. (2000). Effect of plastic deformation on the magnetic properties of non-oriented electrical steels. *Journal of Magnetism Magnetic Materials*, 215, 94-96.
178. Toussaint, A. (2000). *Einfluss des Werkzeugverschleißes auf die Teilequalität beim Scherschneiden von Elektroblechen*, Ph.D. dissertation, Dept. Fakultät für Maschinenwesen, Technische Univ. München, Munich, Germany.
179. Cougo, B., Tüysüz, A., Mühlethaler, J., and Kolar, J.W. (2011). *Increase of Tape Wound Core Losses Due to Interlamination Short Circuits and Orthogonal Flux Components*, Paper presented at the Proceedings of the 37th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON 2011), Melbourne, Australia.

180. LoBue, M., Sasso, C., Basso, V., Fiorillo, F., and Bertotti, G. (2000). Power losses and magnetization process in Fe-Si non-oriented steels under tensile and compressive stress. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 215, 124-126.
181. Belhadj, A., Baudouin, P., and Houbaert, Y. (2002). Simulation of the HAZ and magnetic properties of laser cut non-oriented electrical steels. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 248(1), 34-44.
182. Abrão, A.M., Campos R.J.C. Faria, P.E., and Davim, J.P. (2008). The effect of cutting tool geometry on thrust force and delamination when drilling glass fibre reinforced plastic composite. *Materials and Design* 29 (2), 508-513.
183. Dinçer, F. (2012). Asenkron Motorlarda Enerji Verimliliği Çalışmaları ve Pratik Yaklaşımlar. *3eElectrotech Dergisi*, 214, 192-204.

ÖZGEÇMİŞ



Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : BAYRAKTAR, Şenol
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 01.08.1982 / TRABZON
 Medeni hali : Bekâr
 Telefon : 0 (312) 202 86 02
 E-mail : senolbayraktar@gazi.edu.tr, senolbyrktr@gmail.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Doktora	Gazi Üniversitesi/ Fen Bilimleri Enstitüsü/ İmalat Mühendisliği	2011-2015
Lisans	Gümüşhane Üniversitesi /Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi/Makina Mühendisliği	2014-2015
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Eğitimi	2009-2011
Lisans	Gazi Üniversitesi /Teknik Eğitim Fakültesi/Makina Öğretmenliği	2001-2005
Lise	Ulusoy Anadolu Meslek Lisesi/CNC Bölümü	1996-2000

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2012-2013	Gazi Üni./Ostim Myo	Öğr.Gör.
2012-2013	Hacettepe Üni./ASO 1.OSB Myo	Öğr.Gör.
2007-2011	Mes Tıbbi Cihazlar	Endüstriyel Tasarım

Yabancı Dil

İngilizce

Akademik Çalışmalar:

SCI, SCI-EXP., SSCI, AHCI Tarafından Taranan Makaleler:

Bayraktar, Ş., Turgut, Y., “Investigation of Cutting Forces and Surface Roughness in Milling of Carbon Fiber Reinforced Polymer Composite Material”, *Materiali in tehnologije / Materials and technology*, Article in Press.

Ulusal Hakemli Dergilerde Yayınlanan Makaleler:

Şenol BAYRAKTAR, Yakup TURGUT, (2015), “Silisli Sacların Mekanik Kesme Prosesinde Gerilim Giderme Tavlamaının Manyetik Özellikler Üzerindeki Etkileri: Bir Araştırma”, *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 3(2):459-469.

Bilimsel Toplantı-Kongre ve Görevler:

Kongre:

Bayraktar, Ş., Turgut, Y., “Elyaf Takviyeli Polimer Kompozit Malzemelerin Delinmesi Üzerine Bir Araştırma”, *3.Ulusal Talash İmalat Sempozyumu*, 153-158, 4-5 Ekim 2012, Ankara, Türkiye.

Bayraktar, Ş., Turgut, Y.,” Machinability of Fiber Reinforced Polymer Composite Materials” *1st International Symposium on Plastic and Rubber Technologies and Exhibition, pp.9-18*, 29 - 31 May 2013, Ankara, Turkey.

Görev:

1st International Symposium on Plastic and Rubber Technologies and Exhibition, 29 - 31 May 2013, Ankara, Turkey, *Düzenleme Kurulu*.

Projeler:

TÜBİTAK-1002 Hızlı Destek Programı

- Elektrik Makinalarında Kullanılan Silisli Sac Paketlerin Farklı Kesme Yöntemleri İle Üretilerek Performanslarının Araştırılması

Gazi Üniversitesi (BAP)

- Karbon Elyaf Takviyeli Polimer Kompozit Malzemelerin Frezeleme İşleminde İşlenebilirliğinin Deneysel Araştırılması (Araştırmacı)

Burs, Ödül ve Teşvik:

- TÜBİTAK 2211-C Öncelikli Alanlara Yönelik Doktora Teşvik Bursu



GAZİ GELECEKTİR..