

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**SİLİSLİ SACLARIN OTOMOTİV SEKTÖRÜNDE
KULLANIMI VE ARAŞTIRILMASI**

Seramik Mühendisi Burcu Aslı YILDIRIM

**FBE Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı Üretim Programında
Hazırlanan**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı :Prof.Dr. Ahmet EKERİM (YTÜ)

İSTANBUL, 2008

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	v
KISALTMA LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	vii
ÇİZELGE LİSTESİ	x
ÖNSÖZ	xi
ÖZET	xii
ABSTRACT	xiii
1. GİRİŞ	1
2. SOĞUK HADDELEME FONKSİYONU	3
2.1 Soğuk Hadde Ürünleri	3
2.1.1 İnce Şerit	4
2.1.2 Ambalaj Çemberi	4
2.2 Soğuk Hadde Prosesi	5
2.3 Asitleme	5
2.3.1 Amaç	5
2.3.2 Fabrika Yerleşimi	6
2.3.3 İtme Çekme Hatları	6
2.3.4 Asitin Rejenerasyonu	7
2.4 Soğuk Haddeleme	7
2.4.1 Amaç	7
2.4.2 Soğuk Haddeleme Teknolojisi	11
2.4.3 Soğutma ve Yağlama	14
2.4.4 Düzlemsellik	15
2.4.5 Kalınlık	16
2.4.5.1 Kalınlık Ayarlama İlkeleri	16
2.4.5.2 Pratik Kalınlık Kontrol Teknikleri	17
2.5 Merdaneler	18
2.5.1 Tavlama, Kristalleşme	19
2.5.1.1 Metalurjik Altyapı	19
2.5.1.2 Bobin Tavlama	21
2.5.1.3 Sürekli Tavlamanın Endüstriyel Avantajı	22
2.5.1.4 İnce Şeritlerin Sürekli Tavlama Teknikleri	24
2.5.1.5 Hızlı Soğutma Teknolojisi	24
2.5.1.6 Bobin ve Sürekli Tavlamanın Tamamlayıcılığı	25
2.5.2 Temper Hadde	24
2.5.2.1 Amaç	25
2.5.2.2 Teknoloji	25
2.5.2.3 Merdane Yapısı	26

3. ELEKTRİKSEL ÇELİKLER	27
3.1 Elektriksel Çeliklerin sınıflandırılması.....	27
3.1.1 Yönlenmiş Çelikler.....	27
3.1.2 Yönlenmemiş Çelikler.....	30
3.1.3 Düşük Silisyumlu Çelikler	31
3.1.4 Orta Silisyumlu Çelikler.....	31
3.1.5 Yüksek Silisyumlu Çelikler.....	31
3.2.1 Temel Bazı Tanımlar	35
3.2.1.1 Magnetik Alan.....	35
3.2.1.2 Magnetik Akı Yoğunluğu.....	37
3.2.1.3 Magnetik Akı.....	39
3.2.1.4 Ferromagnetik Malzemeler.....	41
3.2.1.5 Ferromanyetizma.....	43
3.2.1.6 Dömen (bölge yapısı)	43
3.2.1.7 Manyetikleşme Alan Eğrisinin Uygulanması.....	45
3.3 Elektriksel Bir Makine İçin İdeal Çelik.....	48
3.4 Kayıpları Etkileyen Üretim Prosesleri.....	48
3.4.1 Tavlama	48
3.4.2 Çekirdek Hücre Malzemelerin Yüzey Yalıtımı.....	50
3.4.3 Tabaka Kalınlıkları	52
3.5 Silisli Saclar ve Özellikleri	53
3.5.1 Si Elementinin Çeliğe Etkileri.....	54
3.5.2 Kristalografik Tekstürün Etkisi	57
3.5.3 Silisli Sacların Kullanım Alanları	58
3.5.4 Otomotiv Sanayi.....	58
3.5.5 Silisli Sac Kullanılarak Yapılan ve Otomotiv Endüstrisinde Kullanılan Elektrik Motorları.....	59
3.6 Motor ve Çeşitleri.....	60
3.6.1 Elektrik Motorları.....	60
3.6.2 Motor Nasıl Çalışır?	60
3.6.3 DC Motorlar.....	61
3.6.4 Fırçalı DC Motorlar	61
3.6.5 Fırçasız DC Motorlar.....	61
3.6.6 Step Motorlar.....	62
3.6.7 Servo Sistemler.....	62
3.7 Motor Kayıpları	63
3.7.1 Elektrik Motorlarındaki Güç Kayıpları	63
3.7.2 Histerisiz Kaybı	63
3.7.3 Girdap Akımı Kayıpları Nasıl Oluşur	65
3.7.3.1 Foucault Akımlarının Küçültülmesi İçin Magnetik Cisimlerin Omik Direncinin Büyütülmesi.....	69
3.7.3.1.1 Normal Levha Analiz Değerleri	70
3.7.3.1.2 Az Alaşımli Levhanın Analiz Değerleri.....	70
3.7.3.1.3 Orta Alaşımli Dinamo Levhanın Analizi	71
3.7.3.1.4 Yüksek Alaşımli Dinamo Levhasının Analiz Değerleri.....	71
3.7.4 Tabakalar Arası Kayıp.....	72
3.7.4.1 Yalıtım.....	72
3.7.4.2 Rotasyonel Kayıp	74

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	77
4.1 Kimyasal Bileşim.....	80
4.2 Mikroyapı.....	81
4.3 Haddeleme.....	86
4.4 Çekme Dayanımı.....	90
4.5 Performans Değerlendirmesi.....	92
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	105
5.1 Kimyasal Analizin Etkisi.....	105
5.2 Mikroyapının Etkisi.....	105
5.3 Dayanımın Etkisi.....	106
5.3 Performans Değişiminin Etkisi.....	106
KAYNAKLAR	114
ÖZGEÇMİŞ	115

SİMGE LİSTESİ

Φ	Manyetik akı
B	Manyetik akı yoğunluğu
μ	Manyetik geçirgenlik
P_W	Girdap akımları nedeniyle oluşan güç kaybı
f	Uygulanan mıknatıslanma alanının frekansı
ρ	Özdirenç
B_{max}	Endüksiyonun maksimum değeri
ϵ	Özgül direnç

KISALTMA LİSTESİ

MGE Metal Geliştirme Endüstrisi

MAKO Magnetti Marelli ve Koç

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1 Sürekli tandem hadde prensibi	8
Şekil 2.2 Haddeleme teması ile değişen, haddeleme yükü bant akış gerilimi ve bant kalınlığı	9
Şekil 2.3 Metal akış gerilimi ve sürtünmesiz ortamda gerilim değişimleri.....	10
Şekil 2.4 Dörtlü soğuk hadde kesiti.....	12
Şekil 2.5 Yassı mamul haddelemede taçlaşma etkisinin düzenlemesi ve azaltılması metodu	13
Şekil 2.6 Altılı Hadde	13
Şekil 2.7 Sürtünmenin ve bant kalınlığının haddeleme yükü üzerindeki etkisi	15
Şekil 3.1 Yönlendirilmiş çelik sacların üretim akış şeması.....	29
a)Asitle temizleme b)İlk soğuk haddeleme c) Yeniden kristalleşme ve dekarbürizasyon	29
d)Soğuk haddeleme ve son inceltme e)Mgo uygulaması f) Yüksek sıcaklıkta ısıtma işlemi	29
g)Yalıtım kaplaması ve ısıtma yassılaştırma h)Bitirme,kesme,sarma f) Paketleme.....	29
Şekil 3.2 Yönlendirilmemiş çelik sacların üretim akış şeması.....	32
a)Asitle temizleme b)Soğuk haddeleme c) Yeniden kristalleşme ve dekarbürizasyon.....	32
d)Bitirme,kesme,sarma	32
Şekil 3.3 a) Bir elektronun yörüngesel hareketi b) Bir elektronun magnetik momenti.....	35
Şekil 3.4 Değişik akım ve mıknatıs taşıyan bobinlerde magnetik alan a) Çubuk mıknatıs	36
b)At nalı mıknatıs c) Akım taşıyan bir iletken d) Hava çekirdekli solenoid e) Demir	
çekirdekli solenoid f) Hava ve demir çekirdekli.....	36
Şekil 3.5 Akım taşıyan bir bobinde kuvvet çizgileri	36
Şekil 3.6 Akım ve magnetik akı yoğunluğu arasındaki ilişki.....	37
Şekil 3.7 Akım taşıyan bir çerçevede kuvvet çizgileri	38
Şekil 3.8 Akım taşıyan iletkenlerde magnetik alan	39
Şekil 3.9 Magnetik akı tanımı	40
Şekil 3.10 Nüve malzemesinin akı yoğunluğu üzerine etkisi.....	41
Şekil 3.11 Ferromanyetizma.....	43
Şekil 3.12 Bitişik atomlardaki manyetik momentler domenler arasındaki sınırlar boyunca	
sürekli olarak yön değiştirir.	44
Şekil 3.13 Ferromanyetik histerisiz döngüsü manyetik alanın indüktans veya manyetikleşme	
üzerine etkisini göstermektedir.....	44
Şekil 3.14 Ferromanyetik malzemelerin üç uygulaması için histerisiz döngüsünün	
kıyaslanması elektrik uygulamaları, bilgisayar uygulamaları ve kalıcı mıknatıslar	45
Şekil 3.15 Eddy akımı kayıplarının çeşitli kalınlıklardaki tabakaların kalınlıklarına etkileri	
gösterilmiştir.....	53
Şekil 3.16 Demirin mıknatıslanma yönlerini göstermektedir.....	55
Şekil 3.17 Silisyum demir için için manyetikleşme eğrisi başlangıçta oldukça anizotropiktir,	
manyetikleşme, (100) yönleri alanla hizaya geldiğinde en kolaydır	56
Şekil 3.18 [100],[110]ve [111] yönlerinde gözlemlenen ve hesaplanan B-H eğrileri %3–	
3,5’luk silisli çeliğin tek kristali	56
Şekil 3.19 [100],[110]ve [111] yönlerinde gözlemlenen ve hesaplanan B-H eğrileri %3–	
3,5’luk silisli çeliğin tek kristali	57
Şekil 3.20 Oluşan moment sonucu motorda meydana gelen dönme hareketi.....	61
Şekil 3.21 Step motor	62
Şekil 3.22 Basit bir histerisiz eğrisi ile histerisiz kaybının gösterilmesi	64
Şekil 3.23 Mıknatıslanmış ve mıknatıslanmamış halde atomların dizilimi	64
Şekil 3.24 Kalınlığı h, uzunluğu l olan ferromanyetik bir malzemeden oluşan levha.....	66
Şekil 3.25 İzole edilmemiş levha paketlerindeki girdap akımlarınca oluşturulan alan ve esas	
alan şekli verilmiştir.	72

Şekil 3.26 Poli faz motor bobin ve yalıtım yeri.....	73
Şekil 3.27 Motorlar için genel havalandırma çevrimi	75
Şekil 3.28 Isı dağılım grafiği	76
Şekil 4.1 Otomobil genel görünüm	78
Şekil 4.2 Silecek motoru.....	78
Şekil 4.3 Endüvi sacı çeşitleri.....	78
Şekil 4.4 Elektrik motorunun duran kısmında (stator) kullanılan sac	79
Şekil 4.5 Elektrik motorunun yapıldığı tezgah.....	79
Şekil 4.6 Elektrik motorunun duran kısmı (stator).....	80
Şekil 4.7 CCR-6112 tipi %0,019 Si içeren elektrik motoru yapımına uygun laminasyon sacı. Nital 4x200. Görüntü yüzeyden alınmıştır.	81
Şekil 4.8 CCR-6112 tipi %0,019 Si içeren elektrik motoru yapımına uygun laminasyon sacı. Nital 4X200. Görüntü yüzeyden alınmıştır	81
Şekil 4.9 CCR-6112 tipi %0,019 Si içeren elektrik motoru yapımına uygun laminasyon sacı. Nital 4X500. Görüntü kesitten alınmıştır.	82
Şekil 4.10 6109 tipi % 0,10-0,30 Si içeren elektrik motoru yapımına uygun laminasyon sac	82
Şekil 4.11 6109 tipi %0,10-0,30 Si içeren elektrik motoru yapımına uygun laminasyon sacı. Nital 2X400. Görüntü kesitten alınmıştır	83
Şekil 4.12 %3 Si'li yassı haddelenmiş elektrikselsac (M22) %70 oranında 0,6 mm'ye indirilmiş. Yapı: ferrit taneleri haddeme yönünde uzamış. %10 nital. X100	83
Şekil 4.13 815°C' deki nemli hidrojen atmosferinde dekarburizasyon tavlama ve kuru hidrojen atmosferinde 870°C'de tane büyümesi için tavllanmış %10 nital. X1000.....	84
Şekil 4.14 MGE Metal'den alınan %2.84 Si içeren M400 tip orijinal elektrikselsac. Nital4 X100. Görüntü yüzeyden alınmıştır.	84
Şekil 4.15 %2.5 Si'li yassı haddelenmiş (M36) elektrikselsac	85
Şekil 4.16 Sıcak haddeme sonrası farklı deformasyondaki üç numunenin mikroyapısı	86
Şekil 4.17 Küçük ve büyük taneli alanlar için farklı kristolografik düzlemler	86
Şekil 4.18 Geçirgenlik ve güç kaybı.....	87
Şekil 4.19 Sıcak haddeme %deformasyon ve magnetik tekstür yoğunluk ilişkisi	87
Şekil 4.20 Farklı çeliklerin dekape edilebilme davranışı	89
Şekil 4.21 Farklı çeliklerdeki XRay difraksiyon çalışması	89
Şekil 4.22 Dekape kinetiğinin çelik içerisindeki silis ile olan ilişkisi	89
Şekil 4.23 MGE Metal'den alınan 0,50 mm orijinal M400 tip silisli sacın çekme testi eğrisi(0,50x1000mm)	90
Şekil 4.24 Ereğli CCR-6112 tipi sac kullanılan endüvi ile toplanan L84 tipi cam silecek motoru 1 nolu motor 1.hız soğuk değer.....	92
Şekil 4.25 Ereğli CCR-6112 tipi sac kullanılan endüvi ile toplanan L84 tipi cam silecek motoru 1 nolu motor 2.hız soğuk değer.....	92
Şekil 4.26 Ereğli CCR-6112 tipi sac kullanılan endüvi ile toplanan L84 tipi cam silecek motoru 2 nolu motor 1.hız soğuk değer.....	93
Şekil 4.27 Ereğli CCR-6112 tipi sac kullanılan endüvi ile toplanan L84 tipi cam silecek motoru 2 nolu motor 2.hız soğuk değer.....	93
Şekil 4.28 Ereğli CCR-6112 tipi sac kullanılan endüvi ile toplanan L84 tipi cam silecek motoru 3 nolu motor 1.hız soğuk değer.....	94
Şekil 4.29 Ereğli CCR-6112 tipi sac kullanılan endüvi ile toplanan L84 tipi cam silecek motoru 3 nolu motor 2.hız soğuk değer.....	94
Şekil 4.30 Ereğli CCR-6112 tipi sac kullanılan endüvi ile toplanan L84 tipi cam silecek motoru 4 nolu motor 1.hız soğuk değer.....	95
Şekil 4.31 Ereğli CCR-6112 tipi sac kullanılan endüvi ile toplanan L84 tipi cam silecek motoru 4 nolu motor 2.hız soğuk değer.....	95

Şekil 4.32 Erdemir 6109 tipi laminasyon çeliği kullanılarak yapılan endüvi ile toplanan L84 cam silecek motoru 5 nolu motor 1.hız soğuk değer	96
Şekil 4.33 Erdemir 6109 tipi laminasyon çeliği kullanılarak yapılan endüvi ile toplanan L84 cam silecek motoru 5 nolu motor 2.hız soğuk değer	96
Şekil 4.34 Erdemir 6109 tipi laminasyon çeliği kullanılarak yapılan endüvi ile toplanan L84 cam silecek motoru 6 nolu motor 1.hız soğuk değer	97
Şekil 4.35 Erdemir 6109 tipi laminasyon çeliği kullanılarak yapılan endüvi ile toplanan L84 cam silecek motoru 6 nolu motor 2.hız soğuk değer	97
Şekil 4.36 Erdemir 6109 tipi laminasyon çeliği kullanılarak yapılan endüvi ile toplanan L84 cam silecek motoru 7 nolu motor 1.hız soğuk değer	98
Şekil 4.37 Erdemir 6109 tipi laminasyon çeliği kullanılarak yapılan endüvi ile toplanan L84 cam silecek motoru 7 nolu motor 2.hız soğuk değer	98
Şekil 4.38 Erdemir 6109 tipi laminasyon çeliği kullanılarak yapılan endüvi ile toplanan L84 cam silecek motoru 8 nolu motor 1.hız soğuk değer	99
Şekil 4.39 Erdemir 6109 tipi laminasyon çeliği kullanılarak yapılan endüvi ile toplanan L84 cam silecek motoru 8 nolu motor 2.hız soğuk değer	99
Şekil 4.40 M400 tipi silisli saca üretilen, endüvi sacı ile toplanan L84 cam silecek motoru 9 nolu motor 1.hız soğuk değer	100
Şekil 4.41 M400 tipi silisli saca üretilen, endüvi sacı ile toplanan L84 cam silecek motoru 9 nolu motor 2.hız soğuk değer	100
Şekil 4.42 M400 tipi silisli saca üretilen, endüvi sacı ile toplanan L84 cam silecek motoru 10 nolu motor 1.hız soğuk değer	101
Şekil 4.43 M400 tipi silisli saca üretilen, endüvi sacı ile toplanan L84 cam silecek motoru 10 nolu motor 2.hız soğuk değer	101
Şekil 4.44 M400 tipi silisli saca üretilen, endüvi sacı ile toplanan L84 cam silecek motoru 11 nolu motor 1.hız soğuk değer	102
Şekil 4.45 M400 tipi silisli saca üretilen, endüvi sacı ile toplanan L84 cam silecek motoru 11 nolu motor 2.hız soğuk değer	102
Şekil 4.46 M400 tipi silisli saca üretilen, endüvi sacı ile toplanan L84 cam silecek motoru 12 nolu motor 1.hız soğuk değer	103
Şekil 4.47 M400 tipi silisli saca üretilen, endüvi sacı ile toplanan L84 cam silecek motoru 12 nolu motor 2.hız soğuk değer	103
Şekil 4.48 M400 tipi silisli saca üretilen, endüvi sacı ile toplanan L84 cam silecek motoru 13 nolu motor 1.hız soğuk değer	104
Şekil 4.49 M400 tipi silisli saca üretilen, endüvi sacı ile toplanan L84 cam silecek motoru 13 nolu motor 2.hız soğuk değer	104
Şekil 5.1 6109 tipi %0.10-0.30 Si içeren elektrik motoru yapımına uygun laminasyon sacı	105
Şekil 5.2 %1,3 Si içeren FeSi elektriksel çeliği	105

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 2.1 Kullanım yeri ve özellikler çizelgesi.....	3
Çizelge 2.2 Bobin tavlama ve sürekli tavlama özellikleri.....	20
Çizelge 3.1 Elektriksel çelik sac ve şeritlerin silisyum içerikleri, kütle yoğunlukları ve uygulamaları.....	33
Çizelge 3.2 Bazı yumuşak elektriksl malzemelerin özellikleri.....	47
Çizelge 3.3 Elektriksel çelikler için tavlama tipleri ve amaçları.....	49
Çizelge 3.4 Silisli çeliklere uygulanan izolasyon tipleri.....	51
Çizelge 4.1 MGE Metal'den alınan M400 tipi silisli sacın kimyasal analiz sonuçları.....	80
Çizelge 4.2 Ereğli CCR-6112 tipi silisli sacın kimyasal analiz sonuçları.....	80
Çizelge 4.3 Erdemir 6109 kimyasal analiz sonuçları.....	80
Çizelge 4.4 Farklı çeliklerin kimyasal kompozisyonları.....	88
Çizelge 4.5 CCR-6112 çeliğinin (1mm)çekme testi sonuçları.....	90
Çizelge 4.6 Çekme testi sonuçlarının değerlendirilmesi.....	91
Çizelge 4.7 Çekme testi sonuçlarının değerlendirilmesi.....	91
Çizelge 5.1 Performans değerleri karşılaştırması.....	112

ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimim sırasında dostluklarını ve yardımlarını esirgemeyen Y.T.Ü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği bölümü üyelerine teşekkürlerimi sunarım. Tez çalışmamın planlama ve uygulaması süresinde en kısıtlı zamanlarda bile yardımlarını esirgemeyen, bilgiye ve kaynaklara ulaşmamda teşvik edici, kıymetli fikir ve önerileriyle bana yol gösterici olan değerli hocam Sayın Prof.Dr.Ahmet Ekerim'e teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca tez çalışmalarım sırasında bilgeliği ve dostluğu ile bana büyük destek veren hocam, Sayın Doç.Dr.Öznur Çakır'a yardımlarından dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans tezimin deneysel çalışmalarında bana en büyük desteği ve yardımı sağlayan Mako elektrik Genel Müdürü Sayın İbrahim İçöz, Ar-Ge Müdürü Sayın Mustafa Oktay Aksoy ve Mako Elektrik çalışanlarına teşekkürü bir borç bilirim.

Hayatımın her döneminde, maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen ve her zorluk karşısında yanımda olan aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Çalışmalarım boyunca beni destekleyen sevgili arkadaşım ve meslektaşım Umut Özkan'a ve tez çalışmasını referans aldığım değerli arkadaşım Aylin Altun'a teşekkürlerimi sunarım.

SİLİSLİ SAÇLARIN OTOMOTİV SEKTÖRÜNDE KULLANIMI VE ARAŞTIRILMASI

ÖZET

Bu çalışmada silisli saçların tipleri, özellikleri, soğuk haddelenmesi, üretimi, genel hatlarıyla açıklanmış, özellikle üretimde ortaya çıkan enerji kayıpları, bu kayıpların en aza indirilmesi için yapılması gerekenler, manyetik özellik kalınlık ilişkisi incelenmiş olup bu çeliklerin otomotiv sektöründeki kullanımları ve elektrik motoru uygulamalarında gözlemlenen performans değişimleri ayrıntılı bir şekilde değerlendirilmiştir.

Çalışma üç ana bölümden oluşmuştur. Birinci bölümde çelik saçların soğuk haddeleme prosesi incelenmiştir.

İkinci bölümde elektrik çeliklerinin önemli bir grubu olan silisli çeliklerin üretim yöntemlerinden, tiplerinden, kullanım alanlarından, kimyasal bileşimlerinden, manyetik özelliklerinden ve bu özelliklerin nasıl geliştirilebildiğinden, ana hatlarıyla bahsedilmiştir. İkinci bölümün devamında, motor çeşitleri ve motor kayıplarından bahsedilmiştir.

Üçüncü bölümde ise; deneysel çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmanın ilk aşamasında Ereğli Demir Çelik firmasından CCR-6112 tipi, Erdemir firmasından 6109 tipi ve MGE metal firmasından M400 tipi, elektrik motoru yapımına uygun laminasyon çelikleri alınmıştır. Bu malzemelerin kimyasal analizleri yapılmış olup, çeşitli metalografik işleme tabi tutulduktan sonra, mikro yapıları incelenmiştir. Bunlardan CCR-6112 tipi olan elektrikselsel çelik, mako elektrik firmasının seri üretiminde kullanmış olduğu çeliktir. Bu çelik ile üretilen elektrik motorunun performans eğrileri, silis içeriği yüksek olan diğer malzemelerle yapılan elektrik motorlarının performans eğrileri ile karşılaştırılmıştır. Çalışma, sonuçların değerlendirilmesi ve referansların tanıtılmasıyla sona ermiştir.

Anahtar Kelimeler: Otomotiv, elektrik motoru, silisli saçlar, performans değerlendirmesi

USAGE AND RESEARCH OF SILICON SHEET IN AUTOMOTIVE INDUSTRY

ABSTRACT

This study was carried to explain types of silicon steels, cold rolling and production of silicon steels, their properties and especially energy losses which occur during production and decreasing this energy loss examined. Also relationship between magnetic properties and thickness examined. It is detailed examined that usage areas of silicon steel sheet in automotive and their performance changes in electrical engines.

Study composed of three main parts. In first part cold rolling process is examined entirely.

In the second part, production methods of silicon steels, which is the most important in electrical steels, types, usage areas, chemical composites, magnetic properties and improvement of this characteristic have been discussed. In continue of second part electrical engine types and engine loss issues are mentioned.

The third part allocated to experimental studies. At the first stage of this part three different steel sheets which have different composite, cold rolled and suitable for electric motor applications are taken from Erdemir, Ereğli and MGE Metal Company. After metallographic treatments are applied to these steel sheets, microstructures of the steels are compared with each other. Also comparing performance curves between different electric motors which are produced different silicon rate included steels one of these electric steel (CCR-6112), which is used as magnetic component in serial electric engine at MAKO Company, can be found in this study. This study ended with discussion results and references description.

Anahtar Kelimeler: Automotive, electric motors, silicon sheet, performance rating.

1. GİRİŞ

Çelik sac malzemeler teknikte çok çeşitli amaçlar için kullanılmaktadır. En çok kullanıldığı sektörlerden birisi de otomotiv sanayi olup, otomobil ağırlığını düşürmeye yardımcı olan ve buna bağlı olarak yakıt tüketimini ve egzoz gazı emisyonunu düşüren çelik sac malzeme üretimi gün geçtikçe önem kazanmaktadır. Bu malzemelerde daha verimli çalışma, daha az hatalı üretim ve kolay şekillendirme, yüksek mukavemet, kolay bulunabilme ve ekonomik gereksinimleri karşılamaya yönelik beklentiler bu malzemeleri kullanan işletmelerin önemli beklentileri olup, konuya ilişkin birçok bilimsel ve teknik araştırma yapılmaktadır. Malzeme bilimi ve üretim mühendisliğinin ortak ve takım çalışması sonucunda, otomotiv, üretim, elektrik ve elektronik mühendisliği ile otomotiv mühendislerinin çabaları ile daha az enerji, daha az kayıp ve daha ucuz üretime yönelik araştırma ve geliştirme çalışmaları sürdürülmektedir.

Çelik sac malzemelerle, çeşitli makine ve çelik konstrüksiyonların gövde panelleri, kasa iskeletleri, vites parçaları, elektrik motorları, güvenlik parçalarında kullanılacak olan malzemeler, ürün kalitesini etkilemekte ve kullanım amaçlarını karşılamada önemini artırmaktadır. Enerji verimliliğinin öneminin arttığı, elektrik motorlarındaki güç kayıplarının azalmasının önem kazandığı, çelik kalitesinin önem kazandığı, niteliğe olan talebin artması çelik sac malzemeler üzerinde farklı yaklaşımların yapılmasını zorunlu hale getirmiştir.

Dünyada dönen elektrik makinelerinde, elektrik motorlarında, transformatörlerde yararlı enerji kaybını azaltmak ve düşük maliyetli ürün elde etmek için çelik sac malzemelerin kullanımına yönelik arz-talep dünya genelinde ticarete ve ekonomide rekabet gücünü oluşturmaktadır. Çelik sac dokusundaki taneler ya yönlendirilmiş %3 Si-Fe transformatör çeliklerinde, ya da yönlendirilmemiş Si-Fe veya demir, motor ve jeneratör uygulamalarında kullanılırlar.

Çelik sac malzemelerin birer yüzeyleri fuko kayıplarını azaltmak için vernik, kâğıt, lak v.b yalıtım malzemeleri ile yalıtılır. Elektriksel özelliklerin sağlanması için 0,3–0,5mm kalınlığındaki silisli sacların üst üste konulması ve bunların iyice sıkıştırılması sonucu yalıtım genel olarak sağlanmış olur. Bunun sonucunda elektrik motoru nüve hacmi azalır, nüve kayıpları küçülür, verim yükselir. Elektrik motoru yapımında manyetik indüksiyonu yüksek silisli saclar kullanılır, motor boyutları ve nüve kesiti buna bağlı olarak küçülür. Böylece hem motor ağırlığı azalır hem de nüve kayıpları azalır sonuçta verim artar. Verimi artırmaya ve enerji kayıplarını azaltmaya yönelik elektrik makinelerinin tasarımlarının ilk zamanından beri

sürdürülmüş ve çok katmanlı tabakadan veya katmandan oluşacak şekilde üretilmesi ile belirgin bir şekilde başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Tabakalar eddy akım hatlarını sınırlar ve büyük anlamda eddy akım kayıplarını azaltır. Katmanlar inceldikçe kayıp azalır, bu sebepten yassı-düz haddelenmiş elektriksel çelikler, katmanları üretmekte kullanılır, istiflendiğinde ve uygun şekilde yerleştirildiğinde elektrikli cihazlarda manyetik çekirdek olarak kullanılırlar.

Demire ilave edilen silisyum ve uygun bir alaşımlama işlemi ile çok küçük histerisiz döngülü mükemmel bir manyetikleşmeye sahip bir malzeme üretilebilir. Silisyum anizotropik manyetik davranışı küçük histerisiz döngüleri, silisyumun kristal yapısı en kolay manyetikleşme yönüyle hizaya geldiğinde elde edilir. Haddeme ve ardından tavlama sonucu her tanede (100) yönünde oluşan bir levha dokusu ile kristal kafesinde yerini alır. Silisyum içeren demir (100) yönlerinde daha iyi manyetikleştiği için histerisiz ve enerji kaybı az olur. Sonuçta demire silisyum ilavesi ile elektriksel direnç artar, tane yapısı tercihli yönlenme sağlar, yüksek geçirgenlik ve düşük histerisiz kayıpları verir. Fe-Si alaşımları genellikle haddeme ve tavlama yöntemiyle sac şeklinde üretilirler. Manyetik özellikler kalınlıkla doğrudan ilişkili olup kalınlık arttıkça kayıplarda artar. Kayıpları önlemenin yolu düzgün ve kristal yönlenmesi sağlayan bir tavlama ile üretim prosesi ve küçük sac kalınlıklarıyla mümkün olmaktadır. Küçük sac kalınlıkları eddy akım kayıplarını önler. Ek olarak tabakaların yalıtılması konusu da çok önemlidir. Eğer yalıtılmazsa katmanlaştırılmış saclar akım verildiğinde tek parça gibi davranır ve kayıplar aynı toplam kalınlıkta işlem görmemiş bir parçanın ki ile eşdeğer olur. Bu yüzden kalınlık, izolasyon, tavlama gibi üretim aşamasındaki her türlü işlem silisli çelik sacların kalitesinde önemli rol oynar.

Bu çalışmada otomotiv sektörüne yönelik bir doğru akım motorunu farklı malzemeler kullanarak elektrik motorları yapılmıştır. Sac kalınlığı değişiminin etkilerini ortaya koymak için farklı kalınlıklardaki çelik saclardan üretilmiş elektrik motorlarının performans eğrileri çıkarılmış olup, silis içeriği ve kalınlık farkının motor verimini arttırmadaki etkisi incelenmiştir.

2. SOĞUK HADDELEME FONKSİYONU

Soğuk haddeleme, ulaşılmak istenen karakteristiklere göre çeşitli derecelerde sıcak haddelenmiş bobinlerle yapılır. Soğuk haddelemenin sağladıkları;

1. Aşırı soğutmaya bağlı olarak sıcak haddeleme ile ulaşılamayan istenen kalınlığın sağlanması
2. Mikro yapının kontrolü ile mekaniksel özelliklerin sağlanması
3. Oksitli tabakaların yok edilmesi ve kontrollü bir pürüzlülüğün sağlanması ile yüzey görünüm ve özelliklerinin tanımlanabilmesi (Yüzey işleme uygunluk, parlaklık, şekillendirilebilirlik)
4. İstenen düzgünlüğün sağlanması (Taşkiran, 2003)

2.1 Soğuk Hadde Ürünleri

Soğuk hadde tezgâhlarında iki tip ürün üretilir, ince şerit ve paketleme şeriti.

Çizelge 2.1 Kullanım yeri ve özellikler çizelgesi(Taşkiran, 2003)

Uygulamalar	İstenen özellikler	Levha karakteristikleri
Varil	Parlatmak, yağlamak	İyi temizlik
	Düşük maliyet	Çok yüksek ve düşük akma dayanımı
Radyatörler	Kaynak yapılabilirlik	Al ile öldürülmek ve düşük Al içermek
Küçük elektrik motorları	Manyetik özellikler ve istiflebilirlik	Silisyumlu çelik ve çok dar kalınlık toleransı
Otomobil karasörü	Düşük şoklara dayanıklılık Boyanabilirlik Tasarlanabilirlik Form verilebilme Korozyon direnci	Düşük akma mukavemeti ve Yüksek kararlılık. Güç arttırmak İyi yüzey temizliği ve uygun yüzey görünüşü Çinko kaplama Galvanizleme
Yapı malzemeleri	Enerji soğurma	Yüksek kırılma dayanımı

2.1.1 İnce Şerit

İnce şerit terimi otomotiv, beyaz eşya, metal eşya, inşaat ve elektrik motorları sektörlerinde kullanılan rulo haline getirilmiş yassı malzemeyi tanımlamak için kullanılır. Bu ürünler müşteriye genelde 0,5 ile 3mm kalınlıkları arasında ve 1900mm'ye kadar genişliklerde sevk edilir. Ürünler; çıplak sac halinde veya bir film veya yağ örtüsü ile korunmuş olarak veya çeşitli proseslerle korozyon direncini arttırmak amacıyla genellikle galvaniz kaplamalı olarak müşteriye teslim edilirler.

Soğuk haddelenenin başlangıç malzemesi kalınlığı 2 ile 6mm arasında değişen sıcak haddelenmiş bobinlerdir. İnce şeritten beklenen özellikler, ürünün ölçüsel, mekanik, fiziksel ve yüzey karakteristikleri ile birlikte ürünün kullanım yeri yönündedir.

Örneklerden de açıkça anlaşılacağı üzere en iyi ürün karakteristiklerini sağlayabilmek için ince şerit üretiminde müşteri ile yakın bir ilişkiye ihtiyaç vardır. Son on yılda ince şerit soğuk hadde teknolojisindeki gelişmeler çok hızlı olmuştur. Çalışmalar hem var olan teknolojilerin gelişmesine, hem de sürekli tavlama, elektro galvaniz ve yüksek verimlilikte galvanizleme gibi yeni teknolojilerin gelişmesine odaklanmıştır. (Taşkıran, 2003)

2.1.2 Ambalaj Çemberi

Bu ürünler yiyecek içecek paketleme endüstrisinde kullanılmaktadır. Tipik kalınlıklar 0.13 ile 0.4 mm arasında genişlikler 750 ile 1200mm arasında değişmektedir. Çelikler sürekli olarak korozyona karşı kaplamalıdır. Başlangıç ürünü 2 ile 3 mm kalınlıklar arasındaki sıcak haddelenmiş rulolardır.

Son birkaç yıl içinde pazarın ihtiyaçları daha fazla farklılıklar göstermektedir.

Daha ince kalınlıklarda, ikinci bir haddeleme işlemi ve tavlama sonrası ile 0.14mm'ye kadar inceltmeler planlanmaktadır.

1. İyi şekil alabilme özelliği, meşrubat kutularında çekme ve wall-ironing prosesleri ile
 2. Çeşitli kullanım alanlarına özel olarak parlaklık ve korozyon dayanımı
 3. Konteynır üretim hatları için artırılmış üretim rakamları ve otomasyon
 4. Sonuç olarak artan talepler son ürünün yeniden kullanılması üzerine yapılmaktadır.
- (Taşkıran, 2003)

2.2 Soğuk Hadde Prosesi

Soğuk haddeleme tezgahlarında proses edilen işlemlerin bölümleri aşağıdaki gibidir;

Asitleme, Haddeleme, Tavlama, Temper hadde, Son Kontrol ve Ölçü ve paketleme operasyonları.

Sıcak haddelenmiş rulolar 15 ile 40 ton arasında olurken soğuk haddelenmiş rulolar 10 ile 50 ton arasındadır. Müşteriye teslimatlar 10-25 tonluk rulolar halinde veya birkaç tonluk paketlenmiş levhalar halinde yapılır. (Taşkiran, 2003)

2.3 Asitleme

2.3.1 Amaç

Sıcak haddelenmiş yassı mamuller, daha sonraki hadde ile uyumlu olmayan bir kabuk ile (çelik ile hadde ruloları arasında başka bir tabaka gibi davranacağından) kaplıdır. Bu kabuk nedeniyle haddeleme yassı mamulü çizebilir veya aşırı sertlik nedeniyle anormal reaksiyonlara neden olabilir. Bu nedenle kabuk bir asit banyosu içinde asitleme işlemi ile yok edilmelidir.(Taşkiran, 2003)

Son zamanlarda, otomobil ve beyaz eşya üreticilerinin, mükemmel yüzey kalitesine sahip olan soğuk haddelenmiş çeliklere olan talep artışı ile dekapajın önemini artmaktadır. Dekapaj işlemi, sıcak haddelenmiş şeridin yüzeyindeki demir oksit tabakasının soğuk haddeleme öncesi hidroklorik asit çözeltisi kullanılarak kaldırılması işlemidir. Çoğunlukla, dekapaj prosesinin verimliliği çelik yüzeyinde bulunan oksit karakterine bağlıdır. Oksit tabakasının gelişiminin işlem sıcaklığına ve çeliğin içerdiği Si miktarına bağlı olduğu gözlenmiştir. Bu oksit tabakası difüzyonu önleyici bir bariyer olarak rol oynar. Aynı zamanda Si elementi, fayalitin FeO formundan ve SiO₂'den dolayı difüzyon oranını azaltır. Kısaca; özel çeliklerin dekapaj reaksiyon kinetikleri çoğunlukla çeliğin oksit morfolojisine bağlıdır. Ve oksit morfolojisi çeliğin içerdiği Si miktarına bağlıdır. Çelik içindeki Si içeriği %35'i geçtiği zaman fayalit fazı oluşumu baskın olur ve dekapaj kinetiğini etkiler. Sonuç olarak daha kaliteli dekape soğuk haddelenmiş çelik plakalar elde etmek için Si içeriği mümkün olduğu kadar az bulundurulmalıdır.(A. Chattopadhyay and T. Chanda, 2008)

2.3.2 Fabrika Yerleşimi

Tipik asitleme tesisinin oluşumu aşağıdakileri içerir:

Asitleme havuzlarından sabit hızla sürekli geçişi sağlayabilmek için fonksiyonu ruloları açıp diğer rulolarla birleştiren bir giriş bölümü. Bu bölüm tipik olarak aşağıdakileri içine alır.

1. Bir veya İki bobin açıcı
2. Bir kaynak istasyonu
3. Motorize edilmiş büyük açılı yassı mamul üzerine gerilim uygulanmasını sağlayan rulo serileri (Gerilim ruloları)
4. Kaynak operasyonu sırasında belirli bir gevşeklik sağlanarak şeridin durmamasını sağlamak için bir şerit akümülatörü.

Orta asitleme bölümü;

1. Düzlüğü de artmasını sağlayan bir oksit kırıcı. İki adet yüksek hadde tezgâhı gerilim dengeleyicilerle yerleştirilmiştir. Burada şerit sürekli bir gerilim gücü altında küçük horizontal rulo serilerinden geçirilerek ileri ve geri bükülür.
2. Aside dayanıklı parçalarla desteklenmiş plastik kaplı çelikten yapılmış asit tankları. Tanklar 1 metre derinliğe kadar olabilir. Şerit asit havuzu içine daldırılır. Tankların kolayca boşalabilmesi için minimize asit düzeyini sağlayan spreyle asit püskürtülür. Düzensiz asitleme adı verilen en son teknolojiye, asit ve şerit arasında temas sağlanabilmesi için havuz şiddetle çalkalanır. Şeridin pozisyonu tankın kenarlarına yerleştirilmiş gerilim rulolarının hızı değiştirilerek sağlanır.
3. Tuz tortularından kurtulmak için sıcak hava ile kurutma öncesi demineralize edilmiş suda yıkama.
4. Şeritlerin rulo haline getirildiği bir çıkış bölümü. Bu bölüm bir çıkış akümülatörü, genişliği ayarlamak için bir kesme makası, bir kontrol istasyonu, şeridi korumak için bir yağlama aparatı ve bir veya iki adet rulo sarıcı içerir (Taşkiran, 2003)

2.3.3 İtme Çekme Hatları

İtme çekme hatları her bobinin ayrı dekape edildiği, küçük ve orta kapasiteli daha ucuz hatlardır. Şerit bobin çözücü tarafından itilir ve bobin sarıcı tarafından çekilir. Hatlar genellikle kısadır, kısmen yavaş hızlarda (100 m/mn den az) çalışır. Tanklar fazla derin değildir. Genellikle daha yüksek kalınlılara (2-12 mm) uygundur. Ve kaynak yapılamayan dereceler

için kullanılabilir. Bu yüzden bu hatlar soğuk haddeleme olmaksızın, sıcak haddelenmiş şeritlerin dekape işleminde kullanılırlar.

2.3.4 Asidin Rejenerasyonu

Asit aşağıdaki tepkimelerin olduğu bir fırında tekrar oluşturulur.



Tekrar oluşturulmuş temizlenmiş hidroklorik asit doğrudan tekrar kullanılır. Saflık derecesine bağlı olarak, üretilen demir oksit çeşitli uygulamalarda kullanılabilir (Boya sektörü ve elektrik motorları ferrit üretimi)

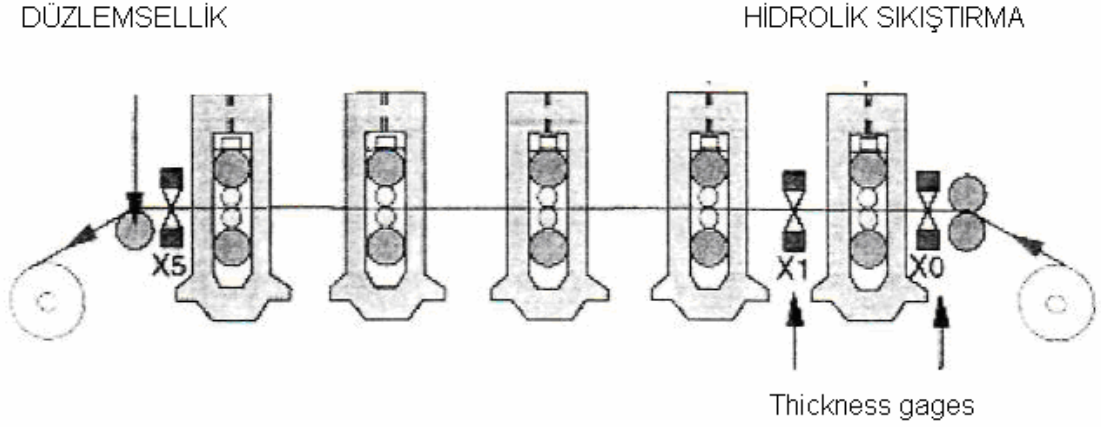
Ayrıca normal olarak tesislerde 10-15 gr/t taze ürün kalitesini düşüren asit kullanılır. Sülfürik asit hatları çözülmemiş demir sülfatları ayırmak için ekipmanlar içerir. (Taşkiran, 2003)

2.4 Soğuk Haddeleme

2.4.1 Amaç

Soğuk haddelemede dekape edilmiş şerit yüksek gerilim ve yüksek hadde ile sert rulolar arasından geçirilir. Bu işlem bir tek reversing-stand üzerinde çeşitli yönlerde geçişlerle veya daha sık sürekli tandem tezgahlardan yapılan geçişlerle yapılır. Şeritler sürekli olarak yüksek gerilim güçlerinin uygulanmasını sağlayan standlardan geçer. Sürekli tezgahların verimliliği geri dönüşlü tezgahlara oranla çok yüksektir.

Şekil 2.1 şeridin haddeleme işlemi diyagramını göstermektedir. Her n stand çıkışında e(n) giriş kalınlığındaki şerit e(n-1) e değişir. Kalınlık incelmesi ve boydaki artış yanıl bir yayılma olmadan olur. Şeritin stand n girişinde hızı v(n-1), çıkışta v(n) olursa kalınlık akış hızı arasındaki ilişki aşağıdaki gibi olur. (Taşkiran, 2003)



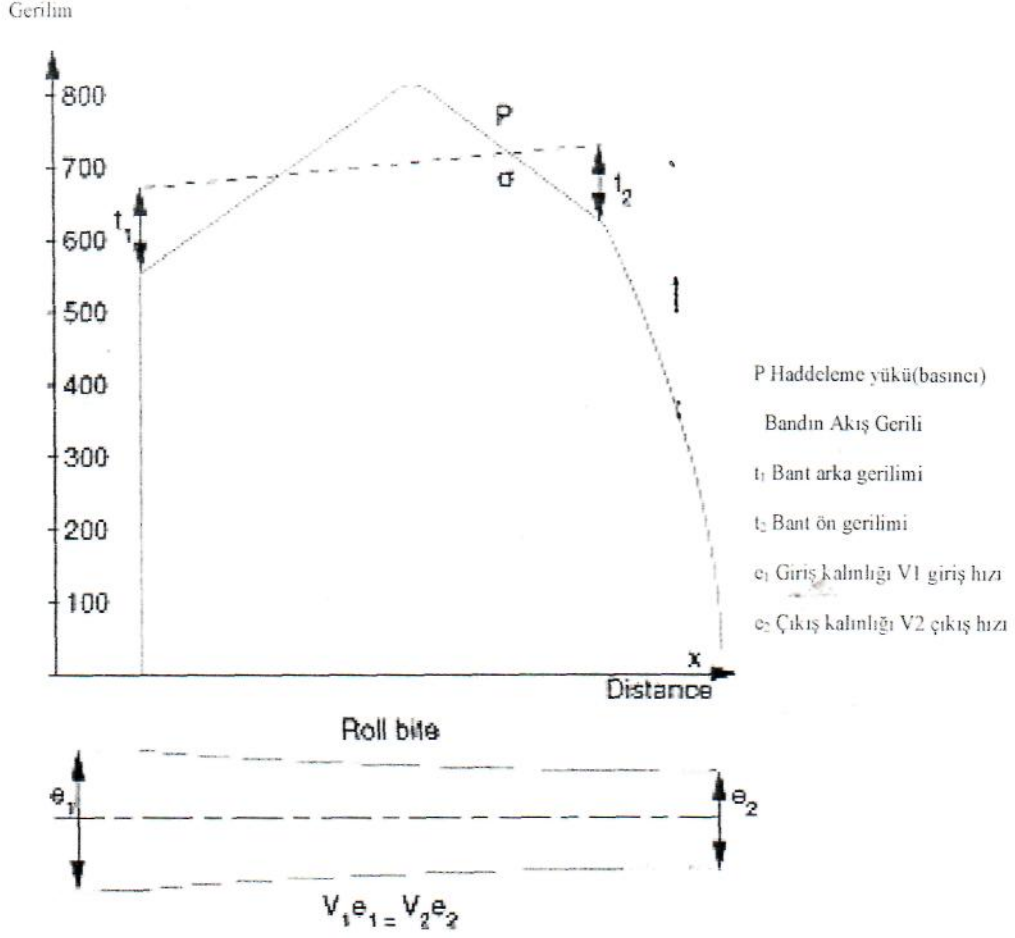
Şekil 2.1 Sürekli soğuk tandem hadde prensibi (Taşkiran, 2003)

$$V(n-1) \times e(n-1) = v(n) \times e(n) \quad (2.3)$$

Böylece şerit tezgah boyunca ilerledikçe hızlanır.

Şerit, rulo vuruşlarında açıklanan seçilmiş kristal düzlemler üzerinde yer değişimi sağlayan ve mekanizması demir bazlı olan soğuk çalışma altında hareket eder. Yerleşik olmayan hücrelerin ve deformasyon bantlarının altyapısının formasyonu ile mikro yapı çekme ve haddeleme yönünde oluşan taneciklerin rotasyonu sonucu modifike edilir. İkinci safha sert parçacıklar deforme olamazlar ve mikro kırıklarla ayrılmış olarak ve haddeleme yönü doğrultusunda dizilere kırılmazlar. Soğuk haddeye metalin rulolar arasında hareketi sonucunda, artan bir eğilme baskısı veya akış baskısı eşlik eder. Paralel olarak esneklik azalırken metal kolay kırılır hale gelmeye çalışır.

Soğuk Haddeleme

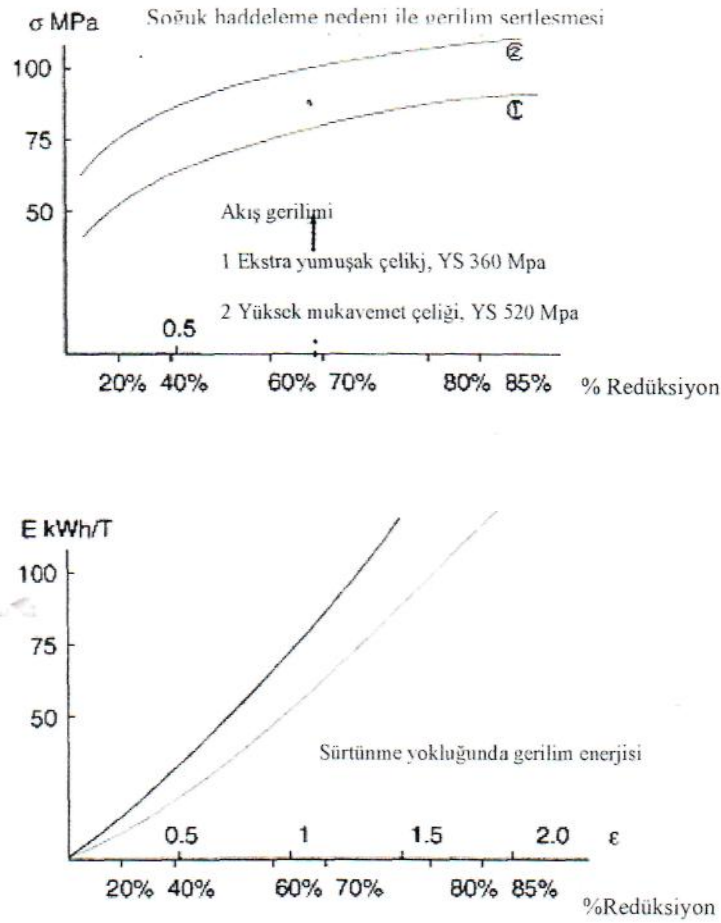


Şekil 2.2 Haddelenme teması ile değişen, haddelenme yükü bant akış gerilimi ve bant kalınlığı(Taşkıran, 2003)

$$e_e = \ln[e_0/e] \text{ olur. } (e_0: \text{İlk kalınlık, } e: \text{Son kalınlık}) \quad (2.4)$$

Haddelenme tezgâhı rulolar aracılığıyla şerite çok yüksek basınç iletmelidir. Bu basınç şeritin akış baskısına, baş ve son gerilim güçlerine ve rulolar ve şerit arasındaki sürtünmeye bağlıdır. Birim genişlik için hadde gücü temas kavisi boyunca uygulanan basıncın toplamıdır. Bu yüzden de hadde vuruş boyuyla artar.

Rulolar şerit kalınlığını inceltmeye ek olarak haddelenme enerjisi için gerekli sürtünmeye ihtiyaç duyarak şeriti sürmelidir. Bu sürtünme, aradaki bir nötr noktası ile rulo basıncı maksimum olduğunda, girişte şeridi ruloların içine çekerken çıkışta şeridin hareketine karşı direnç gösterir.(Şekil 2.3) Haddelenme enerjisi rulo vuruşlarındaki sürtünmeye bağlı olan soğuk çalışma enerjisinin toplamıdır. Çok yüksek olan bu enerji sıcaklık formuyla neredeyse tamamen dağılmış durumdadır.(Şekil 2.3) Küçük bir kısmı metalde iç gerilim ve yerleşik olmayan formda saklı kalır. Bu tavlama sırasında kristalizasyonu kolaylaştırır.



Şekil 2.3 Metal akış gerilimi ve sürtünmesiz ortamda gerilim değişimleri(Taşkıran, 2003)

Çalışma ruloları olarak adlandırılan şerit ile temas halindeki rulolar haddeleme basıncına odaklanmıştır ve bükülmeleri büyük çapta ve bu yüzden yüksek sertlikteki yedek rulolarla sınıflandırılmıştır. Çalışma rulolarının çapının küçültülmesi haddeleme gücünü ve temas yayını küçültür. Çalışma ruloları şeriti sürtünme güçleri ile sürdüğü halde temas yüzeyi metali rulo vuruşlarına sürebilmek için yeterince büyük olmalıdır. Bu gücün haddelemenin stabilitesinde kritik bir etkisi vardır (Taşkıran, 2003).

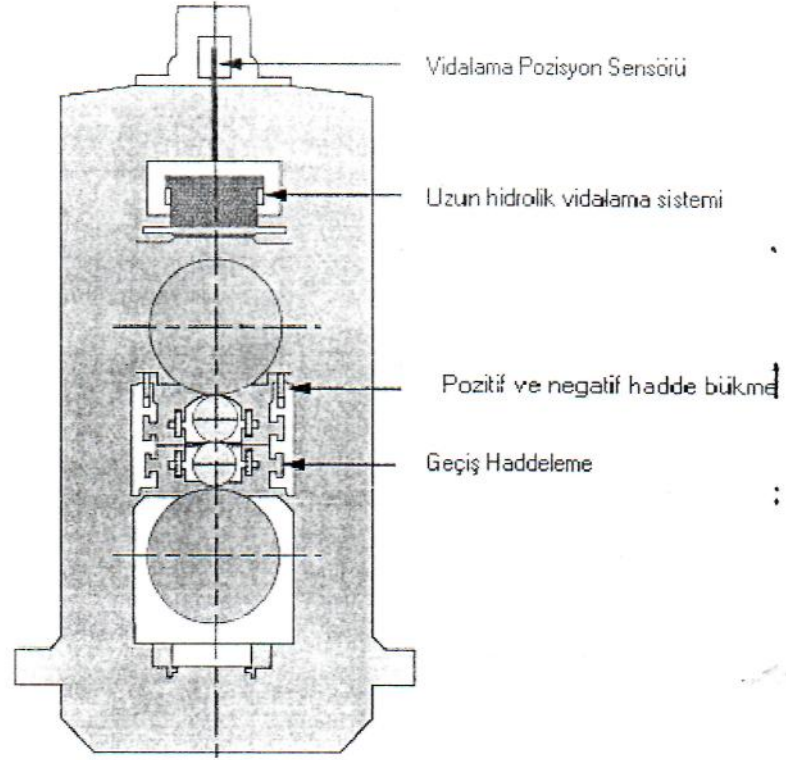
Şeritin ve ruloların soğutulması için haddeleme sıcaklığının 60 ile 130 derece arasında tutulması gerekir (Paketleme çelikleri için bazen 180 dereceye kadar olabilir). Soğutma geri dönüşümü büyük soğutma sistemleri içinde yapılan küçük miktarda haddeleme yağı içeren su ile yapılır.

2.4.2 Soğuk Haddeleme Teknolojisi

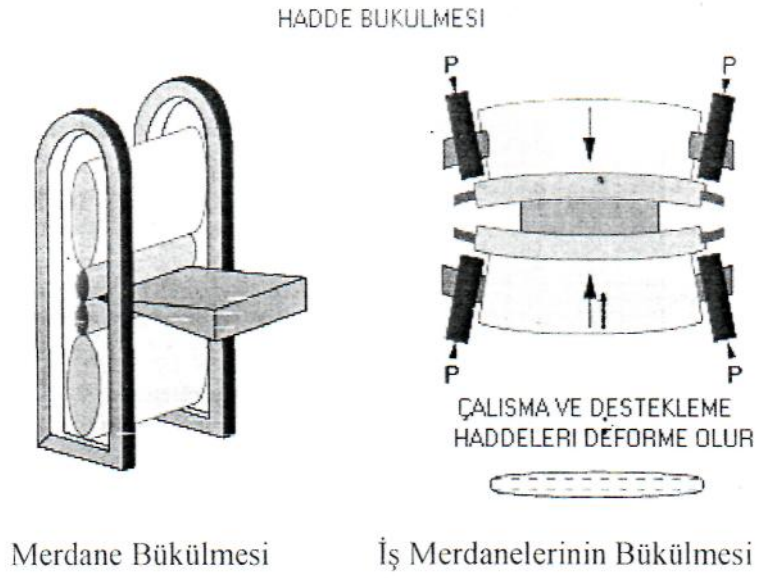
0.4 ile 3 mm arasındaki kalınlıklarda ve 1900 mm genişliğe kadar olan malzemelerde soğuk haddelirmede genellikle dört veya beş tandem stand içeren sürekli tezgâhlar kullanılır. Maksimum hız 600 hız ile 1400 m/dk arasında değişir. Daha ince paketlenme şeritlerinin (1200 mm genişliğinde 0.13-0.4 mm kalınlığında) haddelenmesinde kullanılan trenler beş veya altı stand içerirler. Maksimum hızları 1500 ile 2300 m/dk arasında değişir. Bazı az sayıda tezgâh her iki ürünün üretiminde de kullanılabilir. Bu tip tezgâhlar düşük kalınlıklarda iyi verimlilik için yeterince hızlı olmalı ve daha fazla kalınlıkları haddelleyebilecek kadar güçlü olmalıdır.

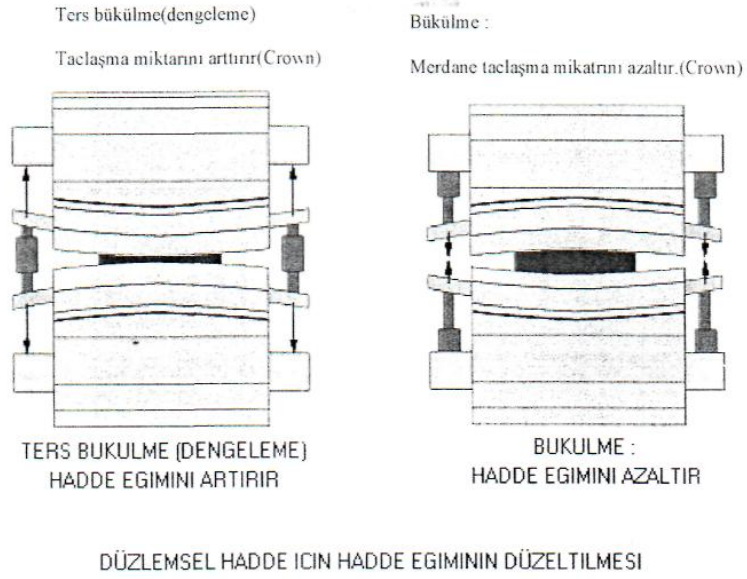
Haddeleme enerjisi çok yüksek tork gerektiren çalışma ruloları aracılığıyla nakledilir. Bu nedenle genelde kayma riskini azaltmak için çalışma ruloları sürülürler. Motor standa bağlı olarak değişik oranlarda azalan bir itme ile ruloları çevirir. Bir standın gücü 3 ile 8MW arasındadır. Modern kurulmuş tezgâhlarda DC motorlar kullanıldığı halde çoğunlukla yeni kurulan tezgâhlarda AC motorlar kullanılmıştır.

Haddeleme güçleri çok yüksektir (Tipik olarak 700 ile 1200 t/m arasında). Bir stand yüzük şekilli haddeleme yükünü rulolara transfer eden kolonlardan oluşur (Şekil 2.4, Şekil 2.5, Şekil 2.6). Modern tezgâhlarda aşağıya iniş hidrolik pistonlarla pozisyon (1 ile 2 μ m arasında) kontrolü ile yapılır. Çalışma ruloları kısmen küçük çaplarda olmalıdır bu nedenle eğmeye yönelirler. Bu kullanılan büyük çaplı yedek ruloların kullanılmasıyla giderilir. Sıklıkla iki çeşit standla karşılaşılır. (Taşkiran, 2003).

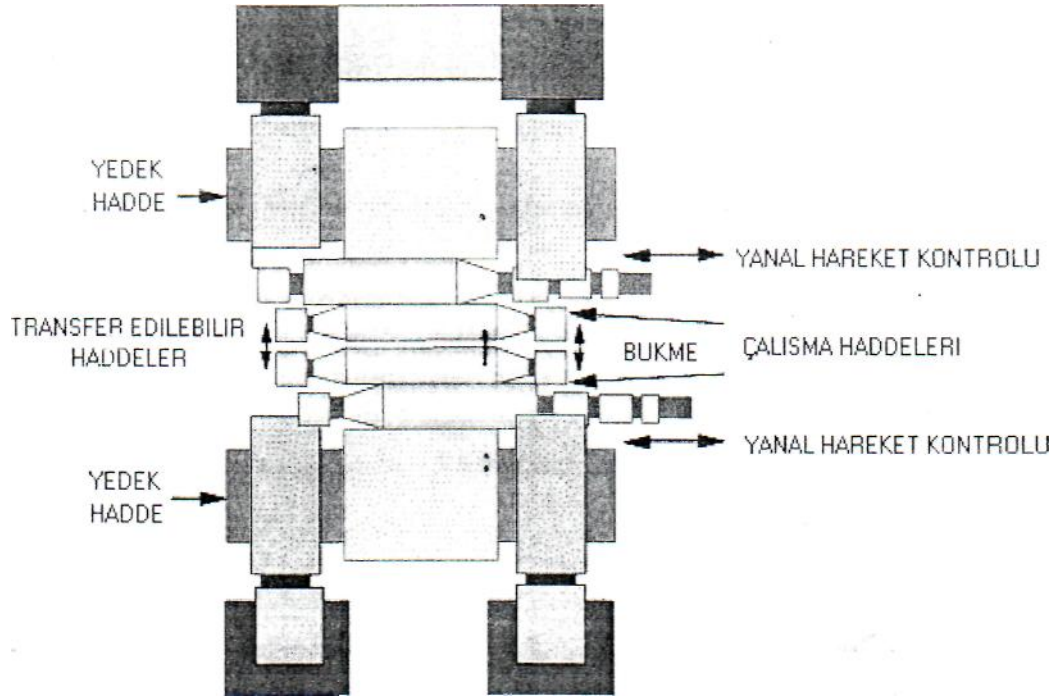


Şekil 2.4 Dörtlü soğuk hadde kesiti





Şekil 2.5 Yassı mamul haddelemede talaşma etkisinin düzenlemesi ve azaltılması metodu(Taşkıran, 2003)



Şekil 2.6 Altılı Hadde(Taşkıran, 2003)

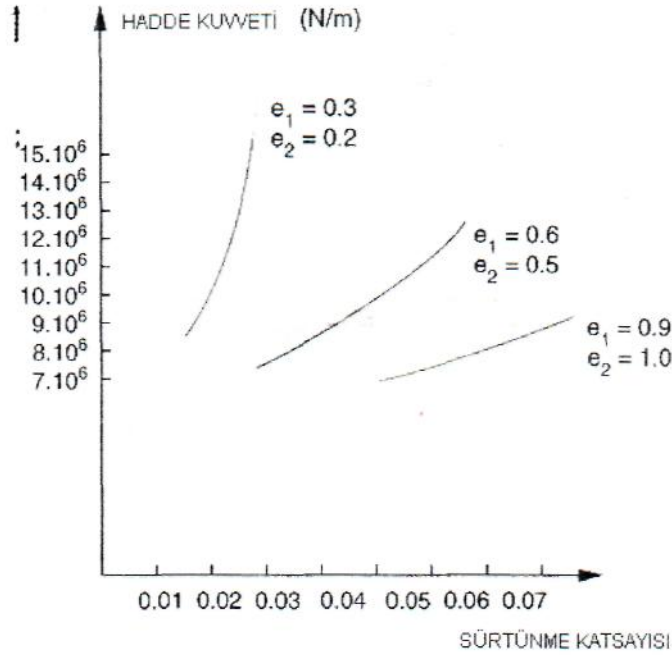
1. 2 adet 1400 ve 1500 mm çapında yedek rulolarla desteklenen 2 adet 500–600 mm çaplı çalışma rulolu Four-High standları;
2. Tezgahın şerit genişliğine adapte edilebilmesini sağlayan yedek ve çalışma rulolarının (300-400 mm çaplı), arasına yerleştirilmiş orta değiştirme ruloları olan Six-High standları. Bu konfigürasyon daha küçük çapta çalışma rulolarının kullanılmasına izin verir ve orta rulolarını sonunun pozisyonuna bağlı olarak şerit üzerindeki yük dağılımının değiştirilmesini olanaklı kılar.

2.4.3 Soğutma ve Yağlama

Sürtünme katsayısını azaltmak ve kontrol etmek için şerit ile çalışma ruloları arasındaki temasın yağlanması gereklidir. Düşük kalınlıklarda sürtünme katsayısı arttığında haddeleme gücü artar (şekil 2.7)

Sonuçta şerit ne kadar ince olursa yağlama o kadar etkili yapılmalıdır. Pratikte yağlamanın kesinliği direkt olarak, soğutma sıvısıyla (dengeli bir su yağ karışımı 2 ile 6 % yağ içeren) veya şerit üzerine yüksek yağ konsantrasyonlu (6-15%) dengesiz bir mekanik emülsiyon uygulanmasıyla sağlanır. Birçok çeşit yağ kullanılır (bazen mineral bazlı olan sentetik petrol yağları, bitkisel ve hayvansal yağlar.) eşitli katkılar yapılır, örneğin emülsiyon kontrol ediciler, aşırı basınç etmenleri ve anti oksidantlar (Taşkıran, 2003).

Haddeleme dışarıya atılması gereken yüksek miktarda ısı üretir. Bu nedenle yüksek soğutucular gereklidir. Ayrıca şerit hadde boşluğunun dışında soğutulabilir. Soğuk haddeleme değişik parametreler üzerinde etkiler yaratan kompleks bir işlemdir.



Şekil 2.7 Sürtünmenin ve bant kalınlığının haddeleme yükü üzerindeki etkisi(Taşkıran, 2003) Hadde gücü; Farklı rulolarda eğme derecesini belirler. Şerit ile temas halindeki çalışma rulolarının, yağlamaya, sürtünme katsayısına ve akış gerilimine bağlı olarak düzleşmesini belirler.

Hadde vuruşlarındaki sıcaklık soğutmanın etkinliği ile kontrol edilir. Aşırı ısınma yağ tabakasının kırılmasına neden olacak ve hadde basıncındaki vuruşlarla, şerit ve rulo arasındaki mikro sürtünmeler nedeniyle lekeler oluşturacaktır.

Yüzey pürüzlülüğü yağlama ve çalışma rulolarıyla belirlenir. Aşırı yağlama şerit ve rulo temasını azaltan kalın bir tabaka oluşturur. Bu tabaka ile şerit izole olur bu da pürüzlülüğün artmasına neden olur. Bazı aşırı durumlarda stabil olmayan şerit sürüşleri oluşabilir. Bu kaymaya, pürüzlülüğe ve şerit kalınlığında varyasyonlara neden olan titremelere neden olur.

Termal –indüklenmiş rulo soğutma etkinliğine ve haddeleme hızına bağlıdır.

2.4.4 Düzlemsellik

Uzun Orta ve Uzun Kenar adı verilen düzlemsellik hatalar, şerit ve rulo arasındaki profil farklılıklar sonucu oluşan eşit olmayan uzatmalar nedeniyle oluşur. Sabit bir düzlemsellik için kalınlık profili (Kenar ve Orta bölge arasında kalınlık farklılık yüzdesi) soğuk haddeleme boyunca korunmalıdır (Taşkıran, 2003).

Haddeleme sırasında rulo profili haddeleme gücüne, merdane, başlangıç taşlama profiline bağlıdır. Ayrıca genel düzlemsellik doğrultucuları da rulo profilini etkiler. Bu doğrultucular

öncelikle çalışma ruloları üzerinde bir eğme momenti uygularlar (eğme veya ters yönde eğme) (Şekil 2.7).İkinci olarak ruloların termal yayılmasını etkilerler. Bu sırada lokalize edilmiş soğutma sistemleri dar düzlemsellik hatlarının kontrolünü sağlar. Düzlemselliği artırmak için başka teknikler de geliştirilmiştir (Taşkiran, 2003).

Çeşitli profillerde merdaneler.

Altılı haddeler, iş merdanelerini destekleyen orta ruloların kararlılığına ve bükülme miktarlarına direkt etkisi vardır.

Yanal kayma hareketli standları. Dörtlü haddeler.

Çift geçiş standları (iş merdaneleri ve destek merdaneleri arası yer değişimleri birbirleri ile ilişkilidir.

Haddeleme sırasında haddeleme basıncı ve lokal şerit varyasyonu sonucu ile rulo ve şerit yük altında kalır. Şerit gerilim altındayken sadece ciddi düzlemsellik hataları fark edilebilir. Şeritin her alanında özel gerilim ölçücüler kullanılarak gerilimin sürekli takip edilmesi, gizli kalmış düzlemsellik hatalarının belirlenmesini sağlayan gerilim profilini verir. Gerilim güçlerinin azalmasından sonra şerit denge konumuna dönerek en düşük gerilim alanlarında ondülasyonlar üretir. Gerilim araçları yukarıda belirtilen ayarlama sistemlerinde kullanılabilir. Ayrıca tezgâh operatörü yavaş yavaş yağlama kondüsyonlarını ve şerit sıcaklığını modifiye edebilir ve böylece başlangıç profili (kalınlık dağılımı) belirlenir.

2.4.5 Kalınlık

Soğuk haddelemenin amacı dar toleranslarla verilen şerit kalınlığına ulaşabilmektir. Kalınlık düzenliliği şerit kalitesinde önemli bir faktördür. Nominal kalınlığın %1 değişimlerinde bir düzenlilik sağlamak mümkündür. Bu paketleme çeliklerinde sadece birkaç mikronu ifade eder.

2.4.5.1 Kalınlık Ayarlama İlkeleri

Haddeleme gücüne bağlı olarak standın deformasyonuna tezgâh uzaması denilir ve çoğunlukla yükle orantılıdır. Şerit çıkış kalınlığı yüklenmemiş rulo boşluğu ve hadde yükü altındaki tezgâh uzamasının toplamına eşittir. Bu parametreler verilen şerite göre farklılık gösterir. Giriş kalınlığı ve akış gerilimi şerit boyunca sabit değildir. Sabit bir kalınlık elde edilebilmesi için rulo boşluk ayarlarının değiştirilmesi gereklidir. Standlar tandem senkronize edildiklerinde, standların anlık akışları yığılma ve aşırı gerilimi önlemek için birbirlerine benzer olmalıdır. Kalınlık azaldıkça şerit hızlanır denklem aşağıdaki gibidir.

$$e_1 \times V_1 = e_2 \times V_2 \text{ veya } (V_{n-1} \times e_{n-1} = V_n \times e_n) \quad (2.5)$$

Denklem, belirli bir stand da kalınlığın azalmasının belirtilen standda bir önceki stand arasındaki hız oranı tarafından kontrol edildiğini belirtir. Bu nedenle orta standlarda kalınlığın azaltılması tüm hız oranının kontrolü ile olur. Eğer bir orta standın tek başına hızı farklılık gösterirse, stabil bir rejimde final kalınlık değiştirilmeden kalınlık azalması bitişik standlara nakledilir. Basınç ve gerilimler modifiye edilmesine rağmen kalınlığın ölçülmesi ve kontrolü X veya Gama ışınlarıyla yapılır. (Taşkiran, 2003).

2.4.5.2 Pratik Kalınlık Kontrol Teknikleri

İlk stand sıcak haddelenmiş bobindeki kalınlık değişimlerini düzeltmelidir. Stand 1 ve 2 arasına yerleştirilmiş bir ölçü aleti 1'deki aşağıya inişi kontrol eder. Stand 1 girişine metalik özelliklere tepkisiz olan başka bir ölçü aleti yerleştirilebilir. Sabit bir ilk stand hızı için kalınlık varyasyonları giriş hızı V_0 modifiye edilerek kompanze edilir. Bobin çözücü hız yoluyla değil tork ile kontrol edilir.

Kalınlık düzenliliği rulo boşluk ayarlarına bağlıdır, bu nedenle genelde hızlı hidrolik sıkıştırma benimsenmiştir. Stand 1 çıkışında artan kalınlık varyasyonları fark edilerek bu standın hızı modifiye edilerek yani stand 2 deki azaltmaların değişimiyle düzeltilir. (örneğin Stand 1 ve 2 arasındaki gerilimin modifiye edilmesi). Şerit hızı bazen temassız sensörlerle (sıkıştırmanın kontrolünün geri beslemesi ve hadde hızı ile) ölçülür.

Şeritteki gerilimler konumlanmış ruloların dayamalarının altına yerleştirilmiş bu şekilde, iki stand arasındaki şeritte önemsiz sapmalara neden olan yük hücreleri tarafından ölçülür. Haddeleme gücünün olabildiğince sabit olması önemlidir. Bu sıkıştırma pistonlarının durumu yoluyla rulo boşluğunun sürekli kontrolünü gerektirir. Çalışma rulosu profili düzenli bir şerit geometrisi verebilmesi için optimize edilir. Çalışma ruloları ve altı-yüksek (six-high) standlardaki orta rulolar her zaman rulo dayamalarına monte edilmiştir. Yedek rulolar hidrodinamik dayamalar üzerinde takviye edilir. Ancak son yıllarda bunlar bir yağ filmi nedeniyle hıza karşı tepkisiz olan rulo dayamaları üzerine yerleştirilmektedir.

2.5 Merdaneler

Soğuk haddelemede kullanılan rulolar dövülmüş veya yüzde 3 ile 5 arasında dökülmüş krom çeliktir. Daha yüksek dereceli alaşımlılar geliştirilmektedir. Kullanılmış rulolarda bu operasyon haddelemenin neden olduğu sertleşmiş yüzeyi yok eder ve istenen pürüzlülüğün oluşumunu sağlar. Orta rulolar için sağlanan Ra pürüzlülük 0.5 μm civarındadır. İnce şerit tezgâhlarının son standlarında değeri 3 ile 5 μm arasında değişen daha yüksek pürüzlülük değerleri kullanılır. Yüksek pürüzlülük sıcak daldırma galvanizleme sürecinde çinko kaplamanın yapışma oranını yükseltir, gaz sirkülasyonunu kolaylaştırır ve tavlama sırasında yapışmaya izin verir. Her öğütme işlemi sonrası rulolar kaplanabilir. Bu işlem ruloların dayanıklılığını öğütme operasyonları arasında ömrünü yükselterek (3 ile 5 faktörleri arasında) kısıtlar (Taşkiran, 2003).

Ürün düzenliği şu an için en önemli kriterdir. Yeni bobinlerin soğuk haddelemede yüklenişi fabrika operasyonlarında periyodik değişiklikleri gerektirir. Bu bozukluklar, yüklenme hızlarının düşüklüğü nedeniyle üretim kayıpları anlamına gelir. Aynı zamanda bu bozukluklar kalınlık toleranslarında taşmayı ve haddelerin zarar görme riskini artırıcıdır. Bu dezavantajları elimine etmek için ilk kullanılan fikir “ sürekli haddeleme” fikridir. Bu proseste haddelenen bobinler birbirlerine kaynatılarak tutturulurlar. Haddenin girişinde bir kaynak istasyonu gereklidir. Kaynak zamanını gizleyen (azaltan) bir akü ve bobin sarıcıdan önce flying shear (kesici) gerekir. Bu tip haddeler karışık kontrol sistemlerine ihtiyaç duyar, çünkü durmaksızın kalınlık değiştirilebilmektedir. Hadde kapasitesi ve ürün düzenliliği bu yöntemle oldukça geliştirilmiştir. Çeşitli prosesleri devamlı birleştirme fikri oldukça geliştirilmiştir. Çünkü prosesler arası stokların kabarıklığı oldukça maliyetlidir. Haddeleme ve asitleme hattının direkt birbirine bağlanma ihtimali böylelikle düşünülmüştür. Pratikte ilk defa Fransa ve Japonya da denenmiş ve sonra tüm dünyada örnekleri çoğalmıştır. Diğer tüm üretim operasyonlarından (asitleme, soğuk haddeleme, temperleme ve temper haddeleme) birleştirilmesi denenmiştir. Fakat kapasitedeki büyük farklılıklar ve programlamadaki kısıtlamalar (her cihaza özgü spesifik) bir temperleme fırınına direkt bir haddeye bağlamak olanaksız kılmaktadır (Taşkiran, 2003).

2.5.1 Tavlama, Kristalleşme

2.5.1.1 Metalürjik Altyapı

Soğuk haddeleme, esneklik yitimi ile beraber gerilim sertleşmesini de beraberinde getirmektedir. Haddeleme enerjisinin küçük bir kısmı (5-10%) metalin içinde dislokasyon şekillerine ve elastik gerilimin içinde depolanmaktadır. Temperleme işlemi rekristalizasyon depolanmış gerilim enerjisinin azaltılması için gerekli sıcaklıkta tutulmasıdır. Minimum rekristalizasyon sıcaklığı (belli bir çelik için) gerilimin fonksiyonu olarak tespit edilir. Belli bir gerilim için, bu sıcaklık çeliğin saflığına bağlıdır, özellikle elementlerin konsantrasyonu rekristalizasyon içnelenme ve dislokasyonun stabilize oluşundan dolayı geçirilir. Böylece var olan gerilim enerjisi düşer, soğuk malzeme miktarı ne denli az ise nükleasyon o kadar yavaştır ve sonuç olarak rekristalizasyon tanecik daha çok sayıda elde edilir. Pratikte soğuk hadde ünitesinde gerilim seviyesi %40-%90 arasında bırakılır, basit çelik dereceleri için rekristalizasyon 400–600°C arasında başlar, 550–700 °C arasında biter. Gerçek gerilim seviyesi ve çelik içeriğine bağlı olarak ısıtma derecesi böylelikle rekristalizasyonun başlamasına etki eder. Rekristalizasyonun tamamlanmasına yakın zamandaki sıcaklığın etkisi bu parametre için daha düşüktür. Rekristalizasyon temperlemesinin amacı optimum sayıda tanecik elde etmektir, akma değerinin kontrolü için bu gereklidir. Çekme uygulamalarındaki çeliklerde olduğu gibi daha yüksek gerilim oranına tekabül eden kristolografik dokuyu gerçekleştirmek amaçtır. Düşük ısı çevrimlerinde bu 600 °C derecenin üzerinde gerçekleşir. (600 °C’ de 10 saat tuttuktan sonra her saat 10 °C arttırılarak ve 700 °C hızlı çevrimlerde uygulanır. Ekstra yumuşak çeliklerin temperlenmesinde oluşan modifikasyonlar Çizelge 2.2 de özetlenmektedir. Çizelge 2.2 de alüminyum alınımış çelik için oldukça farklı mekanik özellikler elde edilir. Eğer ısı işlem çevrimi düşük olursa bobinlerin yığın temperlenmesi ya da sürekli temperlenmesi gibi. Aynı özellikleri kazanmak için, iki tip temperleme de farklı çelikler kullanmak gerekir. Yığın temperleme de AIN’nin çökmesi gerçekleşir kristalleşmeden önce, bu da doku şekillenmesine yol açar, tane gelişimi engellenmez ve doku sağlamlığı elde edilir. Hızlı sürekli temperleme de AIN çökmesi kristalleşmeden sonra oluşur. Sıcaklıklarda tane büyüklüğünü oldukça engeller zaten bu derece uygulanabilen en yüksek değerdir. Çok küçük taneli yapılar oluşur, yüksek akma elde edilir, daha hafif rekristalizasyon yapılardan çok da büyük olmayan gerilim oranı oluşur.

Çizelge 2.2 Bobin Tavlama ve Sürekli Tavlama Özellikleri (Taşkiran,2003)

DERECE	SICAKLIK	BOBİN TAVLAMA	SÜREKLİ TAVLAMA
Alüminyumla öldürülmüş extra yumuşak malzemeler nitrojen solüsyon içinde		Yavaş ısıtma çevrimi ~30+/-10h tavlama sıcaklığı 710C	Hızlı ısıtma çevrimi ~90+/-30s 30-60sn tutma zamanı tavlama sıcaklığı 850 C
	500–550 550–600 600–650	AIN çökelme Rekristalizasyon Tane büyüme tekstür desteği Tane büyüme	Birinci rekristalizasyon başlangıcı AIN çökmesinin başlangıcı
	650–700	Yapı desteği	Tane büyümesi engellenmesi
		Solüsyona alma ve kısmen Fe ₃ C küreselleşmesi HNX kullanımında yeniden nitrürleme tokluk kaybı kaba taneler	Birinci rekristalizasyonun tamamlanması AIN çökmesi sonucu tane büyümesinin geciktirilmesi
	700–750		Geciktirilmiş tane büyümesi çok yavaş tane büyümesi sementit küreselleşmesi başlangıcı
	750–800		
	800–850		
	700–600	254+/-5h Fe ₃ C çekirdeklerinin formasyonu	10+/-5 dk Fe ₃ C çekirdekleri formasyonu
	600–200	Çözünmüş karbonun çökmesinin tamamlanması	Çözünmüş karbon kısmi çökmesi kalıntı karbon 4-15ppm yaşlanma çevrimine bağlı olarak

HNX: Nitrojen ve %5 hidrojen
karışımı

Bobin tavlama ve bobinlerin soğutulması	Sürekli tavlama ve soğutma
Final özellikler Tane boyutu:7–9 ASTM YS:160-190Mpa UTS:290-315Mpa El:40–44% r:1,6–2,1	Final özellikler Tane boyutu:10–11 ASTM YS:230-270Mpa UTS:330-400Mpa El:31–38% r:1,0–1,4

Hızlı çevrimlerde, serbest azotsuz çelikler kullanılmalıdır. Sıcak haddelemelerde alüminyumu alınmış çeliklerde yüksek sıcaklıklardan da bu başarılabilir. (AIN soğuk haddelemeden önce çökeltirir) veya çok düşük karbon niobium ve titanyum değerleri sabit malzeme kullanılabilir. Sonuçta, soğutma süresince karbonun çökertilmesi hızlı soğutma ile hızlandırılır, (>30 °C/sn)

bu 550 °C–600 °C ve 350 °C–400 °C arasında uygulanabilir. (350 °C–400 °C’ de 3 dk tutmanın akabinde). Bu teknik, serbest karbon tanesinin 4–7 ppm ve yaşlanmaz çelikleri ortaya çıkarır. Mekanik özellikler yoğun temperlemeye oranla daha az durağandır. (YS=180–240 MPA $r=1,4-1,8$ El=36–41 %). Aksine, düşük karbon çeliklerinin kullanımı (stabil niobiumu ve titanyumla) sürekli temperlemede kullanılan alüminyumsuz çeliklerin mekanik değerleri daha üst seviyelerde çıkmaktadır (Taşkiran, 2003).

2.5.1.2 Bobin Tavlama

Bobinler genellikle mt/en 10–22 ton gelen ve dış çapı 1-5-2.5m olmaktadır. Dilinmişin genişliği ve bobinin yüksekliği neticesinde karar verilir. 0.8–1.8m arasında bu değişir ki nihai tüketicinin isteğine bağlı olarak değişir.

Temperleme çan fırınlarında yapılır. Bobinler 2li 5li olarak kenara istiflenir. 3–4.3 yükseklikte ve 30–130 ton kapasiteli konvektörler kullanılır. Oksidasyonu engelleyen saf hidrojen ya da azot-hidrojen barındıran atmosfer kullanılır. Bobinler şeklinde bir çelik kapak yardımıyla fırından ayrı tutulur ve yanıcı gazlara temas etmez. Tabanda konvektör ve bobinler arasında kuvvetleri divilmiş bir sirkülasyon yaratan vantilatör bulunur. Bobinler gaz ve konvektör teması ile ısıtılır. Soğutma yapılırken de gaz dışarıdaki ısı eşanjörleri tarafından ısıtılmak üzere çekilir. Çandan yayılan ısı bobinlerin çevresini ısıtır. Bobinlerin iç kısmı ve köşeler konveksiyon ile ısınır. Bobinlerin radyal iletkenliği ise düşüktür. Çünkü sarımlar arasındaki temas noktaları toplam yüzeyin %2’sini teşkil eder. Kalınlığı pürüzlülükle beraber düşen gazın ara tabakası önemsiz bir ısıl iletkenliğe sahiptir. Koruyucu atmosfer HNX ya da saf hidrojen ortalama radyal iletkenlik toplam katı metalik %0,06 sıdır. Saf hidrojen ise daha iyi iletkenidir bu rakam sadece %0.15’e yükselir.

Metal 700 °C’ ye ısıtıldığında, artan tane büyümesi, azalan sertlikte beraber ortaya çıkacaktır. Azot fazlalık alüminyumla reaksiyona girip nitritleri oluşturacaktır. Fazla ısıtmaktan sakınmak için fırın sıcaklığı bobin dışı ve çandan yayılan ısıyı kontrol eden bir termocouple tarafından kontrol edilir.

Metalurjik dayanak noktası olarak, hidrojen tarafından desteklemek daha yüksek radyal iletim bobin merkezi ve yüzeyi arasındaki sıcaklık farkını minimize eder. Kaba taneleşmeyi minimize etmek için 10 saat civarında homojenizasyon zamanı (HNX atmosferinde) geçerlidir.

Isıl çevrimin başında, haddeleme yağı damıtılmış kalır. Azot bazlı atmosferlerde, bobin kenarları ve merkezi arasındaki yüksek sıcaklık farkı sıcak kenarlarda yağ buharlarının

çatlamaını, siyah sınırların oluşmasını tetikleyebilir. Bu risk hidrojen atmosferinde söz konusu değildir. Daha atmosferin sürekli temizlenmesi atılması gereken damıtılmış ürünlerin ortaya çıkmasına yol açar.

Nitrojen nedeniyle HNX atmosferi sistematik daha yüksek mukavemet seviyeleri ortaya koyduğu, daha az uniform ısıtma nedeniyle daha fazla dağınıklık yarattığı bilinmektedir. Maksimum sıcaklık farkı 6 saat içinde HNX için 500 °C, hidrojen de ise bu değer 12 saat sonra 200 °C dir.

Sıcaklık çevrimi bilgisayar kontrolü altındadır, çevrim içinde her fazın uzunluğuna karar veren bir matematiksel modele dayanır. Bobinin altı ve atmosferin sıcaklığı bir sıcaklık ölçer tarafından ölçülür (güvenlik önlemi olarak) gerekli sıcaklık bobinlerin her yerine sirayet ettiğinde, fırın çandan uzaklaşır ve yükleme soğutulur, koruyucu atmosfer altında ısı eşenjörleri soğumayı sağlar. Bazen fırın yerine su soğutuculu kapak kullanılır. İnce dilmeler için eğer haddeleme yağlaması prosedürleri kullanılabilirse, uzun çevrimlerde de (680–700°C’de) iki atmosfer ortamında da oldukça iyi yüzey temizliği elde edilir. Fakat daha düşük 650°C gibi kısa çevrimli sıcaklıklarda sadece çok düşük hidrojen seviyelerine izin vermektedir. (Çizelge 2.2)’de iki tekniği kıyaslamaktadır.

2.5.1.3 Sürekli Tavlamanın Endüstriyel Avantajı

Sürekli tavlama ince tenekelerde ve sıcak daldırma galvaniz proseslerinden önceki tavlamalarda 40 yılı aşkın bir zamandan beri uygulanmaktadır. Bu malzemeler için tavlama çevrim yaşlandırma kısmını genelde pek içermemektedir. Çünkü alüminyum ile öldürülmüş aşırı yumuşak çelik her zaman çok serttir. Diğer yassı ürünlere uygulanan bu tekniğin genişletilmesi aşağıdaki avantajları ortaya koymaktadır:

Sürekli tavlama hattında bobinin açılması artık hadde yağlarının çok iyi şekilde arındırılmasına olanak tanır. Bu elektrolitik arındırma veya redüklenmiş atmosfer altında 550°C–700 °C’ ye ısıtmayla gerçekleştirilir.

Bu tekniklerle yüzey karbonu oldukça düşük seviyelere çekilebilir ($C < 3\text{mg}/\text{m}^2$). Bu yığın temperlemedeki $7\text{mg}/\text{m}^2$ değerinden oldukça düşüktür. Çıplak metalik fosfatlanma yeteneği ve fosfatlı ve boyalı sacın korozyon direnci düşük karbon seviyesinin her iki malzeme için önemini ortaya koymaktadır.

Operasyonlar arasındaki ara stokların elimine edilmesi hata kaynaklarını, mekanik şokları, bobin sarımından kaynaklanan çizilmelerden korumaktadır. Açıkça, sürekli tavlama kendi

yarattığı riskleri çizilme ve hadde izleriyle direkt ilgilidir. Bununla birlikte, tecrübeler sürekli temperlemenin hata azatılımı ve genel güvenilirliği getirdiği görülmektedir.

Bu avantajları karşılayan şey oldukça yüksek yatırım maliyetidir ki gelişmeleri sınırlamaktadır.

2.5.1.4 İnce Şeritlerin Sürekli Tavlama Teknikleri

Sürekli tavlama hatları giriş ve çıkış biriktirme bölümlerini içeren dikey fırınları kullanılır. Kaynak ve kesme operasyonları sırasında dilim fırın içerisinde kalması riskini ortadan kaldırır. Bu bölümlerin uzunluğu fırın içindeki dilimin maksimum hızının fonksiyon şeklinde hesaplanır.

Sıcak dilimin fırında durması kırılmaya yol açabilir.

Giriş bobini her zaman iki bobin açıcı bulundurur. Bunun yanı sıra kesici, kaynak, genelde elektrolitik yağ giderici, buna bağlı fırçalama, yıkama,-kurulama ve depolayıcı da bulundurur. Sarıcıya ek olarak bir bıçak ve iki bobin sarıcı, çıkış bobininde bir temper haddesi ve kenar kesme bıçağı, korozyona koruyucu kaplamasız ürün için yağlama ekipmanı ve kalite gözlem ekipmanı (örnek akma, bobin tanımlama, yüzey gözleme)

Fırınlar 5 değişik bölgeye sahip olabilir.

Bir ısıtma bölgesi, rekristalizasyon tavlama amaçlayan (620°C – 850°C ürüne bağlı olarak değişen)

Bir tutma bölgesi, tane büyüklüğünü arttıran yeterli zamanda sıcaklığı sabit tutan bir bölgedir (30sn kadar).

Yavaş soğutma bölgesi ($10^{\circ}\text{C}/\text{dk}$ yapı kontrolünü sağlayan).

Çeliği yaşlanmaya hazırlayan ani soğutma bölgesi, yeterli miktarda karbonu aşırı doymun çözültide bulunduran.

Bir aşırı yaşlanma bölgesi, çözülmemiş karbonu çökelten, diğer yan yaşlanma reaksiyonlarını engelleyen.

Final soğutma bölgesi, metali artan sıcaklığına oksidasyonsuz indiren.

Fırınlar tamamıyla erimez tuğlalarla çevrilidir, atmosfer ise %1–2 H içeren N den müteşekkildir. Haddeler ise ısıya dirençli, çok az ısıtılarak genleşen çelikten yapılmıştır. Haddeler, sac arasındaki sıcaklık farklı atmosfer haddelerin geometrisi nedeniyle önemli

varyasyonlara yol açabilir. Bu etkiyi karşılamak için, haddelere soğuk reneleme ile değişik şekiller verilir.

Özellikle fırın içinde hat boyunca, sürücü sistemler gereklidir. Genelde fırının üzerinde hat ekseninde dönebilen hareketli bir kasa içinde bir çift hadde bulunmaktadır. Haddeler üstünde bandın eksantrikliğini ölçen bir taraftan hareketliliği kontrol edilir. (Taşkiran, 2003)

2.5.1.5 Hızlı Soğutma Teknolojisi

Temperleme sıcaklığı ve yaşlandırma işlemi seçiminin metalurjik madenleri 5.1 de açıklanmıştır. Saniyede 30°C den daha fazla soğutma, çeşitli tekniklerle elde edilebilir. Fakat, tercih edilen soğutma sonundaki sıcaklığın hassas şekilde kontrol edilebilmesidir, aynı zamanda oksitlenme engellenmelidir. Bunlar gaz jetleri ile yüksek basınç altındaki soğutma ve temas noktasında su verme işlemidir.

Isı kontrolünde optikal parametre gelişme şimdi bant sıcaklığının $\pm 5^\circ \text{C}$ yaklaşıklıkli olarak tahminine izin vermektedir. Temperleme ve aşırı yaşlanma sıcaklığı $\pm 10^\circ \text{C}$ ile kontrol edilebilmektedir.

2.5.1.6 Bobin ve Sürekli Tavlamanın Tamamlayıcılığı

İnce bant için sürekli tavlama hattı yüksek kapasiteli karmaşık bir tesistir (60-200tn/saat). Temperleme, kontrol dahil toplam harcanan 150-200 milyon \$' a bedeldir. Hidrojen atmosferli bobin tavlama fabrikaları ise daha ucuzdur. Modern fırınlarda elde edilen verim artışı sonucunda eski teknolojilere artık yatırım yapılmamaktadır. Sürekli ve bobin tavlama böylelikle tümleşik prosesler olmuştur. Bobin tavlamanın avantajları aşağıdaki gibidir.

Düşük yatırım maliyeti

Alüminyum ile öldürülmüş çelik kullanımı (titanyum-niobium stabilizasyonu ve vakum giderme gerektirmez.)

TC, E ve ES gradelerinin tekrar üretilebilen mekanik niteliklere sahip şekilde güvenilir üretimi ve düzgün yüzey temizliği.

Diğer taraftan, sürekli tavlama:

Stok ve üretim süresinin oldukça düşürülmesi

Mekanik özelliklerde ufak değişimlere yüksek mukavemet, çekmeye uygun teneke malzemelerin üretimi.

Yüksek yüzey kaliteli bant üretimi. Düşük karbonlu elektrik çeliği üretimi.

Bu kaliteler için tav çevrimi sınırlarının saf olmayışından doğan difüzyonun azatılımı için hızlı soğutma ile gelen nüfuziyet yeteneği.

Bobin her ne kadar sürekli tavlama tekniği göstermekte ise de tavlama avantajları nedeniyle kolay yakın gelecekte kaybolmayacak gibi görünmektedir. (Taşkiran, 2003)

2.5.2 Temper Hadde

2.5.2.1 Amaç

Çeliğin içerdiği bağlayıcı elementlerde, (CN) metal tavlama sonrası gösterdiği bir akma noktası uzaması etkisi vardır. (Nitrürler ve karbürler nedeni ile hareketlenmesi kalıntı dislokasyonların başlangıç hareketlenmesi yüzünden). Temper haddelenenin amacı dislokasyon yoğunluğunu arttırmak için yeterli miktarda gerilimi vererek akma noktası uzamasını elimine etmektir. Uygun yüzey pürüzlü merdaneler ile yüzey gerekli pürüzlülüğü ve düzlemselliği sağlanır.

2.5.2.2 Teknoloji

Soğuk haddelemede olduğu gibi temper haddeleri dörtlü veya altılı olabilir. Fakat pürüzlülük transferi uygulanan basınca bağlıdır. Bu yüzden çeliğin akış gerilim ve hadde çapı, haddeleme kuvveti de sonuçta etkilidir. Bazı kalitelerde (IF çeliği) hadde kuvveti çok düşüktür. Bu nedenle özel basınçların sınırlanabilmesi için merdanelerin çapı mümkün olduğunca büyük olmalıdır. Dörtlü hadde bu amaç için en iyisidir. 4 yüksek, 2 yüksek standları kombine olarak mevcuttur. Geniş çap iki yüksek konfigirasyonunda kabul görmektedir. Altılı haddeler yüksek uzama değerleri gerektiğinde iyi adapte olmaktadır.

Temper haddelerde genelde haddeleme su-deterjan karışımı ile yağlanmış halde ıslak uygulanabilir çünkü küçük redüksiyonlarda pratikte ısınma söz konusu değildir. Gerilim kuvvetlerini sabit tutmak için iki hadde gerilim bloğu bobin boşaltıcı ile temper hadde arasına konur. Hadde bükme pistonları bant düzlemselliğin sağlamak için kullanılır.

Sonuç olarak bazı özel uygulamalarda oldukça ince ambalaj malzemelerinde de olduğu gibi (0.13 mm)malzeme tavlama %20-%40 oranında temper hadde ile elde edilebilir. Bu işlem tandem halinde kullanılan bir çift temper hadde ile uygulanır.

2.5.2.3 Merdane Yapısı

Temper haddenin hayati fonksiyonlarından birisi de form verme-boyama gibi işlemler için gerekli pürüzlülüğü banda vermesidir. Bu amaçla; haddeler çeşitli tekniklerle şekillendirilir.(Merdane)

Mekanik çarpma yöntemi ile aşındırma: Bir türbin ile fırlatılarak yüzey yapısı oluşturulmasıdır. Bu en eski prosedür ve oldukça yaygındır. Fakat sonuçta oldukça fazla dağılım ve kontrol güçlüğü yaratır.

Lazer Dokulama: (EDT) Hadde dielektrik banyosuna sokulur ve bir elektrot metali eroze edecek şekilde ark yapar. Bu proses oldukça parlak boya kaplamasını sağlamak için gerekli yüzey dokusunun üretimini mümkün kılar. Hem son haddelerde hem de temper haddelerinde kullanılır. (Taşkiran, 2003)

3. ELEKTRİKSEL ÇELİKLER

Pratikte elektriksel çelikler iki ana başlık ve birçok alt başlığa bölünerek sınıflandırılırlar. Bu sınıflandırma malzemenin manyetik özelliklerine, şekline, cinsine veya üretim yöntemine dayandırılarak yapılır. İki ana başlık ise;

1. Yönlenmiş çelikler
2. Yönlendirilmemiş çeliklerdir.

Yönlendirilmemiş çelikler tam mamul ve yarı mamul olarak üretilirler.

3.1 Elektriksel Çeliklerin Sınıflandırılması

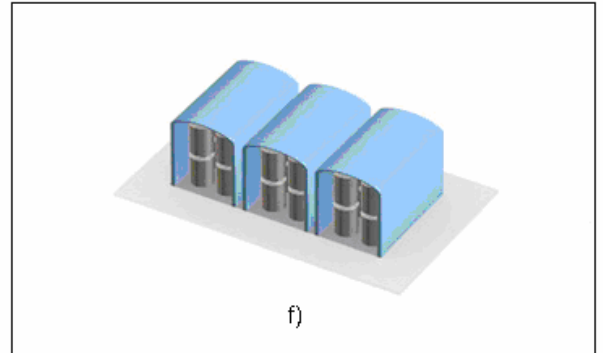
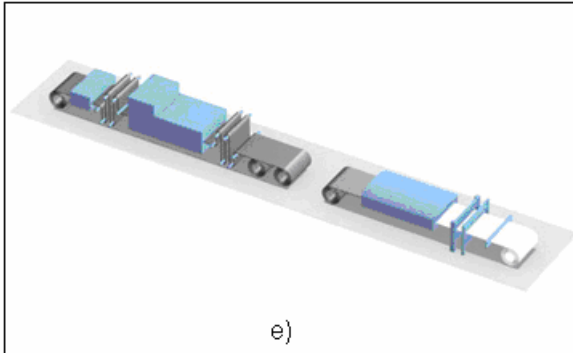
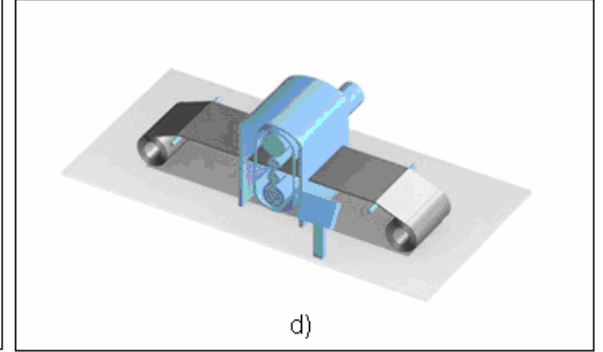
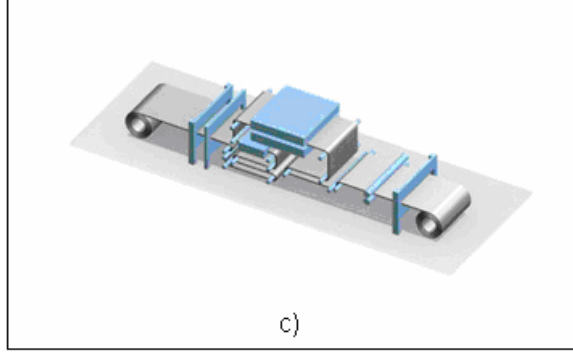
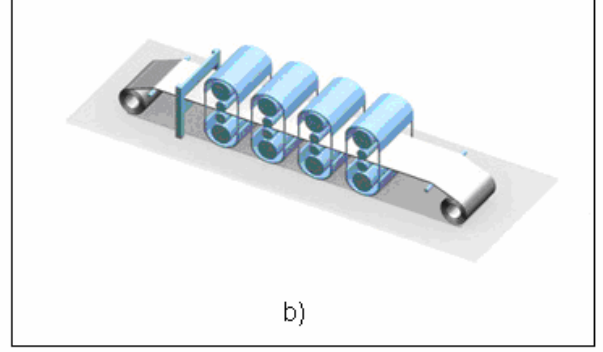
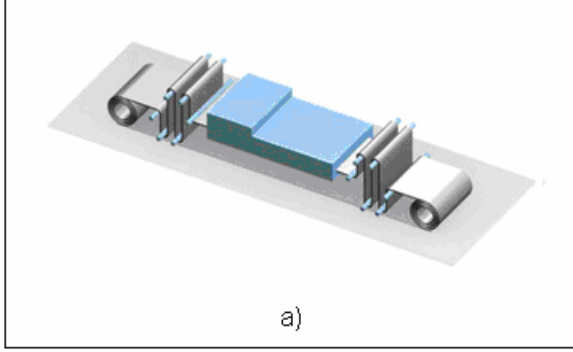
3.1.1 Yönlenmiş Çelikler

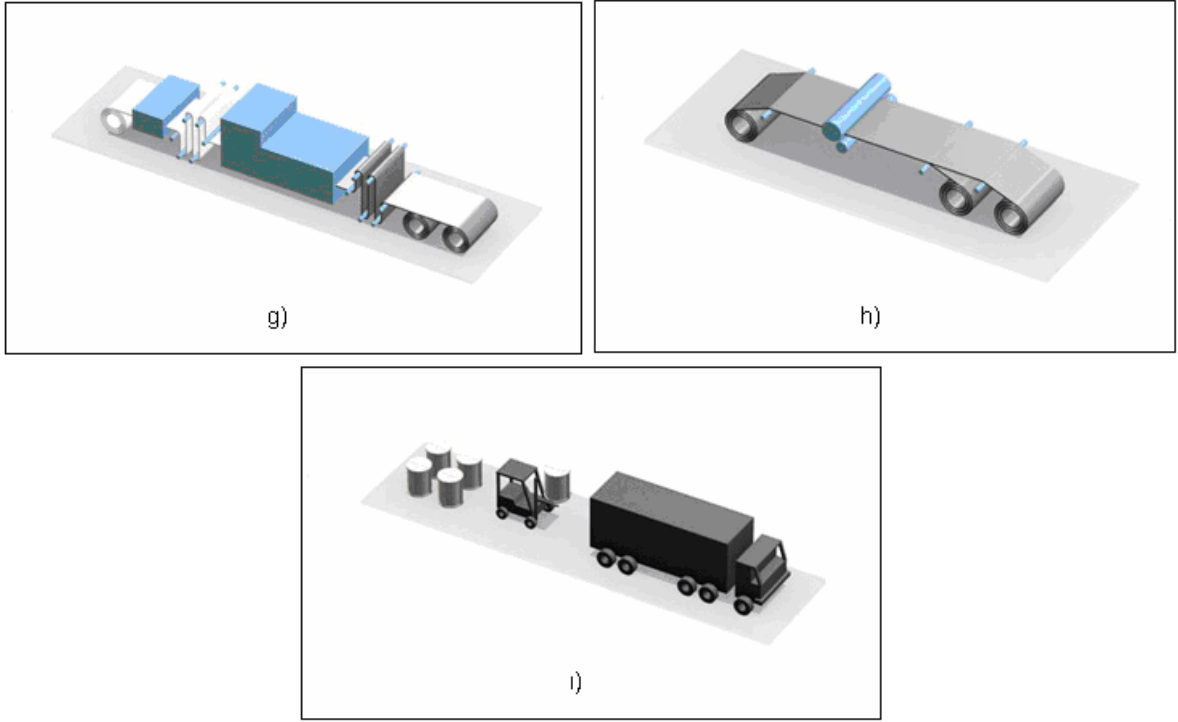
Bu terim elektriksel çelikleri yani manyetik özelliklere sahip ve haddelene yönüne karşı güçlü bir dağılıma sahip çelikleri tanımlar. Haddelene ve tavlama prosesi sayesinde uygun alaşım kompozisyonu ve metalik kristal yapı birlikte üretilebilir ve tanelerin dizilimi ile haddelene yönünde ki manyetik özellikler çok çok üstün olur. Bu sonuçlar farklı yönlerde daha düşük özellikler gösterir ama yine de transformatör çekirdeği olarak büyük oranda ve düşük hızlı senkronik makineler için çekirdek olarak çeşitli şekillerde üretilirler.

Silisli çelikte tane boyutu; watt kaybı, düşük akı-yoğunluğu geçirgenliği konuları önemlidir. Bununla beraber yüksek akış yoğunluğu geçirgenliği için kristalografik oryantasyon büyük bir kontrol unsurudur. Silisli çelikler demir gibi, {100}, küp-köşe yönünde kolaylıkla manyetize olurlar.

Önceden bahsedildiği gibi, saf demirdeki silisyum içeriği yaklaşık olarak $\%2^{1/2}$ 'yi aştığı zaman, demirin α 'dan γ 'ta allotropik dönüşümü engellenir. Dönüşümdeki bu aksaklık daha yüksek silisyum demir alaşımının ergime noktasına kadar tamamen ferritik yapıda olmasına neden olur. Bu davranış, son tavlama da ikincil yeniden kristalleşmenin önlenmesi için üreticiye bu şerit ürünlerin özel soğuk haddelene ve ısıtım işlem teknikleri uygulanmasına olanak verir. Bu işlemin sonuçları iyi gelişmiş bir kristalografik tekstürde {110} {001} haddelene yönüne paralel küp-köşe yönünde, küp-köşe oryantasyonunu gösterir. 1970'lerde {110} {001} kristalografik tekstürü kompozisyonun ve prosesin modifikasyonu ile geliştirildi. Geliştirilmiş yüksek geçirgenliğe sahip malzeme genellikle $\%2,9$ ile $\%3,2$ oranında Si içeriyordu. Geleneksel tane yönlenmiş çelik, $\%3,15$ Si'li çeliğin tane çapı yaklaşık olarak 3mm'dir. Yüksek geçirgenlik kabiliyeti olan silisli çeliklerin tane boyutu çapları yaklaşık olarak 8 mm ya da daha büyüktür. İdeal olarak, aşırı eddy akımı etkilerini en aza indirmek

için tane çapı 3mm'den az olmalıdır. Özel kaplamalar elektriksel yalıtımı sağlar ve çeliğin alt-yapısındaki çekme gerilmelerinin azaltılmasını sağlar.





3.1 Yönlendirilmiş Çelik Sacların Üretim Akış Şeması (Genç, 2007)

- a) Asitle temizleme b) İlk soğuk haddeleme c) Yeniden kristalleşme ve dekarbürizasyon
d) Soğuk haddeleme ve son inceltme e) MgO uygulaması f) Yüksek sıcaklıkta ısıtma işlemi
g) Yalıtım kaplaması ve ısıtma işlemi h) Bitirme, kesme, sarma i) Paketleme

3.1.2 Yönlendirilmemiş Çelikler

Elektriksel çeliklerin bu sınıfı malzemenin düzleminde her yöndeki manyetikliği aynı olan bir manyetik özellik gösterirler. Yönlendirilmemiş terimi bu malzemeleri kesin bir oryantasyon veya yöne bağlı manyetik özellikleri yaratan proseslerle üretilmiş malzemelerden ayırır. Bu tür çelikler endüstriyel elektrik motorları ve jeneratörlerin çekirdeklerinin çok büyük bir kısmını oluşturan çeliklerdir.

Yönlendirilmemiş elektrik çeliklerinin, yönlendirilmiş elektrik çeliklerine göre güç kayıpları fazladır, manyetik geçirgenlikleri düşüktür ve daha ekonomiktirler.

Yönlendirilmemiş (izotropik) yassı haddelenmiş ürünler %0,5'ten 3,5'e kadar Si içerenler yarı mamul ve tam mamul şartlara uygundur. Tam mamul yönlendirilmemiş silisli çeliklerin büyük bir çoğunluğu ya tam genişlikte (8602'den 1230 mm'ye) ya da bazıları makaslanmış biçimde kesilerek satılırlar. Tam mamul elektriksel çelikler tabaka kümelerindeki eddy akımlarını azaltmak için tavlandıktan sonra organik veya inorganik malzemelerle kaplanır.

Yarı mamul seviye; yarı mamullerin karbon seviyesi genel olarak düşüktür genellikle 0,30'un altındadır. Buna rağmen, yarı mamul ürün genel olarak yeterli derecede dekarburize edilemez. Bu yüzden potansiyel manyetik kaliteyi geliştirmek ve manyetik yaşlanmadan kaçınmak için dekarburizasyon ve tavlama kullanıcı tarafından yapılmalıdır. Bu tür tavlamalar genellikle 790 ile 940⁰ C sıcaklıkları arasında uygun bir dekarburizasyon atmosferinde yaklaşık 1 saat süreyle yapılır. Metaldeki aşırı oksitlenmeyi önleyip dekarburizasyonu teşvik etmek için dekarburizasyon atmosferi yeterli seviyede nem içermelidir.

Yarı mamul ürünler genellikle yüzey yalıtımı kaplaması yapılmadan veya sadece ince sıkı bir yapışkan oksitle yalıtma direnci sağlarlar. Tam mamul seviyedekiler karbonu azaltmak için yaklaşık 825⁰C'de nemli hidrojen ortamında üretici tarafından tavllanır. Üretici tarafından yapılan son tavlama işlemi, yüksek bir sıcaklıkta (1100⁰C'den yukarıda sürekli şeritler için) tane büyümesinin engellenmesi ve manyetik özelliklerin geliştirilmesi için yapılır. Arzu edilen manyetik özellikler böylece üretim sırasında elde edilir ve genellikle alıcı tarafından ek ısıtma işlemlere gerek kalmaz. Bu ürünlerin öncelikli amacı ticari güç frekansı (50-60 Hz) uygulamalarında, belirli bir akımda maksimum watt kaybı sınırları (tipik olarak 1,5T) için satılır (Altun,2007).

Tipik taneleri yönlendirilmemiş elektriksel çeliklerin üretim prosesi, sıvı metal üretimi sürekli veya slab döküm sıcak ve soğuk haddeleme proseslerini içerir. Sıvı metal üretimi sırasında silisyum oranı %0'dır. Si ve Al deoksidasyon sırasında eklenir. Aynı zamanda termomekanik proses genellikle tane boyutu ve kristalografik tekstürü geliştirir.

Bu gelişim sırasında sıcak bant yönlenmesi, soğuk haddeleme redüksiyonu ve tane büyütme işlemi önemli rol oynar. Geçirgenlik ve watt kaybı gibi manyetik özellikler, bu metalurjik faktörlere bağlı olarak incelenir. Bu faktörler, Si çeliği tane boyutu ve kristolografik yönlenmedir (Chaudhury, 2007).

3.1.3 Düşük Silisyumlu Çelikler

Yaklaşık olarak % 0.5 – 1.5 Si içerirler. Bu tür çelikler genellikle elektrik bobinlerinde ve motorların sabit gövdelerinde kullanılırlar. Yüksek hassasiyet ve mekanik mukavemet istenen büyük makinelerin manyetik kutupları bu saclardan üretilir. Bu tip saclar sadece doğru akımda kullanıldığı için çekirdek kaybı önemli değildir.

Armatür sacları takriben %0.5 – 0.6 Si içerirler. Bu saclar geçirgenlik istenen, çekirdek kayıplarının pek önemli olmadığı yerlerde, küçük motorlarda ve dinamolarda kullanılırlar. Yumuşak ve haddeleme özelliği iyi olan malzemelerdir. (Genç, 2007)

3.1.4 Orta Silisyumlu Çelikler

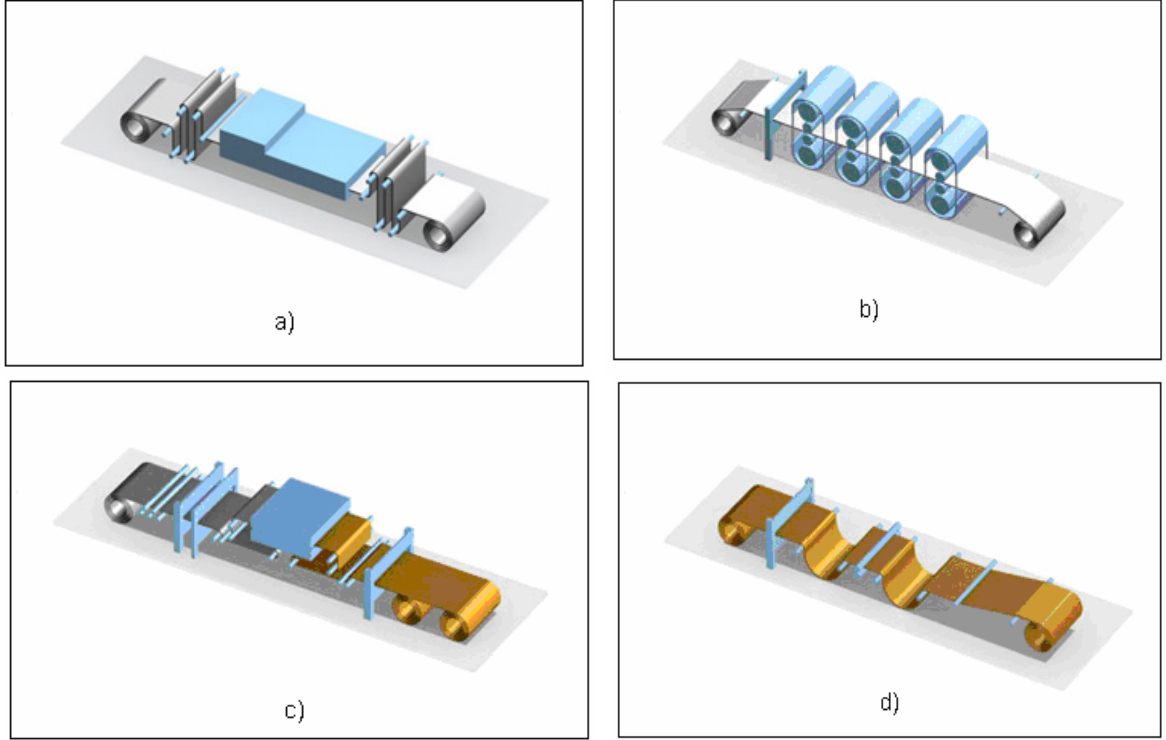
Yaklaşık olarak %2.5 – 3.5 Si içerirler. Bu tip çelikler ortalama yüksek verim jeneratör ve motorlarında, orta büyüklükte aralı hizmet transformatörlerinde, reaktörlerde ve motorlarda kullanılırlar.

Motor saclarının silisyum içeriği %2.75'tir. Çekirdek kaybı az, haddeleme özelliği iyi ve düşük akı yoğunluklarında geçirgenlikleri yüksektir. Yüksek verimli motor, jeneratör, küçük ve orta boy transformatör, elektrik motoru yapımında ve genel olarak düşük çekirdek kaybı istenen yerlerde kullanılır. (Genç,2007)

3.1.5 Yüksek Silisyumlu Çelikler

Bu tür çeliklerde Si içeriği %3.75 – 7 arasındadır. Güç transformatörlerinde, yüksek verim motorlarında, jeneratörlerde ve haberleşme aletlerinde kullanılırlar.

Transformatör saclarının haddeleme özelliği iyi, manyetik özellikleri zamanla değişmezdir. Silisyum oranı ile çekirdek kaybı ve sünekliği değişir. Bu oran azalırken çekirdek kaybı ve sünekliği azalır, indüksiyon geçirgenliği ve elektrik direnci artar. ASTM sınıflandırmasına göre Transformer – 72 (%3.8 Si), 65 (%3.8Si), 52 (%4.50Si) sacları transformatör saclarıdır. (Genç, 2007)



3.2 Yönlendirilmemiş Çelik Sacların Üretim Akış Şeması (Genç, 2007)

- a)Asitle Temizleme b)Soğuk haddeleme c)Dekarbürizasyon ve yüzey temizleme
d)Bitirme,kesme ve sarma

Çizelge 3.1 Elektriksel çelik sac ve şeritlerin silisyum içerikleri, kütle yoğunlukları ve uygulamaları (Altun, 2007).

ASTM Tanımlaması	AISI	Nominal (Si+Al) İçeriği	Yoğunluk gr/cm ³	Özellikler ve uygulamalar
Laminasyon çelikler A726veyaA840			7,85	Yüksek manyetik doygunluk, manyetik özellikler garanti edilemez. Zaman zaman küçük motorlarda kullanılır.
Yönlenmemiş elektriksel çelikler A677 veya A677M(tam mamül) ve A683 veya A683M(yarı mamül)...	M-47	1,05	7,80	Sünek, iyi basma özellikleri, yüksek indüksiyonda iyi geçirgenlik. Küçük motorlarda, rölelerde
	M-45	1,85	7,75	İyi basma özellikleri, orta ve yüksek indüksiyonlarda iyi geçirgenlik, iyi watt kaybı. Küçük jeneratörlerde, yüksek verimli sürekli- döner makinelerde, ac ve dc.
	M-43	2,35	7,70	
	M-36	2,65	7,70	Düşük ve orta indüksiyonlarda iyi geçirgenlik, düşük watt kaybı. Yüksek reaktan çekirdeklerde, jeneratörlerde, yüksek verimli döner makinelerin statörlerinde.
	M-27	2,80	7,70	
	M-22	3,20	7,65	Düşük indüksiyonlarda mükemmel geçirgenlik, en düşük watt kaybı, küçük güç transformatörlerinde, yüksek verimle çalışan döner makinelerde
	M-19	3,30	7,65	
	M-15	3,50	7,65	

Yönlenmiş elektiriksel çelikler A876 ya da A876M	M-6	3,15	7,65	Taneleri yönlenmiş çelik yüksek yöne ait manyetik özellikleri, en düşük watt kaybı ve en yüksek geçirgenlik özellikleri akış yolu haddeleme yönüne paralel olduğunda geçerlidir. Kalın kalınlıklarda güç transformatörlerinde kullanılır, ince kalınlıklarda genellikle dağıtım transformatörlerinde kullanılır. Enerji tasarrufları daha düşük watt kaybıyla gelişir.
	M-5	3,15	7,65	
	M-4	3,15	7,65	
	M-3	3,15	7,65	
Yüksek geçirgenlikli yönlenmiş çelik Sadece ASTM A677		2,9-3,15	7,65	Yüksek indüksiyon işlemlerinde düşük watt kaybı

Yönlendirilmemiş Sİ-Fe plakaları dönen makinelerinde çoğunlukla çekirdek malzemesi olarak kullanılır. Dönen makinelerini küçültmek ve yüksek verimlilik sağlamak için çekirdek malzemelerinin geliştirilmesi gerekmektedir. Ancak; dönen makineler için bu durum yeterli değildir çünkü büyük tane boyutuna sahiptirler ve daha fazla eddy akım kaybı oluşur. Yönlendirilmemiş çelik çekirdek malzemesini geliştirmek için (100) kübik yapısı beklenmiştir.

Yönlendirilmemiş %3 Sİ-Fe plakaları birincil rekristalizasyon yapısı ve magnetik özelliklerdeki değişiklikler soğuk haddeleme metodu ile araştırılmış sonuçlara göre; (100)[001] kübik yapıyı soğuk haddeleme boyunca ara tavlama ortaya çıkarmanın oldukça avantajlı olduğu görülmüştür.

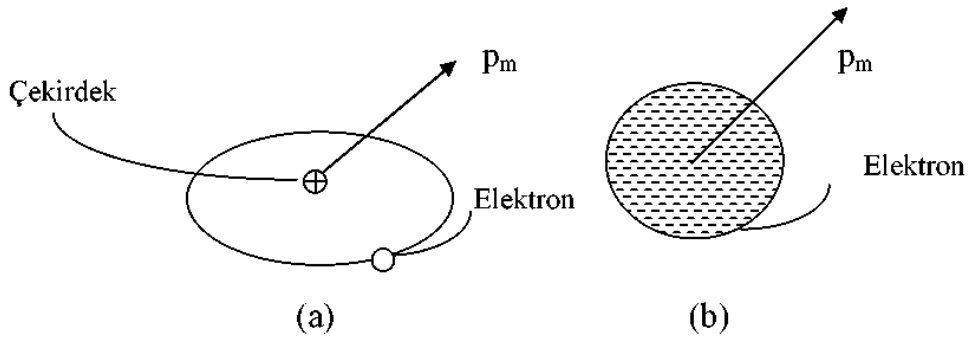
C numunesindeki (100)[001] birincil kübik yapıyı yükseltmek için en iyi tavlama sıcaklığının 900C° olduğu anlaşılmış, tavlama sıcaklığının artışı ile B8 numunesinin rekristalizasyon yapısında değişim olduğu gözlenmiştir (Huang, 2000)

3.2.1 Temel Bazı Tanımlar

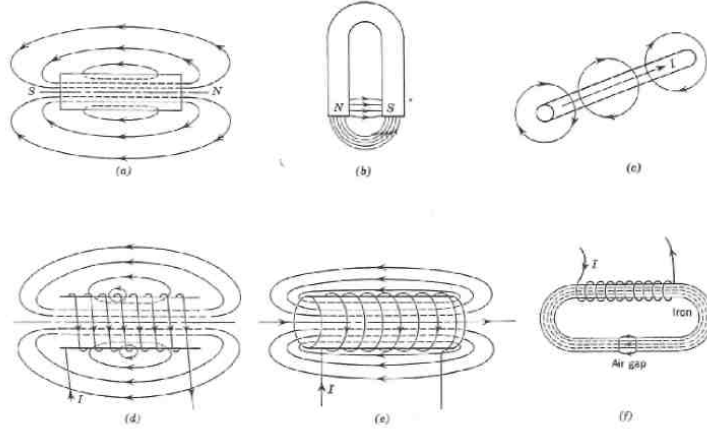
3.2.1.1 Magnetik Alan

Yukarıdaki ayrıtta da belirtildiği gibi elektromekanik sistemler, Faraday, Bio'Savart ve Amper yasaları üzerine kurulmuştur. Faraday yasasına göre, “ Bir magnetik alan içinde hareket eden ya da hareket etmeyen, ancak halkaladığı akısı zamanla değişen iletkenlerde bir gerilim meydana gelir”. Bio'Savart yasasına göre ise, “Bir magnetik alan içinde akım taşıyan iletkenlere bir kuvvet etki eder”. Bu iki yasa, elektromekanik enerji dönüşümü için bir magnetik alana gereksinim olduğunu ortaya koymaktadır (Tacer, 2005).

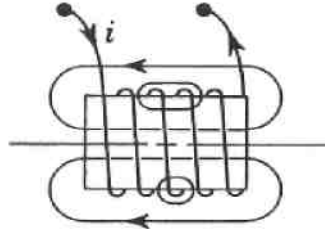
Magnetik alan, elektrik yüklerinin hareketi sonucunda ortaya çıkan bir etkidir. Bir maddenin en küçük parçası olan atomlarda negatif yüklü olan elektronlar, çekirdek etrafında yörüngesel bir hareket yaptıkları gibi, kendi eksenleri etrafında da bir dönme hareketi yaparlar (Şekil 3.1). Elektrik akımının yüklü parçacıkların hareketi sonucunda meydana gelmesi nedeniyle bu hareketlere, bir çeşit mikroskobik akımlar gözüyle bakılabileceği ve tabii ve yapay mıknatısların magnetik özellikler göstermesinde etkin oldukları ilk kez Ampere tarafından ileri sürülmüştür. Magnetik etkilerin, söz konusu bu mikroskobik akımlardan ileri geldiği savı, günümüzde de artık kesinlik kazanmıştır. Bu sava göre elektrik yüklü parçacıklar hareket halinde ise ortamda bir değişiklik meydana gelir. İşte akım taşıyan bir bobinin ya da bir mıknatısın bulunduğu ortamda magnetik kuvvet olarak ortaya çıkan bu değişiklik, magnetik alan olarak adlandırılır. Magnetik alan; doğrultusu, yönü ve şiddeti ile belirlenen vektörel bir büyüklüktür. Her hangi bir ortamdaki magnetik alan, kuvvet çizgileri ya da magnetik akı çizgileri ile gösterilir. Kuvvet çizgileri kapalı bir çevrim oluşturur. Şekil 3.2'de değişik yapıdaki mıknatıs ve akım taşıyan bobinlerde söz konusu olan magnetik alanın kuvvet çizgileri ile gösterimleri verilmiştir (Tacer, 2005).



Şekil 3.3 a) Bir elektronun yörüngesel hareketi b) Bir elektronun magnetik momenti



Şekil 3.4 Değişik mıknatıs ve akım taşıyan bobinlerde magnetik alan a) Çubuk mıknatıs b) At nalı mıknatıs c) Akım taşıyan bir iletken d) Hava çekirdekli selonoid e) Demir çekirdekli selonoid f) Hava ve demir çekirdekli(Tacer, 2005).



Şekil 3.5 Akım taşıyan bir bobinde kuvvet çizgileri(Tacer, 2005).

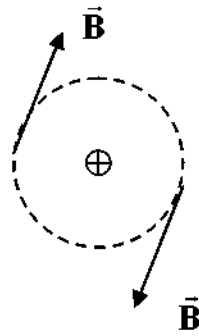
Şekil 3.4’de verilen çubuk ve at nalı mıknatıslardan da görüleceği üzere kuvvet çizgileri, N kutbundan çıkıp S kutbuna girerek mıknatıs içinden geçerek kapalı bir yol oluşturur. İletkenlerden oluşan bir bobin göz önüne alınır ve bu bobinden bir akım geçirilirse, yukarıda da belirtildiği gibi, bir magnetik alan meydana gelir. Bu alanın belirtilmesinde kullanılan kuvvet çizgileri, bobin eksenı yönünde olmak üzere bobinin bir tarafından girip diğer tarafından çıkarlar (Şekil 3.5). Mıknatıslarda olduğu gibi kuvvet çizgilerinin çıktığı bobin ucu N, çıktığı uç ise S kutbunu gösterir.

Magnetik alan oluşturulmasında üç değişik yol söz konusudur. Bunlar; elektrik akımı, daimi mıknatıslar ve elektrik alanının değişimidir. Bunlarla ilgili açıklamaları vermeden önce ilgili bazı kavramları açıklamak yerinde olacaktır (Tacer, 2005).

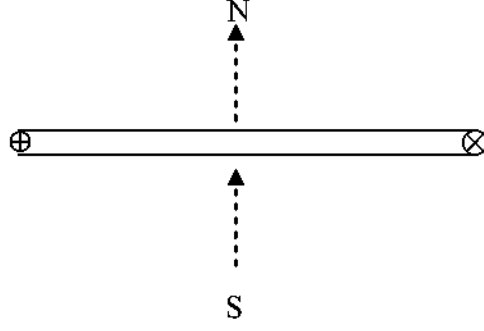
3.2.1.2 Magnetik Akı Yoğunluğu

Bir magnetik alan içinde birim yüzeyden geçen kuvvet çizgisi sayısı magnetik akı yoğunluğu ya da magnetik indüksiyon olarak adlandırılır. Magnetik akı yoğunluğu vektörü, her noktada kuvvet çizgilerinin teğetleri doğrultusundadır. Magnetik alanın yönünü de belirten magnetik akı yoğunluğu yönü, bir N - S mıknatısında N kutbundan S kutbuna doğrudur. Akım taşıyan bir iletkende ise, merkezi iletken üzerinde olan daireye teğet olup, yönü ise akım yönüne bağlıdır. Akım ve magnetik akı yoğunluğu vektörlerinin doğrultuları arasındaki ilişki, sağ el burğu kuralıyla belirlenir. Başparmak akım yönünü göstermek üzere diğer parmakların doğrultusu, alanın ya da magnetik akı yoğunluğu doğrultusunu gösterir. Bir iletkende akım içeri doğru ise “+” simgesi ile dışarı doğru ise “x” ile gösterildiğinde sağ el burğu kuralına göre içeri doğru olan bir akım tarafından oluşturulan magnetik alan yönü Şekil 3.4 'de gösterildiği gibi olur. B simgesi ile gösterilen magnetik akı yoğunluğu uluslararası birim sisteminde, $[\text{Wb/m}^2]$ simgesi ile gösterilen weber/m² ile ölçülür.

Bir düzlemde bulunan ve kapalı bir çevrim oluşturan bir iletken göz önüne alınır ve bir akım taşıdığı varsayılırsa söz konusu düzlemde akımın girdiği ve çıktığı uçlarda kuvvet çizgileri ile gösterilen bir magnetik alan meydana gelir (Şekil 3.5). Yukarıda verilen açıklamalara göre, akım ve magnetik akı yoğunluğu şekilde gösterildiği gibi olur. Diğer taraftan gene yukarıda belirtildiği üzere bir mıknatısta kuvvet çizgileri N kutbundan S kutbuna doğrudur. Bu nedenle Şekil 3.5’de verilen iletkenin üst kısmı N kutbu, alt kısmı ise S kutbu olur. Kutup deyimi bir noktayı göstermesine karşın burada N kutbu, kuvvet ya da indüksiyon çizgilerinin iletkenden ya da bobinden dışa doğru, S kutbu ise bobinden içeri doğrudur. Bunun yanında kuvvet çizgilerinin kapalı bir yol oluşturduğu kısımlarda magnetik alan kuvvetli, kapalı yol oluşturmadığı kısımlarda ise zayıftır (Tacer, 2005).



Şekil 3.6 Akım ve magnetik akı yoğunluğu arasındaki ilişki

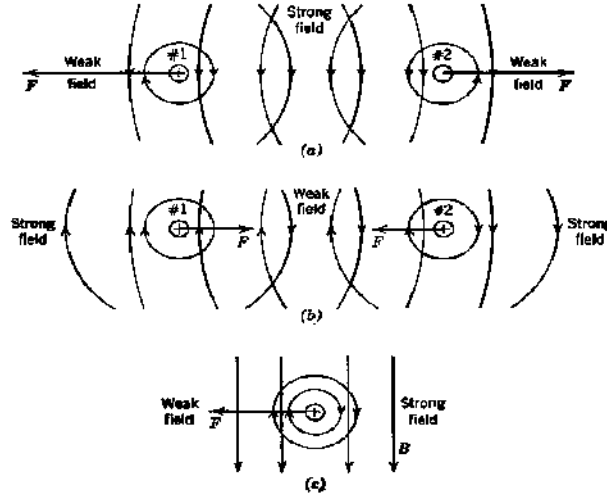


Şekil 3.7 Akım taşıyan bir çevrede kuvvet çizgileri(Tacer, 2005).

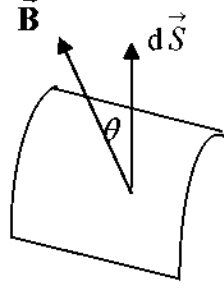
Şekil 3.7’de birbirine ters yönde akım taşıyan paralel iki iletken verilmiştir. Yukarıda tanımlanan burğu kuralına göre kuvvet çizgilerinin yönü şekilde gösterildiği gibi olacaktır. Kuvvet çizgilerinin yönleri, iletkenlerin arasında aynı olduğundan bileşke magnetik alan, bunların toplamı ile belirleneceğinden iletkenler arasında kuvvetli, dolayısı ile enerji iki iletken arasında toplanacak ve oluşacak tepki kuvveti iki iletkeni birbirinden ayırma özelliğinde olacaktır. Buna karşın iletkenlerin dış kısımlarında kuvvet çizgileri ters yönlü olduklarından bunların farkı ile belirlenecek magnetik alan zayıf olacaktır. Şekil 3.6 b’de bu kez iletkenler aynı yönde akım taşımaktadır. Bu nedenle iletkenler arasında magnetik alan zayıf, dolayısı ile oluşacak kuvvet iletkenleri birbirine doğru çekecek özellikte olacaktır. Buna karşın dış kısımlarda ise magnetik alan kuvvetli olacaktır. Şekil 3.6 c’de ise düzgün bir magnetik alan içinde akım taşıyan bir iletken verilmiştir. Magnetik alan ve akım sonucunda oluşan kuvvet çizgisi yönleri şeklin sağ tarafında aynı olduğundan bileşke alan kuvvetli, sol tarafta ise yönler ters olduğundan bileşke alan zayıf olacaktır Kuvvet, magnetik akı yoğunluğu yüksek olan kısımdan alçak olan kısma doğru olacaktır (Tacer, 2005).

3.2.1.3 Magnetik Akı

Yukarıdaki ayrıtta da belirtildiği gibi birim yüzeyden geçen kuvvet çizgisi sayısı magnetik akı yoğunluğu olarak tanımlanır. Bu tanımdan hareketle magnetik alanda alınan belli bir yüzeyden geçen kuvvet çizgisi sayısı, magnetik akı olarak adlandırılır. Φ simgesi ile gösterilen magnetik akı, uluslararası birim sisteminde [Wb] simgesi ile gösterilen weber ile ölçülür (Tacer, 2005).



Şekil 3.8 Akım taşıyan iletkenlerde magnetik alan(Tacer, 2005).



Şekil 3.9 Magnetik akı tanımı

Şekil 3.8’de verilen bir magnetik alan içindeki kapalı bir yol ya da akım taşıyan bir iletkençe oluşturulan bir çevrim için magnetik akı tanımı uygulandığında, genel olarak magnetik akı,

$$\Phi = \int_S \vec{B} d\vec{S} \quad (3.1)$$

yüzeysel integrali ile belirlenir. Bu eşitlikte dS alan içinde alınan küçük dS yüzeyinin normali olan vektörü, B ise söz konusu küçük dS yüzeyindeki magnetik akı yoğunluğunun genliği ve doğrultusunu gösteren bir vektördür. Şekil 3.10’da B ve dS vektörleri arasındaki açı θ ile gösterilmiştir. Bu iki vektör arasındaki açı π olduğunda, başka bir deyişle magnetik alan homojen olduğunda,

$$\Phi = BS \quad (3.2)$$

dolayısı ile,

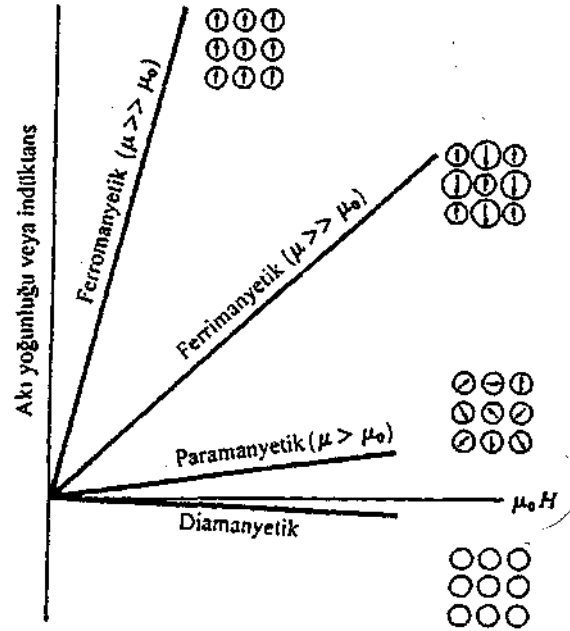
$$B = \frac{\Phi}{S} \quad (3.3)$$

Magnetik akı biriminin [Wb] , S yüzeyi biriminin m^2 olduğu göz önüne alınırsa, yukarıda belirtildiği gibi magnetik akı yoğunluğu B ’nin birimi [Wb / m^2] olur. Bu da magnetik akı yoğunluğunun, birim yüzeyden geçen kuvvet çizgisi sayısı olduğunu gösterir (Tacer, 2005).

3.2.1.4 Ferromagnetik Malzemeler

Faraday, yaptığı araştırmalar sonunda tüm maddelerin, magnetik alana bir tepki gösterdiğini ve bu tepki nedeniyle karşılıklı bir etkileşimin söz konusu olmasından dolayı maddelerin üç grupta toplanabildiğini göstermiştir (Altun, 2007).

1. Diamagnetik Maddeler: Bağıl magnetik geçirgenlikleri $\mu_r < 1$ olan bu tür maddeler, güçlü bir magnetik alana dik şekilde kendilerini yönlendirirler. Diamagnetizma, tek sayıda elektronlara sahip ve tamamlanmamış içi kabuğu olmayan maddelerde görünür. Radyum, potasyum, magnezyum, hidrojen, bakır, gümüş, altın ve su diamagnetik gruba girerler.



Şekil 3.10 Nüve malzemesinin akı yoğunluğu üzerine etkisi. (Altun, 2007)

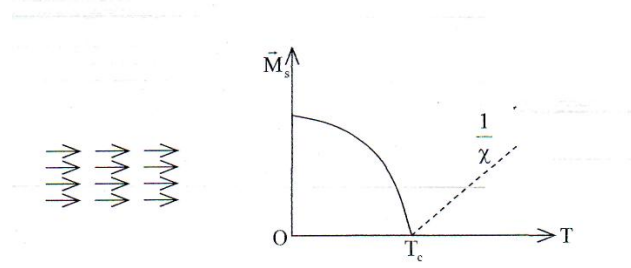
Diamanyetik malzemelerde manyetik moment üretilmez. Devamlı olarak güçlü momentler, aynı uygulanan alan için, paramanyetik, ferrimanyetik ve ferromanyetiklerde bulunur.

Herhangi bir atom üzerinde bir manyetik alan etkidiğinde yörünge elektronlarından dolayı manyetik momenti etkilemekle ve bütün atomlar için bir manyetik kutup çifti oluşur. Bu kutup çiftleri manyetik alana karşı koyarak manyetikliğin sıfırdan az olmasına neden olur. Bu davranış diamanyetizm olarak adlandırılır, nispeten yaklaşık 0,99995 geçirgenlik sağlar. Diamanyetik davranış, manyetik malzemeler ve cihazların uygulamaları için önemli değildir (Altun, 2007).

2. Paramagnetik Maddeler: Bağıl magnetik geçirgenlikleri $\mu_r > 1$ olan bu tür maddeler, güçlü bir magnetik alana paralel şekilde kendilerini yönlendirirler. Paramagnetizma çift sayıda elektronlara sahip maddelerde görülür. Hava, alüminyum ve silisyum paramagnetik gruba girer. Paramanyetik davranış, manyetik alan uygulandığında kutup çiftleri alanla hizaya gelerek pozitif bir manyetikleşmeye neden olur. Buna karşın, kutup çiftleri etkileşmediği için, kutup çiftlerini hizaya getirmek amacıyla oldukça büyük bir manyetik alan gereklidir. Paramanyetizm olarak adlandırılan bu etki sadece yüksek sıcaklıklarda etkilidir. Nispi geçirgenlik 0,01'den azdır (Altun, 2007).
3. Ferromagnetik Maddeler: Demir, nikel, kobalt ve alaşımlarını içeren maddeler bu gruba girer. Ferromanyetik davranış 3d seviyesindeki (demir, nikel ve kobalt) veya 4f seviyesindeki (gadolinyum) doldurulmamış enerji seviyelerinden dolayıdır. Ferromanyetik malzemelerde kalıcı çift olmayan kutup çiftleri uygulanan manyetik alanla kolayca hizaya gelir. Kutup çiftleri manyetik alanla kutup çiftlerinin tabi takviyesinden dolayı kolayca hizaya gelirler. Uygulanan alanın çok büyük bir büyüklüğü, yüksek bir nispi geçirgenlik sağlayan küçük manyetik alanlar için bile üretilir (Altun, 2007).

3.2.1.5 Ferromanyetizma

Ferromanyetizma durumunda spinler birbirine paralel olarak yönelmişlerdir. Böylece komşu spinler arasında kuvvetli bir pozitif etkileşme söz konusudur. Sıcaklık artarken, spin düzeni sıcaklıkla uyarılmaktadır. Böylece kendiliğinden olan mıknatıslanmanın sıcaklık bağımlılığı şeklindeki gibidir.



Şekil 3.11 Ferromanyetizma (Altun, 2007)

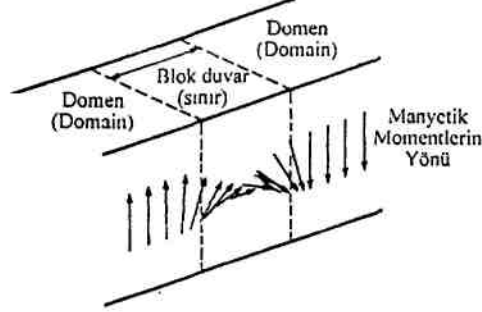
Mıknatıslanma sıcaklığın artmasıyla azalmaktadır ve belli bir sıcaklıkta değeri sıfır olur. Bu sıcaklığa Curie sıcaklığı (T_c) denir. Alan sürekli olarak değiştiğinde alana karşı manyetikleşme ilişkisi, bir histerisiz döngüsü ortaya çıkarır. Histerisiz döngüsü, değişen bir manyetik alanda manyetikleşmenin şiddetini ve yönünü tarif eder (Altun, 2007).

Bir manyetik alanda domenlerin yönlenmesi; bir manyetik alan malzemeye uygulandığında, alanla hali hazırda hizaya gelen domenler hizaya gelmemiş domenlerin uzantısında büyür. Blok duvarları hareket etmek zorundadır. Uygulanan manyetik alan duvarların göç etmesi için gerekli kuvveti sağlar. Alanın şiddeti yükseldiğinde uygun bir şekilde yönlenmiş domenler büyümeye devam eder ve büyük bir net manyetikleşme olur. Manyetikleşmenin doyuma ulaşması bütün domenler uygun bir şekilde yönlendiğinde oluşur. Malzemede büyük miktarda bir manyetikleşme elde edilebilir (Altun, 2007).

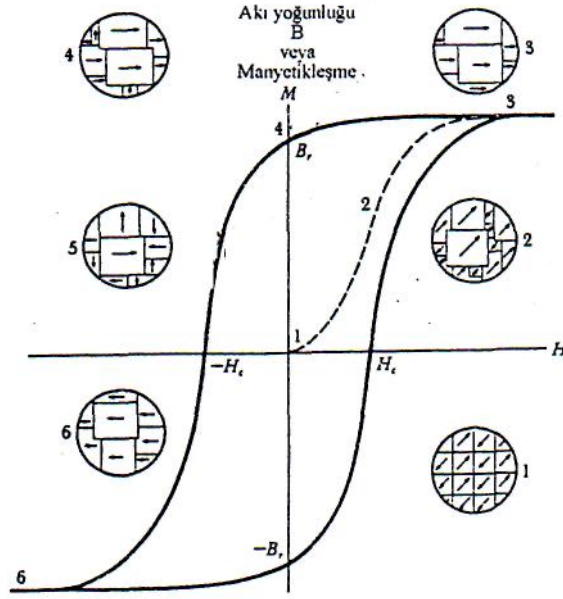
3.2.1.6 Domen (Bölge) Yapısı

Ferromanyetik malzemeler, komşu atomların kutup çiftleri arasında pozitif etkileşmelerinden dolayı manyetikleşme üzerine kuvvetli bir etkiye sahiptir. Ferromanyetik bir malzemenin tane yapısı içerisinde manyetik domenlerden oluşan bir alt yapı, dış alanın yokluğunda bile oluşur. Domenler bütün kutup çiftlerinin hizaya geldiği malzemedeki bölgelerdir. Manyetik alana maruz kalmamış bir malzemede bireysel domenler rasgele bir yönlenmeye sahiptir. Malzemedeki net manyetikleşme bütün olarak sıfırdır (Altun, 2007).

Blok duvarlar olarak adlandırılan sınırlar, tane sınırları gibi bireysel domenleri ayırır. Blok duvarları, manyetik moment yönünün yavaş yavaş ve sürekli olarak bir domenden diğerine değiştiği dar bölgelerdir (Altun, 2007).



Şekil 3.12 Bitişik atomlardaki manyetik momentler domenler arasındaki sınırlar boyunca sürekli olarak yön değiştirir (Altun, 2007).



Şekil 3.13 Ferromanyetik histerisiz döngüsü manyetik alanın indüktans veya manyetikleşme üzerine etkisini göstermektedir. Kutup çiftlerin hizaya gelmesi manyetikleşmenin doymasına neden olur (nokta 3), kalıcı nokta 4, zorlayıcı alan nokta (Altun, 2007).

Bir manyetik alanda domenlerin yönlenmesi; bir manyetik alan malzemeye uygulandığında, alanla hali hazırda hizaya gelen domenler hizaya gelmemiş domenlerin uzantısında büyür. Blok duvarları hareket etmek zorundadır. Uygulanan manyetik alan duvarların göç etmesi için gerekli kuvveti sağlar. Alanın şiddeti yükseldiğinde uygun bir şekilde yönlenmiş domenler büyümeye devam eder ve büyük bir net manyetikleşme olur. Manyetikleşmenin doyuma

ulaşması bütün domenler uygun bir şekilde yönlendiğinde oluşur. Malzemede büyük miktarda bir manyetikleşme elde edilebilir (Altun, 2007)

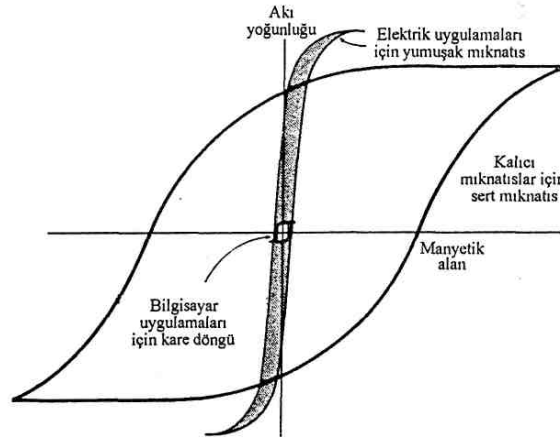
Alan uzaklaştırmasının etkisi; alan uzaklaştırıldığında domen duvarlarla oluşturulan direnç, domenlerin rastgele yönlenmelerde yeniden büyümesini önler. Sonuç olarak domenlerin çoğu orijinal alan yönüne yakın yönlenmiş kalır ve kalıcı olarak bilinen bir kalıntı manyetikleşme malzemelerde vardır. Malzeme kalıcı bir mıknatıs olarak davranır.

Bir alanı değiştirme etkisi; ters yönde bir alan uygulanırsa domenler zıt yönde hizaya gelerek büyür. Bir zorlayıcı alan H rastgele yönlenmiş domenleri zorlama ve birbirlerine etkilerini yok etmek için gereklidir. Alanın dayanımında daha da sonunda zıt yönde doyum için domenleri hizaya getirir.

Alan sürekli olarak değiştiğinde alana karşı manyetikleşme ilişkisi bir histerisiz döngüsü ortaya çıkarır. Histerisiz döngüsü değişen bir manyetik alanda manyetikleşmenin şiddetini ve yönünü tarif eder (Altun, 2007).

3.2.1.7 Manyetikleşme-Alan Eğrisinin Uygulanması

Bir manyetik alanda malzeme davranışı histerisiz döngüsünün boyut ve şekli ile ilgilidir. Manyetik malzemeler için üç uygulamaya bakalım (Altun, 2007).



Şekil 3.14 Ferromanyetik malzemelerin üç uygulaması için histerisiz döngüsünün kıyaslanması elektrik uygulamaları, bilgisayar uygulamaları ve kalıcı mıknatıslar (Altun, 2007).

Elektrik uygulamaları için manyetik malzemeler; ferromanyetik malzemeler, bir elektrik akımı malzemeyi geçtiğinde oluşan manyetik alanın büyütülmesi için kullanılır. Daha sonra manyetik alanın çalışması beklenir. Uygulamaları elektromıknatıslar için nüveleri, elektrik motorlarını, transformatörleri, jeneratörleri ve diğer elektriksel ekipmanları içerir. Bu cihazlar,

nüve malzemenin histerisiz döngüsünü sürekli olarak devretmesi için alan değişimini faydalı hale getirir (Altun, 2007).

Yumuşak mıknatıslar olarak adlandırılan elektriksel manyetik malzemeler aşağıdaki özelliklere sahip olmalıdır (Altun, 2007).

1. Yüksek bir manyetik doyum malzemenin daha çok iş yapmasına izin verir. Yüksek manyetik geçirgenliğe sahip bir malzeme seçilirse manyetikleşmenin yüksek bir değeri elde edilir.
2. Domenler, zorlayıcı alan çok küçükse uygulanan en küçük alanla yeniden yönlenebilir.
3. Küçük bir histerisiz döngüsü, bir malzeme değişen bir alana doğru devir yaparsa küçük bir enerji kaybı verir.
4. Küçük bir kalıcılık istenir. Yeniden kullanım için bir yük vagonundan bir çelik fabrikasına hurda çelik transferi için kullanılan bir elektromıknatısta kalıcılık büyükse, uygulanan alan kaldırıldığında hurda bırakılamaz.
5. Kutup çiftleri, malzemenin çalıştığı frekansta kolaylıkla yeniden hizaya gelmelidir. Frekans çok yüksekse domenler her devirde yeniden hizaya gelemes daha sonra cihaz, kutup çifti sürtünmesinden dolayı dielektrik malzemelerdeki gibi ısınabilir.
6. Özdirenç çok küçükse akım eddy akımlarında olduğu gibi alandan sızabilir ve tekrar cihazın ısınmasına neden olabilir. Tipik yumuşak manyetik malzemeler tabloda gösterilmiştir.

Çizelge 3.2 Bazı yumuşak elektriksel malzemelerin özellikleri(Tacer, 2005).

	Maksimum	Doyum	Zorlayıcı
	Nispi	Manyetikleşmesi	Alan
Malzeme	Geçirgenlik	(tesla)	(A m ⁻¹)
% 99.91 saf demir	5,000	2,15	79.58
% 99.95 saf demir	180,000	2.15	3.98
%3 Fe Si (yönlenmiş)	30,000	2.00	11.93
%4 % Si (yönlenmemiş)	7.000	1.97	39.79
4S çok alaşımlı			
(%54.7 Fe %45 Ni %0.3 Mn)	25,000	1.60	23.87
Süper alaşımlı (%79 Ni, Fe, %5 Mo, %0.3 Mn)	800.000	0.80	159.16
A6 Feroksküb (Mn,Zn) Fe ₂ O ₄		0.40	
B2 Feroksküb (Ni.Zn) Fe ₂ O ₄		0.30	

Demir nikel kobalt kolaylıkla manyetikleşirler (mıknatıslanırlar) ve kalıcı mıknatıslar olarak hizmet verirler. Buna karşın domenler bu saf metallerde kolaylıkla yönlenirler ve B,H ürünleri daha karmaşık alaşımlara göre küçüktür. Manyetik özelliklerde bazı iyileşmeler mikro yapı içerisine hatalar katmakla kazanılır (Altun, 2007).

Sadece demir, nikel ve kobalttan oluşan küçük bir saf elementler grubunda, aynı sıradaki momentler normal ısıda ferromanyetizma meydana getirir. Bununla beraber, normal ısının biraz altında bu elementlerdeki ferromagnetizma etkilenmez. Isı sonucunda oluşan kuvvetler, tamamen komşu atomlarda magnetik moment oluşturan elektronlar arasındaki mesafeye bağlıdır. Mesafenin belli bir değerinde ferromanyetik olan malzeme, bu değer in altında magnetik olmayan malzeme durumuna geçer. Antiferromanyetik malzemelerde bu mesafe, magnetik olmayan malzemelerin alaşımıyla büyütülebilir. Böylece antiferromanyetik malzemed en, ferromanyetik alaşım meydana getirilebilir (Altun, 2007).

3.3 Elektriksel Bir Makine İçin İdeal Çelik

Elektrikli makine tasarımcılarının ortak görüşünden; elektriksel bir makine için kullanılacak olan ideal çelik, düşük bir kayıba sahip olmalı yüksek geçirgenlik ve yüksek iletkenliğe sahip olmalıdır. Ne yazık ki silisyumun elektriksel çeliklerde ana alaşım elementi olarak kullanılması kayıpları azaltıp, geçirgenlik ve iletkenliği arttırsa da üretim maliyetini arttırıyor.

Elektriksel çelik üreticilerinin, farklı kayıp ve geçirgenlik özelliklerine sahip farklı tip ve kalitelerde çelik üretebilmek için hem çeliğin kimyasal bileşimi hem de üretim yöntemiyle ilgili kabul edilebilir fiyatlarda uzlaşmaya varmaları gereklidir.

Son yıllarda düşük kayıpları geliştirebilmek için çok düşük karbonlu çelikler üretebilmek için ve çok düşük sülfür içeriklerine ulaşabilmek için araştırmalar yapılıyor. (Altun, 2007)

3.4 Kayıpları Etkileyen Üretim Prosesleri

Çoğu çelik üretim prosesinin çelik kayıpları üzerinde bazı etkileri vardır, fakat alaşımlama dışında en önemli olanları;

1. Tavlama
2. Yüzey kaplama veya indükleme
3. Tabaka kalınlıkları

3.4.1 Tavlama

Elektriksel çelik üreticileri haddeme proseslerini iyi yönde manyetik özelliklere sahip malzeme üretebilmek için ve üretilen çelik tipi için gereken özellikleri sağlayabilmek için organize ederler. Yine de eğer bu malzemelerin üreticisi zarar verebilecek olan faktörlerin kontrolünün yapılmasını kanıksamamışsa, bu malzemelerden optimum düzeyde özellikler beklenemez. Bu zararlı faktörler, malzemenin işlenmesiyle oluşan gerilimler, çatlak(ilerleyen) distorsiyon(slitter distortion), bası distorsiyonu(punching distortion), kenar, köşe çapakları, tabakaların tavlama sırasında tamamlanmamış karbonsuzlaşma, aşırı oksitlenme bunlardan bazılarının isimleridir. Şunu bilmek önemlidir ki en iyi manyetik kalite çekirdeklerin veya tabakaların uygun ve hakkını verecek şekilde tavlama ile mümkündür. Bu da gerilim içermeyen iyi bir şekilde dekarbürize edilmiş ve aşırı derecede oksitlenmemiş bir yapıyı anlatır. Tabakaların toplu halde de gerilim içermemesi gereklidir. Müşterinin yapacağı tavlama ile genellikle iki geniş sınıfa ayırmak mümkündür. Bir gerilim giderme tavlama tam mamül seviyesinde manyetik özelliklerin kazanımı için normal olarak kullanılan bir ısıt

işlemdir. Bir ‘kalite değerlendirme tavlaması’ sadece tabakalarda meydana gelen gerilimi gidermekle kalmaz aynı zamanda karbonsuzlaştırır ve tane büyümesine de katkıda bulunur.

Çizelge 3.3 Elektriksel çelikler için tavlama tipleri ve amaçları(Altun, 2007)

Çelik tipleri	Tavlama Tipi	Tavlamanın öncelikli Amacı
Tane yönlendirilmiş	Gerilim giderme	Gerilimin giderilmesi işleme, sıyırma, şekil verme veya basma sırasında gelişen gerilimlerin giderilmesidir. Yönlendirilmiş çelik manyetik kaliteye zarar verecek olan oksitleyici ve karbürleyici ortamlardan dikkatlice korunmalıdır. Manyetik özelliklerin kazanımı sağlanır.
Yönlendirilmemiş tam mamül	Gerilim giderme	Merdaneler ve yıpratıcı operasyonlarla gelen gerilimlerin giderilmesidir. Manyetik özelliklerin kazanımı. Karbonu azaltmak için yaklaşık 825 ⁰ C’de nemli hidrojen ortamda yapılır.
Yönlendirilmemiş yarı mamül ve Yönlendirilmemiş ve Zor parçalar	Kalite Değerlendirme	Manyetik kalite ve tane büyümesinin engellenmesi. Yüzeyde ayırıcı bir oksit tabakası şekillenmesi Gerilim giderme+karbonsuzlaştırma+ tane büyümesinin önlenmesi etkisi yapar.

Hem gerilim giderme hem de kalite değerlendirme tavlaması çoğunlukla sürekli metodlarla yapılır. Sürekli tavlama fırınları yüksek hacimdeki üretilere uygun dizayn edilmiş ve uygun kontrollü gaz atmosferi sağlanarak çelik oksidasyondan korunur ve manyetik özellikler geliştirilir. Sürekli fırınlar genellikle aşağıdaki kısımlardan oluşur.

1. Yağlayıcıların yandığı kısım
2. Dekarbürizasyon ve tane büyümesi için yüksek ısı zonları ve
3. Soğutma kısımları aynı zamanda yalıtıcı yüzey oksidi oluşumu için hazırlık (Altun, 2007)

3.4.2 Çekirdek Hücre Malzemelerin Yüzey Yalıtımı

Eddy akımları kayıplarının sınırlaması, uygun dirençli elektrikli çeliklerle, uygun veriler, yeterli derecede ince tabakalar ve tabakaların etkili elektriksel yalıtımını gerektirir. Eddy akımları tabakaların sadece birinin içinden geçmez, bir hücre gibi bütün çekirdeğin içinden geçerek, tabaka yüzeylerinden bir taraftan diğer bir tarafa akıp gidecektir. Manyetik bir hücreyi basitçe lamine ederken, eğer tabakaların yüzeyi uygun bir şekilde yalıtılmadıysa ve pürüzler, çapaklar çok küçük değilse manyetik hücre bütün hücreyi sirküle ederek gelen fazla akımı engelleyemez.

Tabaka yüzey yalıtımı direnci, tabakalar arası güç kaybı, toplam güç kaybının genellikle %1-2'si gibi küçük bir oranına düşürüldüğünde oldukça uygun olarak düşünülebilir. Ne kadar büyüklükteki yalıtım uygun ve hangi yüzey yalıtımı daha uygun gibi sorular bazı kompleks sorulardır. Bu soruların cevabı ise aparatın sadece arzu edilen verimliliğine bağlı değil aynı zamanda bir çok dizayn ve üretim faktörlerine bağlı olup bunların her biri tabakalar arası güç kaybının büyüklüğünü de etkilemektedir. Çok küçük beygirli motorlar gibi küçük elektrikli aletler yüzey yalıtımı gerektirmeyebilir bundan ötesi çelik yapımında veya gerilim giderme tavlamasında doğal oksit filmi üretmeleri sağlanabilir. Fakat yalıtıma başka nedenlerden dolayı da ihtiyaç duyulabilir, örneğin korozyon ortamına maruz kalan aletlerin hücrelerine, oksit filmin bozulmasını ya da bundan kaynaklanan düşük direnci önlemek için yalıtıcı kaplama yapılabilir.

Yalıtıcı kaplamalar birinci alternatif olarak çeliğin zımbalanabilirliğini (preslenebilirliğini) arttırdığı için kullanılırlar ve kullanım gerekçeleri doğrudur çünkü onlar kalıp ömrünü uzatır ve zımbalama maliyetini düşürürler. Yarı mamül yönlenmemiş elektriksel çeliklerde tabaka yapışmalarını azalttığından yapışmayan kaplamalar kullanılabilir. Kaplamalardaki yenilikler ve gelişmeler sıradan yapışmayan kaplamalara göre daha yüksek sıcaklıklarda tavlama yapılmasına olanak verir, bu da manyetik kaliteyi geliştirip, üretkenliğin artmasıyla sonuçlanır.

Tabakalarda kullanılan kaplamanın tipi önemlidir çünkü farklı kaplamaların ısı işleme olan dirençleri de farklıdır. Örneğin; kaplamanın erkenden bitmesi, yüzeyden gitmesi v.b.

Çizelge 3.4 Silisli çeliklere uygulanan izolasyon tipleri (Altun, 2007)

TİP	TANIMLAMA
C-O	Bu tanımlama sadece yassı haddelenmiş silisli çeliğin yüzeyinde oluşan doğal oksit yüzeyidir. Genellikle küçük hücrelerde ve gerilim giderme tavlaması sıcaklıklarına dayanır ve ince fakat etkili tabaka yalıtımı sağlar
C-2	Bu tanımlama inorganik bir yalıtımı anlatan, tane-yönlenmiş silisli çeliğin yüksek sıcaklıkta hidrojen tavlaması sırasında, çeliğin yüzeyine uygulanmış MgO ve silikat kaplaması reaksiyonunun bir sonucu olarak oluşan camsı filmdir. Bu yalıtım havada-soğutulmuş veya yağa daldırılmış hücreler içindir. Normal gerilim giderme tavlaması sıcaklıklarına dayanacak, transformatör hücrelerinin dağılımında kullanıldığı gibi yeterli tabakalar arası dirence de sahiptir. Kaplamanın aşındırıcı doğasından dolayı ezilmiş, basılmış, kalıplanmış tabakalara uygun değildir.
C-3	Bu yalıtım vernikli kaplamaları içerdiğinden havada soğutulmuş veya yağa daldırılmış hücreler içindir. Tabakalar arası direnç bu kaplama sayesinde sağlanır ve kalıp yağlayıcısı olarak kullanılan C-1 kaplamasından daha üstündür. C-3 kaplaması bir de preslenebilirliği artırır. Normal işlem sıcaklıklarına dayanır fakat gerilim giderme tavlaması sıcaklıklarına dayanamaz.
C-4	Orta derecede yalıtım direnci gerektiren havada soğutulmuş veya yağa daldırılmış hücreler içindir. Bu kaplama kimyasal muamele edilmiş veya fosfatlanmış yüzeyden oluşur. Gerilim giderme tavlaması sıcaklıklarına kadar dayanıklıdır ve preslenebilirliği artırır.
C-5	Bu yalıtım C-4 ile aynı ve inorganiktir fakat tabakalar arası direnci arttırmak için buna seramik dolgular eklenmiştir. Genellikle taneleri yönlemiş silisli çeliklerde C-2 kaplamasının üzerine uygulanır. Havada soğutulmuş veya yağa daldırılmış hücreleri ve yüksek voltajlarda dönen

	kesilmiş tabakalarda kullanılır. Aynı zamanda yüksek seviyede tabakalar arası direnç gerektiren durumlarda da uygulama imkanı bulur. C-2 gibi . nötr veya hassas redükleyici atmosferde gerilim giderme tavlaması sıcaklıklarına kadar dayanıklıdır.
--	--

Not: Isı, kaynak ve pres döküm gibi uygulamaları içeren üretim süreçlerinde, bırakılabilindiği kadar az kalıntı bırakabilmek için normal kaplamadan daha ince bir kaplama kullanılması istenebilir. Bu kaplamalar preslenebilirliği artırır ve üretici doğru kalınlığı kullandığından emin olmalıdır. * C-3 genel olarak C-1'in yerini aldığından bu tablodan kaldırılmıştır.

3.4.3 Tabaka Kalınlıkları

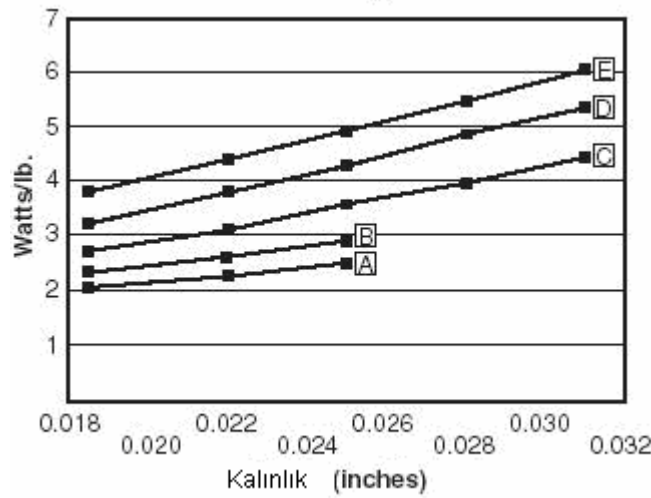
Eddy akımı kayıpları lineer olarak tabaka kalınlığını arttırlar. Hatta belirli bir çelik için kayıp 2 ise kalınlık da 2 artar denilir, fakat bu basit bir indirgemedir. Şekil eddy akımı kayıplarının çeşitli kalınlıklardaki tabakaların kalınlıklarına etkileri gösterilmiştir. Teoride, değerleri verilmiş bir çelik için indüklenmiş voltaj, kesit alan oranı arttıkça artar. Teorik olarak, tabakalar inceldikçe özellikler de iyi yönde gelişir. Pratikte ne de olsa daha ince tabakalar hem çelik üreticisi hem de motor üreticisi için pahalıya mal olmaktadır. 0.5 mm'den ince tabakaların işlenmesi zor ve tabakalaşma ve çekirdek hücre üretimi sırasında zarar görmeye meyillidir. Bu nedenle endüstriyel motorları çok azı bundan daha ince tabakalara sahiptir buna rağmen daha ince tabakalar yüksek sıklıkta ve başka özel amaçlı makineler için de kullanılır.

Tamircilerin parmak bastıkları nokta, tabakalar inceldikçe, eski izleri silmek için daha çok çaba ve dikkat gerekiyor. Bu kaplamasız (finger plate), üretilen hücreler için kısmen doğru bir saptamadır.

ABD'de ki motorlarda tipik olarak 0,47–0,64 mm arasında ki tabaka kalınlıkları kullanılır, fakat bu bir üreticiden diğerine göre değişir. Avrupa'da en çok bilinen tabaka kalınlığı hem küçük hem de büyük beygirli motorlarda 0,5 mm ve 0,65 mm'dir.

Çeliğin kalınlığını değiştirmek motor üreticisi için büyük bir masraftır. Zimba kalıpları belli bir tabaka kalınlığına göre ayarlanmıştır bundan dolayı eğer tabaka kalınlığı değişirse bunlar da yer değiştirmelidir. Zimba kalıplarının kullanımı malzeme kalınlığı belirlenmesinde etkin kılınırsa, bu çapak boyunu kötü bir şekilde etkileyecek ve kalıpların zımbalama sırasında yapışmasına veya kırılmasına neden olabilecektir. Bu yüzden çoğu motor veya tabaka üreticisi herhangi bir özel tabaka çapında ve tek bir tabaka kalınlığında standardize olurlar.

Şekilde eddy akımı kayıplarının çeşitli kalınlıklardaki tabakaların kalınlıklarına etkileri gösterilmiştir. (Altun, 2007)



Şekil 3.15 Eddy akımı kayıplarının çeşitli kalınlıklardaki tabakaların kalınlıklarına etkileri gösterilmiştir. (Altun, 2007)

3.5 Silisli Saclar ve Özellikleri

Sac, levha haline getirilmiş metal özellikle demir malzemedir. Kalın levhaların silindirler arasından geçirilmesiyle yani haddelemeyle elde edilirler. Sıcak olarak yapılan ilk haddelemeden sonra düzgün bir yüzey elde edebilmek için soğuk haddeleme yapılır. Değişik kalınlıkta olan bu saclar, belirli standart ölçüler dahilinde veya şeritler halinde kesilir.

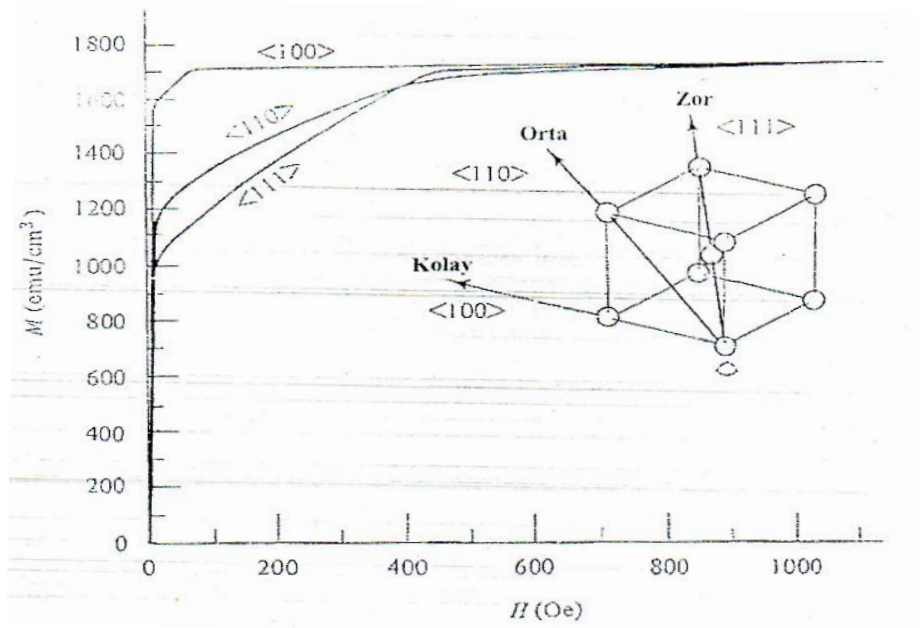
Çeşitli tekerlekli vasıtaların kapakları, gemi gövdeleri ve pek çok teknolojik uygulama sahası yanında sacların en önemli kullanıma alanlarından biri de elektrik araçlarıdır. Elektrik motorlarının rotor, stator sargılarının ve transformatör sargılarının çekirdeğini silisyumlu sac demetleri teşkil eder. Silisli sacların en önemli özelliği, taşıdığı silisyum sayesinde manyetik kayıpları minimuma indirmesi ve neticede verimi arttırmasıdır. Ayrıca demire katılan bu silis, demirin manyetik özelliklerinde zamanla meydana gelebilecek değişiklikleri azaltarak, demiri daha kararlı hale getirir. Haddeleme sırasında sac kristallerinin belirli bir doğrultuda yönelmesi sacın manyetik özellikler bakımından kalitesinin artmasına ve belirli bir manyetik devre için daha az saca ihtiyaç göstermesine sebep olur.

3.5.1 “ Si ” Elementinin Çeliğe Etkileri

Yassı-düz haddelenmiş elektriksel çelikler özel kimyasal kompozisyonlardan çok manyetik özellik ihtiyaçlarını karşılamak amacıyla üretilmişlerdir. Manyetik özellik en önemli parametredir ve kimyasal kompozisyona bağlı olduğu kadar üretim yöntemine de bağlıdır. Silisyum elektriksel çelikler için en önemli alaşım elementidir. İlave edilir çünkü çeliğin öz direncini artırır ve bu yolla çekirdek (iron) kaybının bir bileşeni olan eddy akımı kaybını azaltır. Silisyum, çeliğin tane yapısını etkiler ve böylece yönlenmemiş elektriksel çeliklerde bir şekilde histerisiz bileşenini azaltarak çekirdek(iron) kaybını azaltır. Ürün tipine bağlı olarak elektriksel çeliğe ilave edilen diğer elementler alüminyum ve mangandır. Bunların her biri öz direnç gibi herhangi bir fiziksel etkiden çok metalurjik etkileri açısından eklenirler. Bu alaşım elementlerinden her biri çeliğin tane yapısını iyi bir şekilde etkiler, böylece çekirdek kaybının bir bileşeni olan histerisizi düşürmeye yardımcı olur. Diğer elementler elektriksel çeliklerde mevcuttur fakat bunlar sadece artık formda bulunan empüriteler şeklindedir. Karbon ergitmeden son ürüne kadar miktarı değişen tek elementtir. Haddelme prosesi sırasında özel ısı işlemler tam mamulün karbon içeriğini çok düşük değerlere düşürür. Karbon müşteri tarafından tavlama işlemi sırasında yarı-mamül seviyesinde yapıdan ayrılır(örneğin; motor üreticisi) . Eğer taneleri yönlemiş bir çelik varsa üreticide, kükürt ve nitrojen gibi empüriteler son kristal oryantasyonu geliştirmeye yardımcı olmaları açısından başlangıç aşamasında istenirler fakat son tavlamada yapıdan kaldırılırlar.

Yassı haddelenmiş silisli-demir saclar ve çubuklar düşük orandan kükürt içerirler, genel olarak %0,025 daha iyi kalitelere %0,01'dir. Mangan miktarı yaklaşık %0,70 'e kadar çıkabilir. Krom, molibden, nikel, bakır ve fosfor gibi artık elementler de kalabilir. Silisyumdan sonra en büyük alaşımlama katkısı %0,6'ya kadar Al (opsiyonel) (Altun,2007)

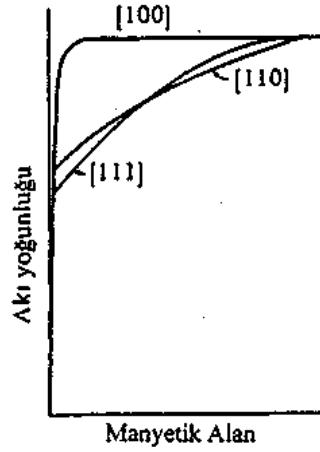
Geçirgenlikteki artış watt kaybındaki düşüş Si yüzdesi ile ayarlanır. Si içeriğindeki artışın direnci arttırması ve uygun bir şekilde watt kaybını düşürmesi istenir. Fakat; Si içeriği arttığında manyetik indüksiyon azalır ve geçirgenlikte bir düşüş oluşur. Düşük “Si” konsantrasyonları, metalurjik faktörler açısından incelendiğinde manyetik özellikleri kötü etkiler. Bu durum oksijen içeriği veya deoksidasyon ile ilgili bir şüphe yaratmıştır. Düşük “Si” konsantrasyonlarında çözülmüş oksijen konsantrasyonu tam olarak kontrol edilememektedir. (Chaudhry, 2007)



Şekil 3.16 Demirin mıknatıslanma yönlerini göstermektedir.

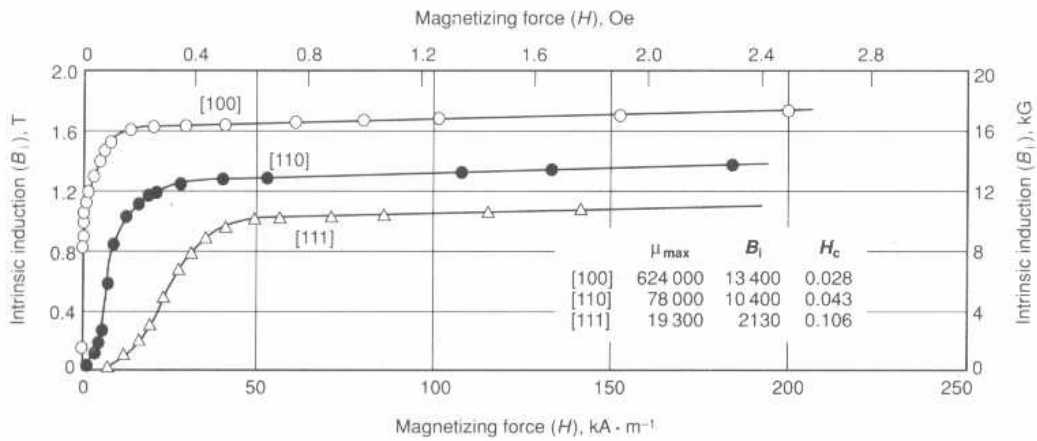
Demir kübik kristal yapısı olan bir elementtir ve küp eksenleri boyunca en az enerji ile mıknatıslanmaktadır ve kolay mıknatıslama eksenleri olarak bilinir. Yüzey köşegeni yönünde orta ve küp köşegeni yönünde ise en zor mıknatıslanabilir. Yönlendirilmiş elektrik çelikleri üretim sırasında küpün kenarları mıknatıslanma yönü olacak şekilde yönlendirilmiştir.

Yönlendirme, haddeleme, tavlama ve soğutma işlemlerini içeren ve ileri teknoloji gerektiren bir işlemdir. Yönlendirilmiş elektrik çeliklerinin manyetik kayıpları düşük, geçirgenliği yüksektir. Yönlendirilmemiş çeliklere göre biraz daha pahalıdır.

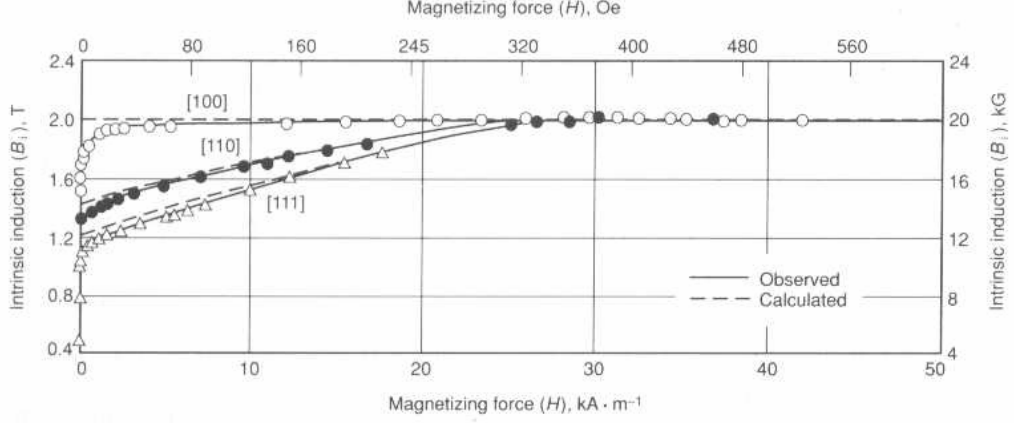


Şekil 3.17 Silisyum demir için manyetiklenme eğrisi başlangıçta oldukça anizotropiktir, manyetiklenme, (100) yönleri alanla hizaya geldiğinde en kolaydır.(Altun,2007)

Demire %3,5 silisyum katılması, uygun bir işleme uğrayabilen çok küçük histerisiz döngülü mükemmel bir manyetiklenmeye sahip bir alaşım üretebilir. Silisyum demir genellikle motor ve jeneratörlerde kullanılır. Silisyumun anizotropik manyetik davranışının avantajından şöyle faydalanılır. Genellikle küçük histerisiz döngüleri ve zorlayıcı alanlar, silisyumun kristal yapısı, en kolay manyetiklenme yönüyle hizaya geldiğinde elde edilir. Haddelme ve ardından tavlama sonucu, her tanede (100) yönünde oluşan bir levha dokusu hizaya gelir. Silisyum demir (100) yönlerinde daha kolay manyetiklendiği için histerisiz ve enerji kaybı azdır.



Şekil 3.18 [100],[110]ve [111] yönlerinde gözlemlenen ve hesaplanan B-H eğrileri %3–3,5'luk silisli çeliğin tek kristali (manyetik alan kuvveti ve manyetik akı grafiği) (Altun,2007).



Şekil 3.19 [100], [110] ve [111] yönlerinde gözlemlenen ve hesaplanan B-H eğrileri %3–3,5'luk silisli çeliğin tek kristali (manyetik alan kuvveti ve manyetik akı grafiği) (Altun, 2007)

3.5.2 Kristolografik Tekstürün Etkisi

Kristolografik tekstürün rolü, kristolografik yön ve manyeto kristal anizotropik enerjiye bağlıdır. Motorlar gibi dönen makine çekirdeklerinde alan ve laminasyon yönleri arasındaki açı elektriksel alanın doğasına uygun olarak değişmektedir. Kristolografik tekstürün en doğru şekildeki uygulaması (001) (111) tekstürleri ve kuşkusuz en uygun olan (001) düzlemi $\langle 111 \rangle$ doğrultusunu elimine eder. Zor yönlenme sağlanan durumlarda (111) manyetik özellikler için en kötü düzlemdir.

Genel olarak düzlem faktöründeki artış, watt kaybının düşüşü ve geçirgenliğin artması anlamına gelir.

Sonuç: Watt kaybı ve geçirgenlik silisyum içeriğindeki düşüşle azalır. Bunun yanında tane boyutundaki artış (ideal tane boyutuna kadar) ve tekstür faktörü geçirgenliği artırır ve watt kaybını düşürür.

Nümerik olarak tane boyutu max. bir etkiye sahiptir. Bunu tekstür faktörü ve silisyum içeriği takip eder. (Chaudhry, 2007)

Tane boyutunun etkisi: Histerezis ve eddy akım kayıpları ele alınarak incelenmelidir. Tane boyutundaki düşüş eddy akımı kayıplarına ters yönde bir etki yapar.

Watt kaybı değeri ideal tane boyutu değerine kadar artar ve sonra düşer. Soğuk haddelenmiş ve yönlendirilmemiş elektriksel çelikler için ideal tane boyutu 100–150µm arasındadır. Tane boyutunun artışı ile manyetik indüksiyonun düşmesi ve geçirgenlikte ise artış beklenir. (Chaudhry, 2007)

3.5.3 Silisli Sacların Kullanım Alanları

Ev Uygulamaları

1. Mikrodalga fırın transformatörleri
2. Çamaşır makinesi motorları
3. Buzdolabı kompresörleri

İnşaat Endüstrisi

1. Zırh kaplamalar
2. Soğuk depolama

Endüstri

1. İndüksiyon kangalları
2. Havalandırmalar
3. Düşük voltaj transformatörleri
4. Elektrik ölçme aygıtları
5. Elektromagnetler
6. Orta ve yüksek güçteki jeneratör motorları
7. Otomotiv sanayi

3.5.4 Otomotiv Sanayi

Otomotiv sanayide kullanılan çelik saclar ise, otomobil ağırlını düşürmeye yardımcı olan ve buna bağlı olarak yakıt tüketimi ve egzoz gaz emisyonunu düşüren çelik plakalar üretimine dayanmaktadır. Bu malzemeler hatasız olarak şekillendirilen yüksek mukavemetli çelik plakalardan oluşmaktadır. Malzeme bilimi ve üretim mühendisliğinin paralel olarak çalışması sonucunda, otomotiv malzemeleri için, elektrik motorları, kasa iskeleti, vites parçaları ve güvenlik parçalarında kullanılacak olan malzemelerin, üretim kalitesi arttırılmaktadır.

3.5.5 Silisli Sac Kullanılarak Yapılan ve Otomotiv Endüstrisinde Kullanılan Elektrik Motorları

1. Silecek Motoru
2. Radyatör Soğutma (fan) Motoru
3. Kalorifer ve Klima Motoru
4. Marş Motoru
5. Alternatör
6. Cam Kaldırma Motoru
7. Servo Motorları(uzaktan kumandalı uçak, araba)
8. Ayna Ayar Motoru

Doğru akım motorları; endüktör, endüvi, ön ve arka kapaklar olmak üzere dört ana kısımdan oluşur.

1. Endüktör: Manyetik alan kutupları ve gövdeden meydana gelmiştir. Gövde, manyetik alan kutuplarının ve diğer parçaların bağlandığı parçadır. Manyetik alan, demir nüve üzerine sarılan bobin üzerinden elektrik akımı geçirilerek elde edilir.
2. Endüvi: Motor gövdesi içerisinde dönen parçadır. Sargılar ve kolektörlerden meydana gelmiştir. Kolektör dilimleri, gövde ile birlikte dönme hareketi yapan sargılar üzerinden elektrik akımının geçişini sağlar.
3. Ön kapak: Motorun önden kapatılmasına, endüvinin yataklandırılmasına ve fırçaların tutulmasına yarar. Fırçalar, kolektör dilimlerine elektrik enerjisinin geçişini sağlar.
4. Arka kapak: Üzerindeki yatak ile endüvinin diğer uçtan pataklandırılmasını ve motorun arkadan kapatılmasını sağlar.

3.6 Motor ve Çeşitleri

3.6.1 Elektrik Motorları

Elektrik enerjisini mekanik enerjiye(dairesel harekete) dönüştüren aygıtlara elektrik motorları denir.

Her elektrik motoru biri sabit (Stator) ve diğeri kendi çevresinde dönen (Rotor ya da

Endüvi) iki ana parçadan oluşur. Bu ana parçalar, elektrik akımını ileten parçalar (örneğin:

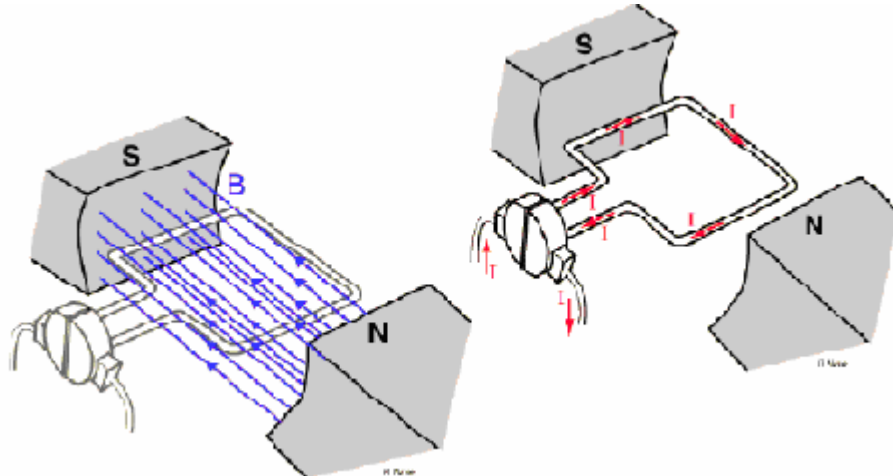
sargılar), manyetik akıyı ileten parçalar ve konstrüksiyon parçaları (örneğin: vidalar, yataklar) olmak üzere tekrar kısımlara ayrılır.

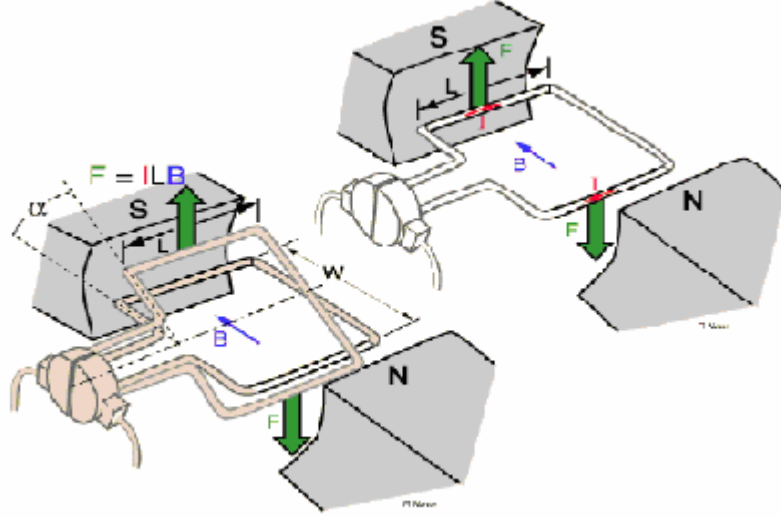
3.6.2 Motor Nasıl Çalışır?

Elektrik motorları genel olarak bir mıknatısın N ve S kutuplarının arasından geçirilen telin üzerinden geçen akımın oluşturduğu kuvvet ile dönme hareketlerini sağlarlar. Yandaki şekillerde görüldüğü üzere mıknatısın N ve S kutupları arasında (yönü N' den S' ye doğru olmak üzere)oluşan B manyetik alan içerisinde geçirilen L uzunluğundaki telin üzerinden I akımı geçirilirse tele uygulanacak kuvvet: $F=BIL$ olacak şekilde bulunur.

$$F = B I L \quad (3.4)$$

Olacak şekilde bulunur. Bu kuvvetin oluşturduğu moment ile motor hareket etmeye (dönmeye) başlar.





Şekil 3.20 Oluşan moment sonucu motorda meydana gelen dönme hareketi (Tacer, 2005)

3.6.3 DC Motorlar

Motorun dairesel hızı uygulanan voltajla doğru orantılıdır. Motora verilen akımın yönünde döner, ters polarize edildiğinde diğer yöne döner.

3.6.4 Fırçalı (Brush) DC Motorlar

Fırça içeren DC motorlarda, rotordaki sarımlara elektrik iletimi fırça-kollektör yapısı ile sağlanır. Fırçalı motorlarda stator yani ortadaki sarımlı bölüme akımı iletmek için iletken metal veya kömür tarzı iletkenler kullanılır ve motor döndükçe farklı kutuplanma nedeni ile motorun dönmesi devam eder fakat zamanla fırçalar aşınır ve motor kullanılamaz hale gelir.

3.6.5 Fırçasız (Brushless) DC Motorlar

Fırçasız doğru akım motoru (brushless dc motor), komütasyon işlemini mekanik olarak değil elektronik olarak sağlayan bir motor türüdür. Fırçasız doğru akım motorlarında fırça-kollektör düzeneğinin görevini elektronik bir denetleyici (kontrolör) üstlenir. Fırçasız doğru akım motorları, fırçalı olan türlere göre daha verimli çalışır. Fırçasız motorlarda akım 3 kablo ile motora iletilir. Yapısı nedeni ile fırçasız motorlar daha yüksek tork ve devir sayılarına rahatlıkla ulaşabilirler ve hafiftirler.

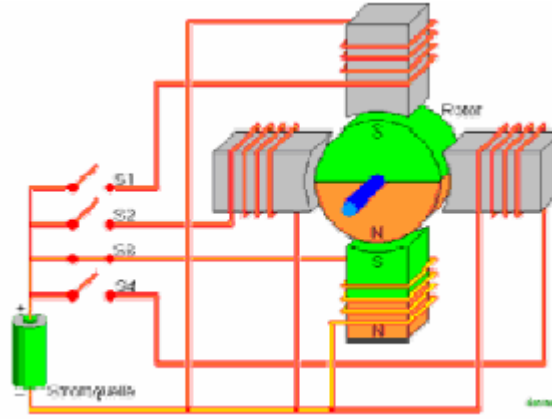
Sonuç olarak fırçalı motorları çalıştırmak kolaydır fakat sürtünme nedeni ile kullanım ömrü

ve gücü aynı boyutlardaki fırçasız motora göre düşüktür. Fırçasız motorlarda sürtünen bir iletken yoktur fakat çalışabilmesi için özel sürücü devresine ihtiyacı vardır, daha güçlü ve kullanım ömrü daha uzundur.

3.6.6 Step (Adım) Motorlar

Dört farklı sarımı belirli bir sırayla tetikleyerek oluşturulan manyetik alan ile çalışan motorlara step motor denir. 200 adıma($360^\circ / 200 = 1.8^\circ$) kadar çıkabilen çeşitleri vardır. Bu demek olur ki bu tip motorlarda en fazla 1.8° lik bir kontrol gerçekleştirilebilir.

Genellikle dijital olarak yani bir mikrokontrolör ile kontrol edilirler fakat analog olarak da çalıştırıldıkları durumlar vardır.



Şekil 3.21 Step motor (Tacer, 2005)

Step motorun avantajlarından en önemlisi konum kontrolü yapılmasının kolaylığıdır.

Dezavantajları ise düşük güçte olmaları, hızları arttıkça torklarının düşmesi, ivmelerinde dalgalanmalar olması ve yaklaşık 2° nin altında kontrol yapılamamasıdır.

3.6.7 Servo Sistemler

Herhangi bir mekanizmanın işleyişini, hatayı algılayan bir geri besleme düzeneğinin yardımıyla denetleyen ve hatayı gideren otomatik aygıtlara servo sistemler denir.

Bu tip motorlarda, sabit bir kutup manyetik alanı sağlamak için "DC kaynak" kullanılır.

Endüviye(rotor) ise değişken bir gerilim verilir. Bu iki gerilimin dolaştırdığı akımların

oluşturduğu manyetik alanlar birbirini iterek dönüşü başlatır.

1. Döndürme momentleri yüksektir.
2. Döndürme momentinin iki katına kadar olan değerlere "kısa süreli olarak" yüklenebilirler.
3. Devir sayıları 1–10000 dev/dk arasındaki değerlerden herhangi birisine kolayca ayarlanabilirler.
4. Çok sık aralıklı olarak hareket edebilirler. Yani dur-kalk yapma sayılarının çok olması motoru olumsuz etkilemez.
5. Atalet momentleri küçük olduğundan verilen komutları gecikme olmadan algılar ve yerine getirirler.

3.7 Motor Kayıpları

3.7.1 Elektrik Motorlarındaki Güç Kayıpları

Bir elektrik makinesindeki kayıplar;

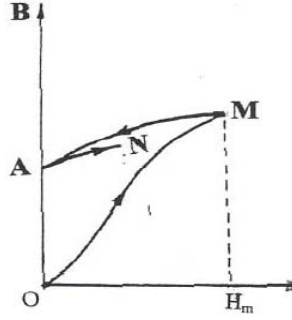
- Histerisiz kaybı
- Eddy akımı kaybı
- Tabakalar arası kayıp
- Rotasyonel kayıp

Histerisiz ve eddy akımı kaybı çeliğin kendi özelliğidir, arta kalanlar ise çekirdeğin elektrikli makinede kullanılış şekli ile alakalıdır. (Altun, 2007)

3.7.2 Histerisiz Kaybı

Fiziksel olarak malzemenin mıknatıslanması sırasında atomların yön değiştirmeleri, akı değişimi nedeniyle olur. Bu kayıp çekirdek içinde dahili ısı olarak açığa çıkar. Histerisiz kaybı artan akış yoğunluğuyla ve manyetikliğin değişim sıklığına göre hızlı bir şekilde artar. H'nin aldığı değerler için B'nin farklı değerler alması olayına histerisiz, bu akı

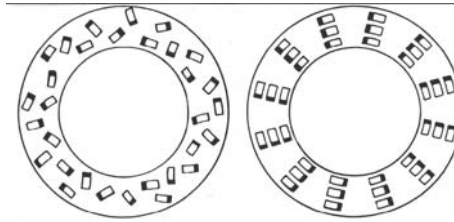
yoğunluğu değişiminin çekirdek içinde dahili ısı olarak açığa çıkmasına da histerisiz kaybı denir.



Şekil 3.22 Basit bir histersiz eğrisiyle histerisiz kaybının gösterilmesi(Tacer, 2005)

$$p_h = af B_{\max}^n \quad (3.5)$$

Formülde, a ve n maddeye bağlı sabit, n steinmetz sabiti. Bmax manyetik akı tepe değeri, f mıknatıslanma frekansıdır.

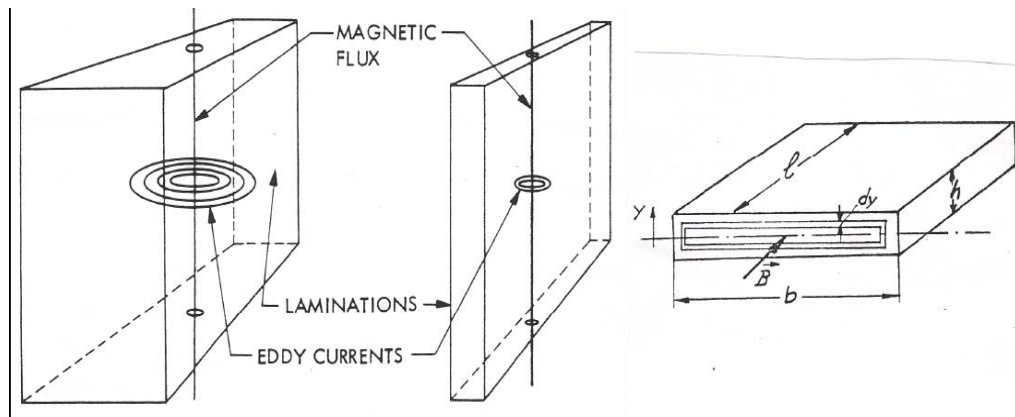


Şekil 3.23 Mıknatıslanmamış ve mıknatıslanmış halde atomların dizilimi (Tacer, 2005)

3.7.3 Girdap Akımı Kayıpları Nasıl Oluşur?

Alternatif akım ya da zamanla değişen alanların söz konusu olduğu durumlarda malzemede ortaya çıkan ısı(joule) kayıplarıdır. Değişken bir alan içinde bulunan iletkenlerde ve ferromanyetik malzemelerin moleküllerinde bir gerilim endüklenir. Endüklenen bu gerilimler sonucu oluşan akımlar moleküller arasında çevrimini tamamlamaya çalışır ve böylece ferromanyetik malzeme, birçok kısa devre olmuş sargılar gibi davranır. Meydana gelen girdap akımları, manyetik alan frekansında olacağından elektronların birbirine sürtünmesiyle moleküller ısınır. Isı kaynağı oluşturan bu kısımlardan cidalara doğru bir ısı akışı meydana gelir ve cisim ısınır dolayısıyla ısı kayıpları ortaya çıkar. Elektrik akımları manyetik bir çekirdeği (hücreyi) çevreleyen iletkenlerin üzerinde yüzer ve manyetik akıntı elektrik akımı meydana getirir yani manyetik akıntıyı yükler. Eğer manyetik akı zengin ise, akıntı hatlarını çevreleyen iletken yollardan herhangi birinde voltaj meydana getirir. Bu iletken yollardan bazıları çekirdek(iron) yapısının içinde bulunur. Yollar boyunca voltaj çekirdek (iron) malzemenin içinde dairesel akımlar yaratır. Bu akımlar eddy akımları olarak bilinir. Eddy akımlarının büyüklüğü frekansın boyutu, manyetik akışın yoğunluğuna, ve (iron) malzemenin spesifik rezistansı ve kalınlığına bağlıdır. Eğer manyetik çekirdek(iron) malzemenin kalınlığı büyük ise, eddy akımları sınırlanamayacak ve bu yüksek enerji kaybıyla sonuçlanacaktır. Bu kayıp da ısı gibi sınırlanabilir ve bu da çekirdeğin sıcaklığını oldukça artırır. (Tacer, 2005)

Girdap akımlarının izledikleri yolları tam olarak belirlemek mümkün olmadığı gibi izledikleri yol da düzgün değildir. Girdap akımları sadece malzemenin ısınmasına değil, aynı zamanda kendisini oluşturan alana ters yönde olacağından magnetik alanın da zayıflamasına neden olurlar. Şekil 3.23'de girdap kayıplarına etkiyen büyüklükleri görmek amacıyla kalınlığı h , uzunluğu l olan ferromanyetik malzemedan oluşan levhayı göz önüne alalım.



Şekil 3.24 Kalınlığı h , uzunluğu l olan ferromanyetik bir malzemedan oluşan levha (Altun, 2007)

Levhanın pozitif yönü şekilde B ile gösterilen doğrultuda değişken bir manyetik alanın içinde bulunduğunu varsayalım. Bu değişken magnetik alan sonucunda oluşan girdap akımı devresinin genişliği dy ve uzunluğu l olan kesitte tamamladığı düşüncesiyle bu devre tarafından halkalanan akı için, eğer $h < b$ ise;

$$\Phi = BS = 2ybB \quad (3.6)$$

Değişken magnetik alanın;

$$B = B_m \sin \omega t \quad (3.7)$$

şeklinde zamanla sinüzodial olarak değiştiği varsayılırsa,

$$\Phi = 2Yb B_m \sin \omega t \quad (3.8)$$

eşitliği elde edilir. Faraday yasasına göre endüklenen gerilim;

$$e = -(d\phi / dt) = -2yb\omega B_m \cos \omega t \quad (3.9)$$

olur.

Levha malzemesinin öz direnci ρ ile gösterilirse, $2y$ uzunluğunu b genişliği yanında ihmal ederek girdap akımı devresi direnci için;

$$R = \rho 2b / (l dy) \quad (3.10)$$

Endüklenen gerilimin efektif değeri;

$$E = (2yb\omega B_m) / \sqrt{2} \quad (3.11)$$

olduğundan girdap akımının R direncinde meydana getirdiği güç kaybı;

$$dP_w = E^2 / R = (\omega^2 b l B_m^2 / \rho) y^2 dy \quad (3.12)$$

olacağından tüm levhadaki güç kaybı, bunun $y=0$ ile $h=1/2$ arasında integre edilerek,

$$P_{W=(\omega^2 b l B_m^2 h^3 / 24 \rho)} \quad (3.13)$$

ya da,

$$\omega = 2\pi f \quad (3.14)$$

olduğundan,

$$P_w = (\pi^2 f^2 b l B_m^2 h^3 / 6\rho) \quad (3.15)$$

elde edilir.

Levhanın hacmi $V=bhl$ olduğundan;

$$P_w = (\pi^2 f^2 B_m^2 h^2 V / 6\rho) \quad (3.16)$$

olur.

(2.28) ve (2.29) eşitliklerinden görüleceği üzere girdap akımları nedeniyle oluşan güç kaybı;

1. Levhanın kalınlığının karesi ile ters orantılı
2. Uygulanan mıknatıslanma akımının frekansının karesi ile doğru orantılı
3. Endüksiyonun maks. değerinin karesi ile doğru orantılı
4. Levhanın öz direnci ile ters orantılıdır.

Bu özellikler nedeniyle girdap akımları kayıplarını azaltmak için;

1. Saç kalınlıkları mümkün olduğu kadar küçük olmalı
2. Girdap akımlarının devreleri de birer elektriksel devre olduğu için akımların bir levhadan diğerine geçmesi ile levhalar arasında büyük akım yollarının oluşmaması için levhalar izole edilmelidir.

3. Öz direnci arttırmak için özel alaşımlar kullanılmalıdır. (Tacer, 2005)

3.7.3.1 Foucault Akımlarının Küçültülmesi İçin Magnetik Cisimlerin Omik Direncinin Büyütülmesi

Elektrik makinelerinin magnetik devreleri için en önemli maddeyi demir ve demirin silisyumlu alaşımları teşkil ederler. Demirin magnetik geçirgenliği yaklaşık 5000 civarındadır. Buna göre saf demirde permeabilite nispeten büyüktür.

Foucault akımları demirin omik direnci (R_{demir}) dolayısıyla demirin özgül direnci (ρ_{demir})'in ile tersine orantılı olduğuna göre bu akımların küçülmesi için ρ_{demir} 'in mümkün olduğu kadar büyük olması istenir. Bu ise; demirin alaşımları ile mümkündür. Elektrik makinelerinin magnetik devrelerinde kullanılan levhaların alaşımları ise demirin içine özellikle (Si) koymakla temin edilir. Zira silisyum, magnetik özelliği çok azaltmaz buna karşılık demirin direncini büyütür.

Si derecesi çoğaldıkça demirin özgül direnci ρ_{demir} büyür ve bu şekilde elektrik makinelerinde ve transformatörlerde kullanmak amacıyla $\rho \rightarrow 0,7$ değerine kadar büyük özgül dirençleri bulunan alaşımlı levhalar elde edilir. Genel olarak demirin (% 0,5 ÷ % 0,4 ÷ %5Si) karmalarının Si miktarına göre $\rho_{20} = 0,12 \div 0,67 \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$ değerli özgül dirençleri vardır. Alaşımlı levhalar hafiftir ancak pahalı ürünlerdir.

Alaşımlı levhaların yoğunluğu küçüktür. Bu sebepten, saf demire nazaran, bunların magnetik kabiliyetleri küçüktür. O halde ρ_{demir} büyüdükçe μ küçülmektedir. Bütün yukarıda söylenen özellikler neticesi alaşımlı sacların v_{10} ve v_{15} (Watt/kg) ile verilen kayıp sayıları da küçüktür.

Diğer taraftan alaşımlı levhalar gevrektiler ve bu yüzden bunların işlenmeleri güçtür; çünkü çatlarlar.

Demirin (C) karbonlu, (Si) silisyumlu, (P) fosforlu ve (S) kükürtlü alaşımları magnetik özelliklidir. Nikelli (Ni) ve magnezitli (Mn) alaşımlar yapmakla kısmen veya tamamen magnetik olmayan çelikler elde edilir. . (Duman, 1989)

Özellikle magnetik olmayan Ni ve Mn çelikleri yüksek hızlarda oluk kamaları, makinenin mekanik kısımları, irtibat somunu ve sapmaları, tazyik levhaları, rotatif mıknatıslamalara maruz kalan ve mıknatıslama için aktif olmayan makine kısımları için kullanılır. (Duman,1989)

Makine magnetik aktif kısımlarında ise levhaların seçilme ve kullanılması kullanılacakları kısımlara göre değişir. Bu arada magnetik doyum büyük rol oynar. Transformatörlerde

çoğunlukla 14000 Gauss'dan aşağı değerlerde doyum bulunduğu için bu sebepten buralarda permeabilitesi küçük olan yüksek alaşımlı levhalar kullanılmaktadır.

Bu kısa açıklamalardan görülüyor ki demir foucault kayıplarının azaltılması için magnetik devrelerde alaşımlı levhalar kullanılmalıdır. Dinamo levhaları çoğunlukla akma demirden yapılır. Alaşım derecelerine göre dinamo levhaları şu çeşitlere ayrılır. (Duman, 1989)

1. Normal dinamo levhaları
2. Az alaşımlı levhalar
3. Orta alaşımlı
4. Yüksek alaşımlı dinamo levhaları

3.7.3.1.1 Normal Levha Analiz Değerleri (%0,2 ÷ %0,8Si)

Karbon C:%0,085

Fosfor P:%0,023

Manganez Mn:%0,36

Silisyum Si:%0,24

Kükürt S:% 0,039

$\gamma = 7,8 \text{ kg/dm}^3$

$\delta = 0,12 \text{ } \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$

Normal dinamo levhaları (normal dönen makinelerde) magnetik devreler için kullanılır.

3.7.3.1.2 Az Alaşımlı Levhanın Analiz Değeri (%0,8 ÷ %1,2 Si)

C:% 0,076

P:%0,021

Mn:%0,31

Si:%1,08

S:%0,033

$\gamma = 7,75 \text{ kg/dm}^3$

$\delta = 0,22 \text{ } \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$

Normal makinelerle senkron makineler ve turbo alternatörlerde kullanılır.

3.7.3.1.3 Orta Alaşımli Dinamo Levhasının Analizi (%2 ÷ %3 Si)

C:%0,067

P:%0,030

Mn:%0,36

Si:%2,0

S:%0,026

$\gamma = 7,65 \text{ kg/dm}^3$

$\delta = 0,40 \text{ } \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$

Bu alaşımli levhalar özellikle turbo alternatörlerde kullanılır.

3.7.3.1.4 Yüksek Alaşımli Dinamo Levhası Analizi (%3,5 ÷ %4,5 Si)

C:%0,065

P:%0,016

MN:%0,14

Si:%3,98

S:%0,018

$\gamma = 7,6 \text{ kg/dm}^3$

$\delta = 0,52 \text{ } \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$

Bu levhalar transformatörlerde kullanılır.

Bu analiz değerlerinden görüleceği gibi magnetik devreler için dinamo levhalarının alaşım derecesi Si ile tespit edilmiştir. Buna karşılık diğer maddeler silisyum (Si) arttıkça azalmaktadır. (Duman, 1989)

Yukarıda bahsedildiği gibi pahalı olan alaşımli levhalar çok sert ve gevrekler. İşlenmeleri güçtür ve kolayca çatlarlar. Dolayısıyla da mekanik mukavemetleri azdır. Bu sebepten yüksek alaşımli levhalar ancak statik cihazlarda, transformatörlerde kullanılır. Transformatörlerde kullanılan levhaların silisyum dereceleri %3-%5 arasındadır. Buna karşılık dinamik makinelerde yani dönen elektrik makinelerinde demirin kullanılışı yalnız Foucault ve histerezis kayıplarının azalması bakımından incelenemez. Bu makinelerde aynı zamanda demirden, kullanıldığı yere göre iyi bir mekanik özelliğe sahip olması istenir. Bundan dolayı

dönen makinelerin aktif demir kısımlarında (%0,1–2,5Si) miktarlı orta veya az alaşımlı levhalar kullanılır (Duman, 1989).

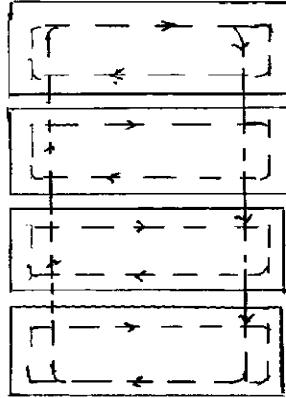
3.7.4 Tabakalar Arası Kayıp

Eddy akımı kayıplarına ek olarak her tabakada meydana gelir ve buna ek olarak bir güç kaybı, tabakalar arası kayıp olarak bilinir. Tabakalardan biri diğerine göre tamamen yalıtılana dek devam eder. Yalıtımın miktarı, manyetik hücrenin boyutlarına, hücreye uygulanan mekanik basınca, akı yoğunluğuna ve frekansına karşı bu bileşeni ihmal edilebilir kayıplardan bile koruyacak kadar yeterli olmalıdır.

Tabakaların köşelerindeki aşırı çapaklanma tabakalar arası kaybı arttıracaktır. Hücreye çok fazla aksenal basınç uygulandığında kayıp da artabilir. (Altun, 2007)

3.7.4.1 Yalıtım

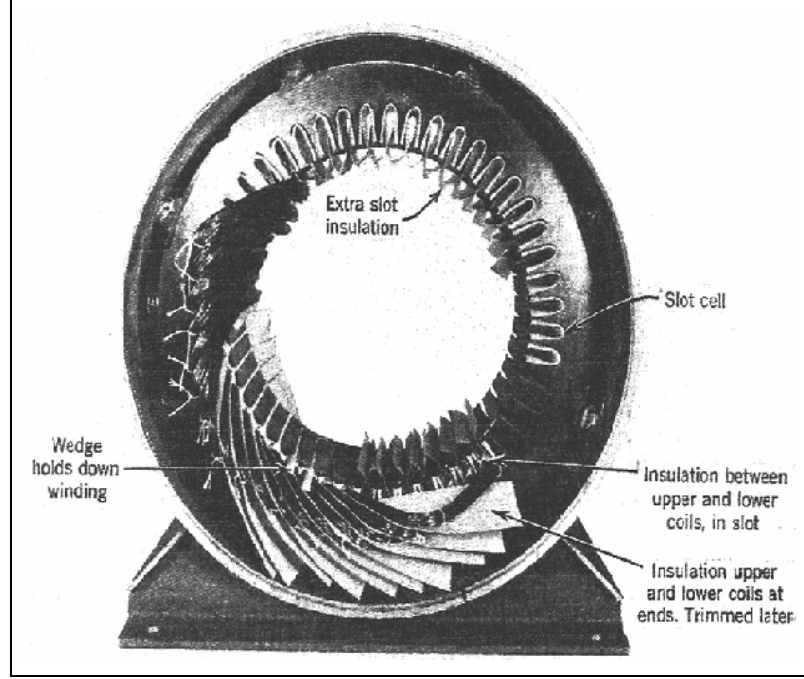
Elektrik motoruna uygulanan voltaj için şasi yalıtılmalıdır. Bu hatlar birbirleri arasında da kısa devreyi engellemek için ve akımın bir tabakadan diğerine atlamaması için yalıtılmalıdır. Şekil 3.23’de görülmektedir.



Şekil 3.25 İzole edilmemiş levha paketlerindeki girdap akımlarınca oluşturulan alan ve esas alan şekli verilmiştir. (Altun, 2007)

Bu şekilde her bir paketteki girdap akımı kesik çizgilerle gösterilmiştir. Komşu olan levhalardaki akım yönleri göz önüne alındığında bunların birbirlerini yok ettikleri görülmektedir. Bir saç paketi göz önüne alındığında paket çevresinde bütün girdap

akımlarının vereceği bir bileşke magnetik etki vardır. Bu bileşke etki nedeniyle esas alan levhanın iç kısmında etkin olmaz. Bu yüzden izole edilirler.(Lloyd, 1969)



Şekil 3.26 Poli faz motor bobin ve yalıtım yeri.(Lloyd, 1969)

Kanatlar yalıtıldığında ve bağlantılar yapıldığında, stator laminasyonları mıknatıs hattı ve benzeri bağlantılar yalıtıcı verniğe daldırılıp, kurutulur. Sonrada fırınlanır.

Birçok kere tekrarlanabilir. İdeal olarak vernik bütün hatlara nüfuz etmeli ve poroziteli malzemedeki boşlukları doldurmalıdır. Yalıtım kalitesi bazı tehlikeli durumlarda nemi önler. Bir elektrik motorunun ömrü, yalıtımın ömrüne bağlıdır. Motor, bozulma konumuna geldiğinde genellikle yanar. Yalıtımın ömrü ve bu yaşlanma olayı ısıyla meydana gelir. (Lloyd, 1969)

3.7.4.2 Rotasyonel Kayıp

Rotasyonel kayıp stator hücreye aşırı radyal bir basınç uygulandığında ortaya çıkan eddy akım kayıplarının özel bir türüdür. Bunun indüksiyon makinelerindeki sabit bobinlerde önemli bir rolü vardır. Eğer stator (sabit) hücre üzerindeki radyal basınç aşırı derecede yüksekse, yerel ve sirkülasyon yapan eddy akımları her bir tabakadan ve her stator dışının tepesinden geçer ve belirgin bir şekilde elektrik motorunun hareketsiz kısmındaki(stator) hücre kaybını arttırır (Altun, 2007).

Manyetik devreleri incelerken laminasyon çeliklerinin alternatif akıma karşı histerisiz kaybı ve eddy akımı kayıplarını gösterdiğini bulduk. Bu kaçak akımlar iki şekilde görülür.

1. Tek bir laminasyon içinde sirküle eden ve laminasyonlar arasında sirküle eden akımlar
2. Oksit kaplamasına rağmen laminasyon yüzeyinde oluşan elemanlar

Ek olarak, kanatlardaki akımlardan dolayı doğal olarak I^2R kaybı, hem stator bobin hem de alüminyum (bar) ve rulmanlardaki oran ve fanlardan gelen rüzgâr kaybı, normal kayıpların tamamını vermektedir. Bu kayıpların büyüklüğünde ilgilenilmesi gereken bir konudur.

Şekil (3.25)de bu kayıplar, 1 beygir 4 kutuplu 3 fazlı motor için verilmiştir. Buradan anlaşılıyor ki; bütün bu kayıplar, ısı olarak açığa çıkar. Ve bu ısı motordan atılmalıdır. Ve kanatlar güvenli bir sıcaklıkta muhafaza edilmelidir. (Lloyd, 1969).

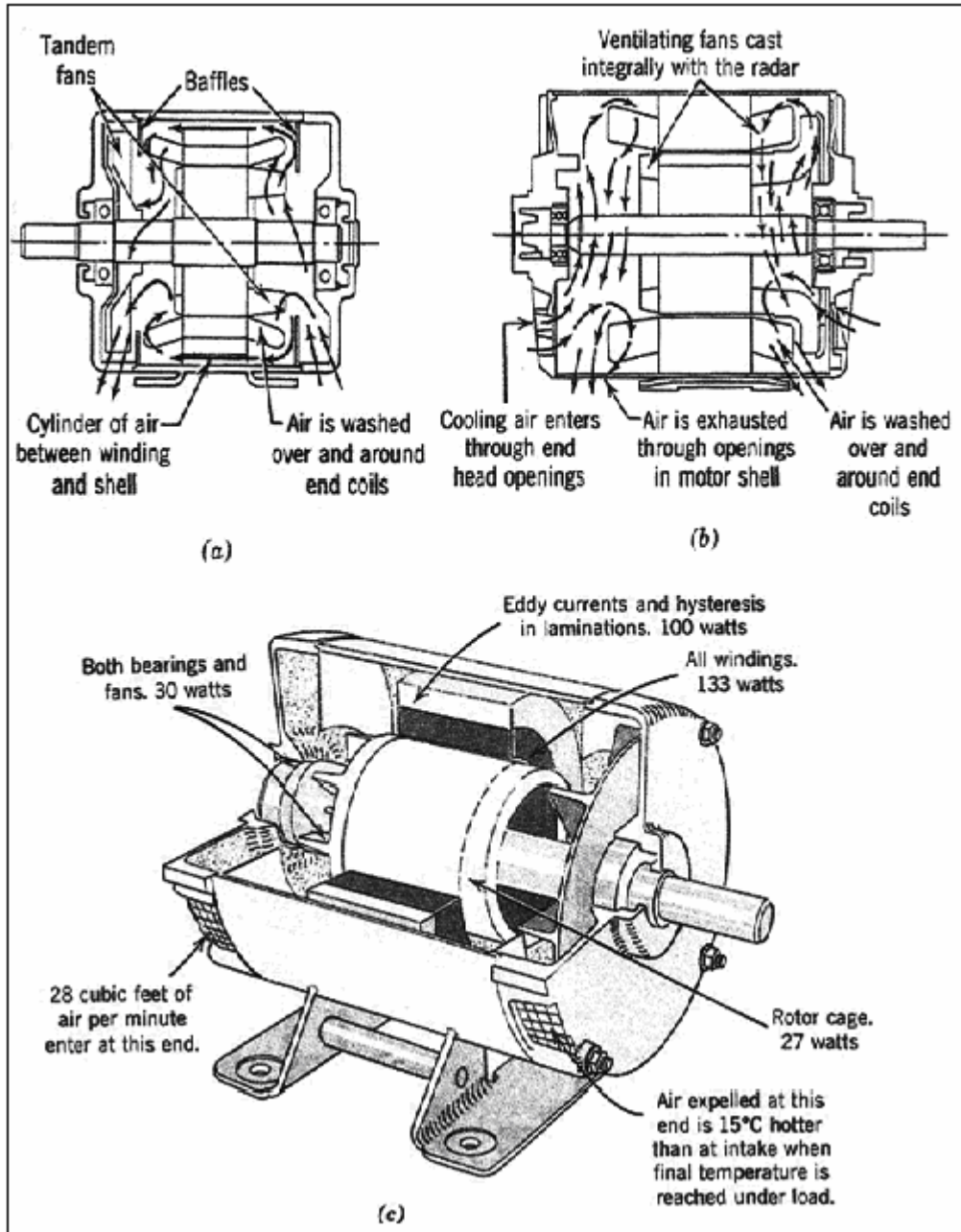
Sıcak bir yüzey ısıyı soğuk bir yüzeyden daha büyük bir oranda dağıtır. Yüzey çevresindeki hava artışı ısının dağılma oranını belirler.

Motor havalandırma: Şekil 3.24’de gösterilen 1 beygirlik motordaki kayıplara dönelim. Bu yapı açık havalandırmalı bir motor gibi dizayn edilmiş büyük bir fan yardımıyla hava bir baştan diğer başa sirküle etmektedir. Yapılan ölçümler gösteriyor ki; bu hava akışı $28\text{ft}^3/\text{min}$ değerindedir. Ve motor son işlem sıcaklığına ulaştığında dışarıdan gelen hava, içerideki havadan 15C° daha sıcaktır. Sıcaklığın belli bir seviyeye kadar artması, belli bir miktar enerji gerektirmektedir. Şunu biliyoruz ki; 1ft^3 havayı 15C° arttırmak için 8,4 watt gerekmektedir. $28\text{ft}^3/\text{min} \times 8,4\text{watt} = 235\text{ watt}$

Bu yüzden 290watt’lık bir kaybın 235 watt’ı havalandırma sistemiyle motordan uzaklaştırılmaktadır. Bu denge, yüzeyden motor kafasına kadar dağıtılmaktadır. Motoru 7,625 inch çapında ve 10,25 inch uzunluğunda bir silindir gibi düşünün. Silindirin yüzeyi 246inch^2 dir. Motor kafasının alanı, $45,6\text{inch}^2$ dir. Sıcaklık artışı gövde üzerindeki birçok noktadan ve kafadan motor, belirli bir yükte çalışırken ölçülmüştür. (Lloyd, 1969).

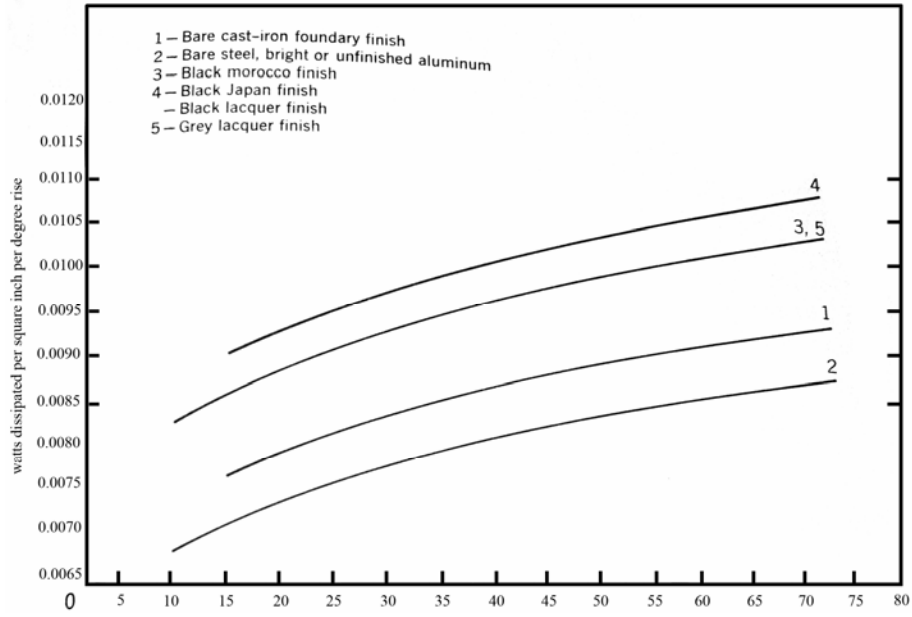
Motor kafası yanındaki fanda: 15C° ’lik artış gövdede 22C° artış.

Diğer kafada: 10C° artış



Şekil:3.27 Motorlar için yaygın havalandırma çevrimi.(Lloyd, 1969)

Bu yüzeylerden kaç watt'lık ısınn dağıtıldığını belirleyebilmek için Şekil 3.26 deki eğrileri inceleyelim. (Lloyd, 1969).



Şekil 3.28 Isı dağılım grafiği (Lloyd, 1969)

$$0,00825 \times 15^{\circ} \times 45,6 \text{ in.}^2 = 5,63 \text{ w}$$

$$0,00805 \times 10^{\circ} \times 45,6 \text{ in.}^2 = 3,67 \text{ w}$$

$$0,00855 \times 22^{\circ} \times 246 \text{ in.}^2 = 46,50 \text{ w}$$

$$\text{Total} \quad \quad \quad 55,80 \text{ w}$$

Bu watt değerleri artı havayla taşınan ısı 290watt'lık kayıba eşit olmalıdır. Şu noktalar akılda tutulmalıdır ki;

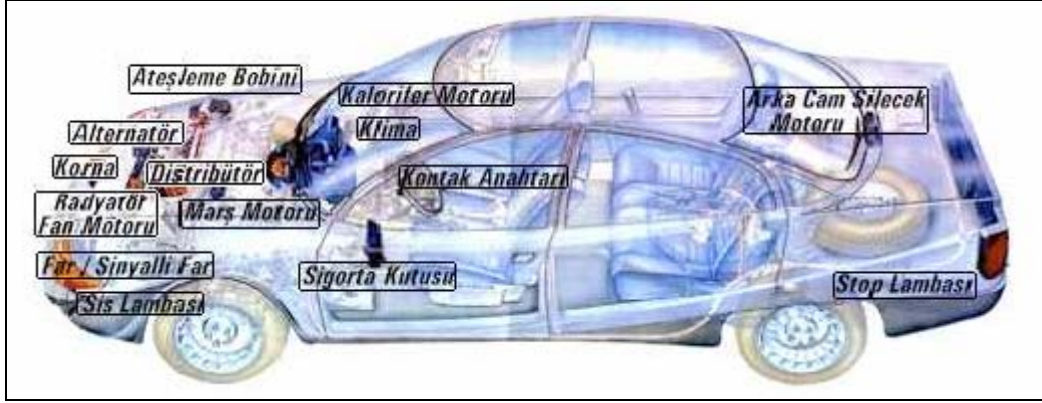
- Normal bir motorda ısının çoğu, havalandırma sistemiyle taşınmaktadır. Ve bu hava akışı ile birlikte motorun sıcaklığını daha fazla arttıracak hiç bir şey karışamaz.
- Sirküle eden havanın sıcaklığında belirgin bir artış olsa bile, bu ısı yüzeyden dağıtılır (Llyod, 2007).

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

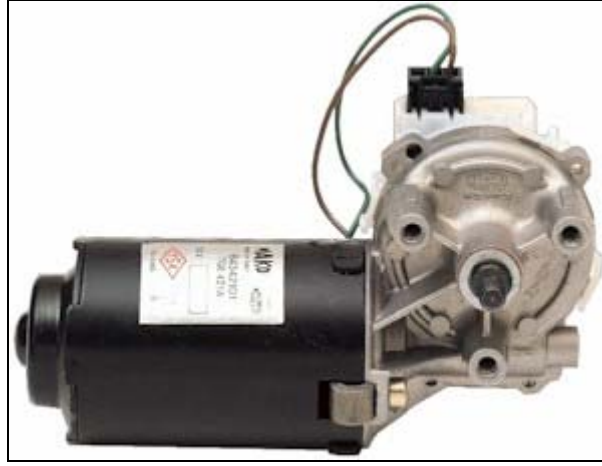
Deneysel çalışmada amaçlanan silecek motoru gibi elektriksel aparatlarda kullanılan laminasyon sacının silis oranını arttırarak ve kalınlığı azaltarak manyetik kayıpları en aza indirmek ve motor performansını yükseltmektir.

Bu çalışmada, 0,65mm kalınlıkta maksimum %0,30 Si içeren ve Erdemir firmasından alınan (6109) tipi elektrik motoru yapımına uygun laminasyon sacı, mako elektrik firmasının seri olarak elektrik motoru yapımında kullanmış olduğu, Ereğli firmasından alınan %0,019 Si içeren 1mm kalınlığındaki CCR-6112 tipi laminasyon sacı ve MGE Metal' den alınan %2,84 oranında Si içeren 0,5mm kalınlığındaki M400 tipi soğuk haddelenmiş laminasyon sacı kullanılmıştır. Bu çelik saclar çeşitli metalografik işleme tabi tutulduktan sonra mikro yapıları karşılaştırılmıştır. Yine bu firmalardan alınan çeliklerin çekme testleri yapılmıştır. Metalografik işlemlerde ise; hemen hemen aynı işlem kademeleri izlenmiştir. İlk önce numuneler uygun boyutlarda kesilmiş, bakalite alınmış ve monte işlemi gerçekleştirilmiştir. Daha sonra SİC zımparalarda zımparalanmış ve elmas pastada parlatılmıştır. Numuneler, nital4 ile dağlanmış. Daha sonra optik mikroskopta mikro yapılar incelenmiştir. Haddeme prosesinin etkilerini daha belirgin olarak görebilmek için her parça için yüzeyden ayrı olmak üzere bir de kesitten numuneler alınmıştır Bu karşılaştırmaların amacı Si içeriğine göre mikro yapı değişiminin incelenmesi olmuştur.

Deneysel çalışmanın ikinci kısmında ise, bu üç farklı malzemeden her biri standart 122mm genişliğinde, 2,5m boyunda plaka halindeki saclar, 130 ton'luk basma kuvveti ile sac kesme makinesinde kesilerek, (Şekil 4.2)'deki silecek motorunda kullanılmak üzere endüvi sarım tezgahında sarılmıştır (Şekil 4.5). Endüvinin üzerinde bobinler silis oranı yüksek, orta ve düşük olan saclar ile sarılarak, bir seri DC motoru yapılmıştır. (Şekil 4.6) Beş tanesi M400 tipi, dört tanesi 6109, dört tanesi CCR-112 tipi silisli sac kullanılarak endüvisi toplanan toplam 13 adet Renault L84 tipi (Şekil 4.1) cam silecek motoru yapılmış olup, bunların birinci ve ikinci hız soğuk değerleri grafiğe dökülüp performans eğrileri çıkartılmış ve değerler karşılaştırılmıştır.



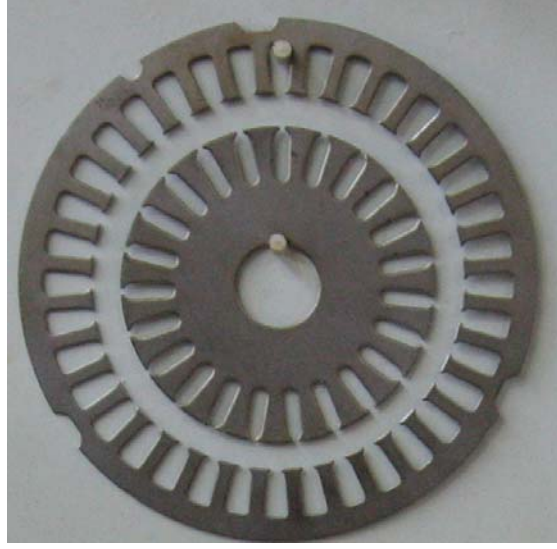
Şekil 4.1 Otomobil genel görünümü.



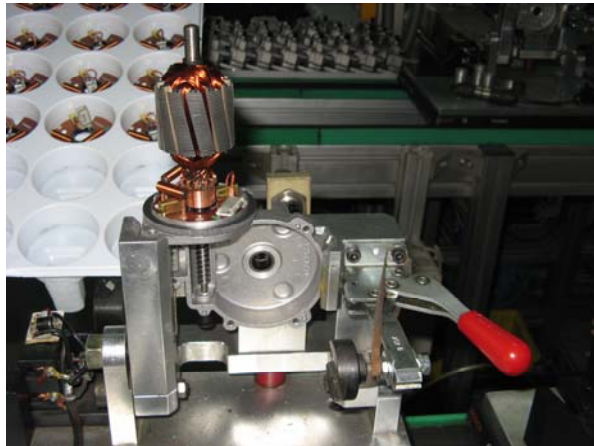
Şekil 4.2 Silecek motoru.



Şekil 4.3 Endüvi sacı çeşitleri.



Şekil 4.4 Elektrik motorunun duran kısmında (stator) kullanılan sac.



Şekil 4.5 Elektrik motorunun yapıldığı endüvi sarım tezgah



Şekil 4.6 Elektrik motorunun duran kısmı (stator).

4.1 Kimyasal Bileşim

Çizelge 4.1 MGE Metal’den alınan M400 tipi silisli sacın kimyasal analiz sonuçları

Numune	%Fe ₂	%C	%Si	%Mn	%Al	%P	%S	%Cr	%Mo
M400	96,20	0,051	2,84	0,216	0,294	0,0114	0,0157	0,016	0,006

Çizelge 4.2 Ereğli CCR–6112 tipi silisli sacın kimyasal analiz sonuçları

Numune	%Fe ₂	%C	%Si	%Mn	%Al	%P	%S	%Cr	%Mo
CCR–6112	99,31	0,03	0,019	0,146	0,065	0,069	0,0199	0,016	0,006

Çizelge 4.3 Erdemir 6109 kimyasal analiz sonuçları

Numune	%C	%Si	%Mn	%Al	%P	%S	%Al	%N
6109	0,02	0,10–0,30	1,00	0,020	0,01–0,03	0,020	0,020	0,009

4.2 Mikroyapı



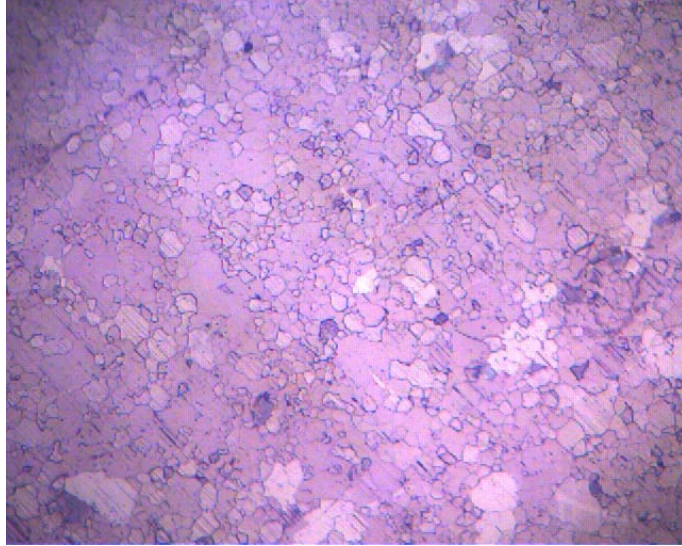
Şekil 4.7 CCR–6112 tipi %0,019 Si içeren elektrik motoru yapımına uygun laminasyon sacı. Nital 4X200. Görüntü yüzeyden alınmıştır. Ferritik yapı görülmektedir. Silikat inklüzyonları mevcuttur.



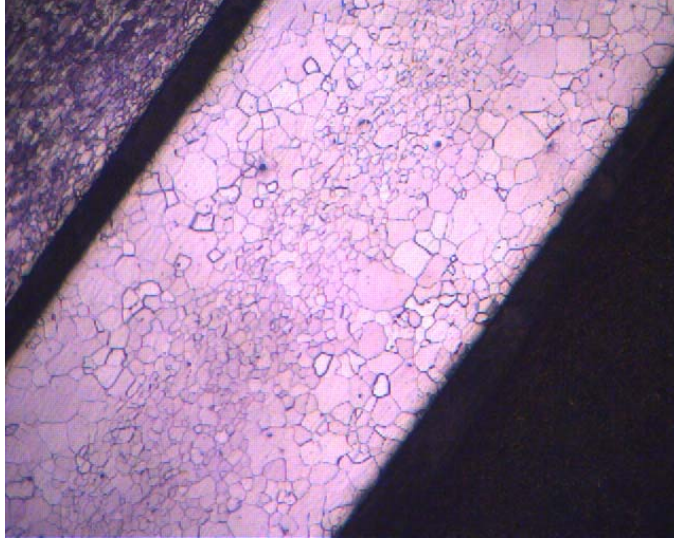
Şekil 4.8 CCR–6112 tipi %0,019 Si içeren elektrik motoru yapımına uygun laminasyon sacı. Nital 4X500. Görüntü yüzeyden alınmıştır.



Şekil 4.9 CCR-6112 tipi %0,019 Si içeren elektrik motoru yapımına uygun laminasyon sacı.
Nital 4X500. Görüntü kesitten alınmıştır



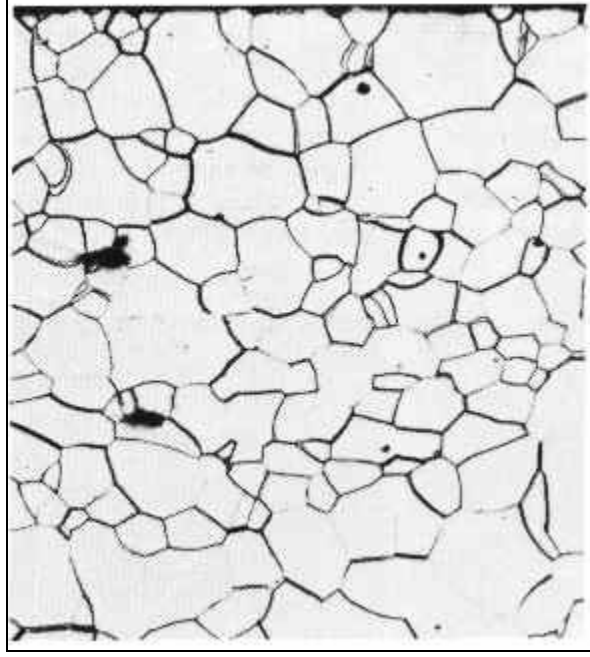
Şekil 4.10 6109 tipi %0,10–0,30 Si içeren elektrik motoru yapımına uygun laminasyon sacı.
Nital 2X400. Görüntü yüzeyden alınmıştır



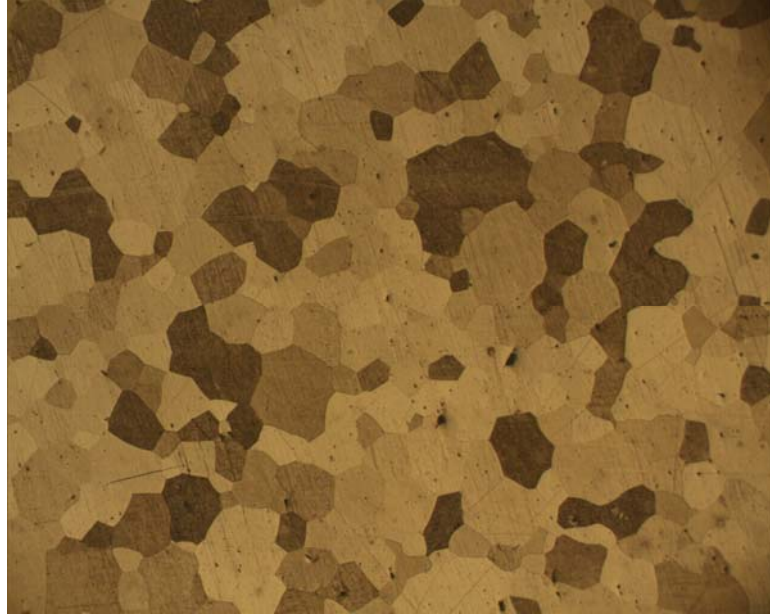
Şekil 4.11 6109 tipi %0,10–0,30 Si içeren elektrik motoru yapımına uygun laminasyon sacı. Nital 2X400. Görüntü kesitten alınmıştır



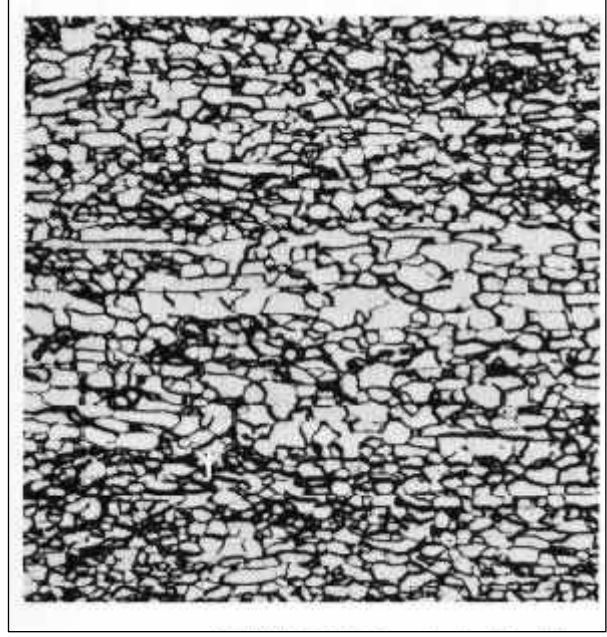
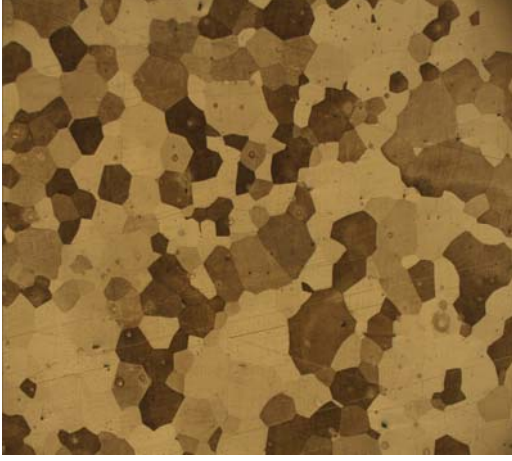
Şekil 4.12 %3 Si'li yassı haddelenmiş elektriksac (M22) %70 oranında 0.6 mm'ye indirilmiş. Yapı: ferrit taneleri haddeleme yönünde uzamış. %10 nital. X100(Altun,2007).



Şekil 4.13 815⁰C ‘deki nemli hidrojen atmosferinde dekarbürizasyon tavlaması ve kuru hidrojen atmosferinde 870⁰C‘de tane büyümesi için tavllanmış %10 nital. X100(Altun,2007)



Şekil 4.14 MGE Metal’den alınan %2,84 Si içeren M400 tip orijinal elektriksel çelik. Nital4 x100. Görüntü yüzeyden alınmıştır.(Altun,2007)

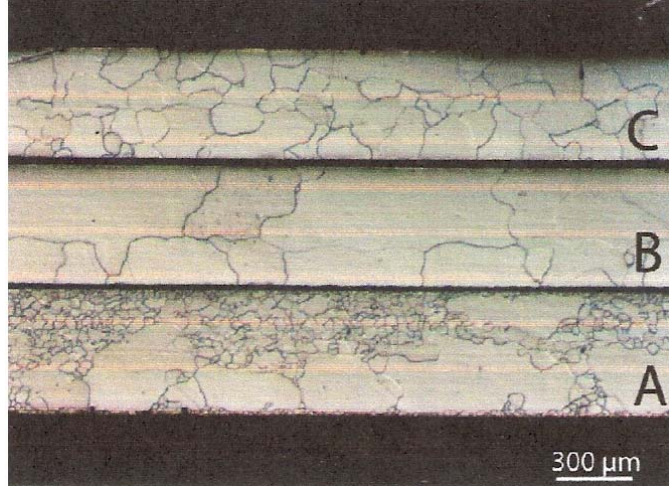


Şekil 4.15 %2,5 Si’li yassı haddelenmiş (M36) elektriksel çelik. elektriksel sac %70 oranında 6 mm kalınlığa soğuk haddelenmiş 830⁰C ‘de 2 dak. Tavlanmış daha ek olarak %10 daha temper haddelenmiş. Ferrit taneleri hafifçe uzamış, bazı tanelerin yüzeydeki baskısı açıkça görülüyor. %3 nital . X100. Birinci yapı ise %2,84 Si’li M400. %20 oranında 0,4 mm kalınlığa soğuk haddelenmiştir. (Altun,2007)

%1,3 silis içeren FeSi elektriksel çeliği 0,5mm kalınlığında laboratuvar ortamında %1-%10 ve aynı malzemenin son tavlaması yapılmış şekilde standart şartlara bağlı olarak haddelenmiş.

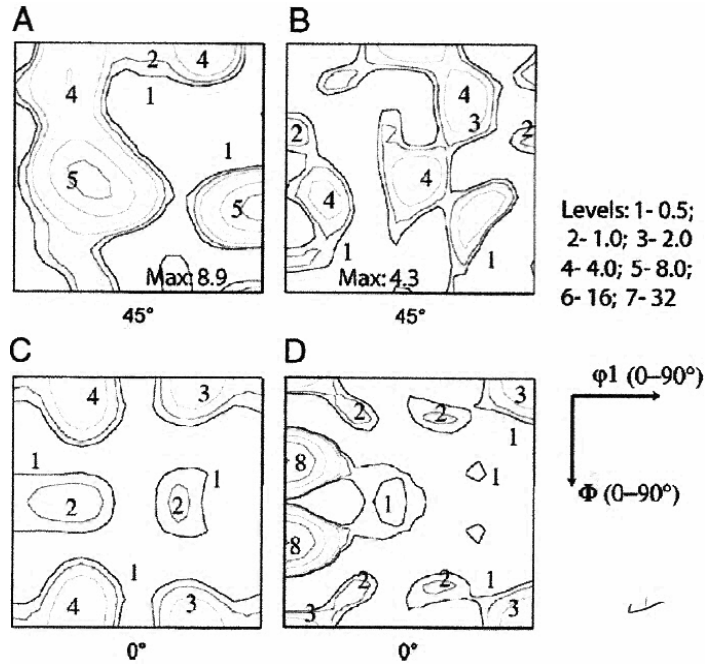
790C de 2 saat div point +35C son tane boyutu optik mikroskop kullanılarak doğrusal interception tekniğiyle ölçülmüştür.

Numunelerin kalınlık yüzeyleri backscattered elektron spektroskopisi aletiyle belirlenmiştir. (Sem cihazı) numunelerin yüzeyleri üzerindeki yapılar XR difraktometrisi ölçülmüştür. Temper haddelemeden ve tavlamadan sonraki tavlama yapısı deformasyon miktarına bağlıdır.



Şekil 4.16 Sıcak haddeleme sonrası farklı deformasyondaki üç numunenin mikroyapısı
Numunelere redüksiyon işlemi %1–4 arasında uygulandığı zaman tane boyutu çok geniş ve kompleks dağılıma sahip bir karakter göstermektedir. (Barros, 2007)

4.3 Haddeleme

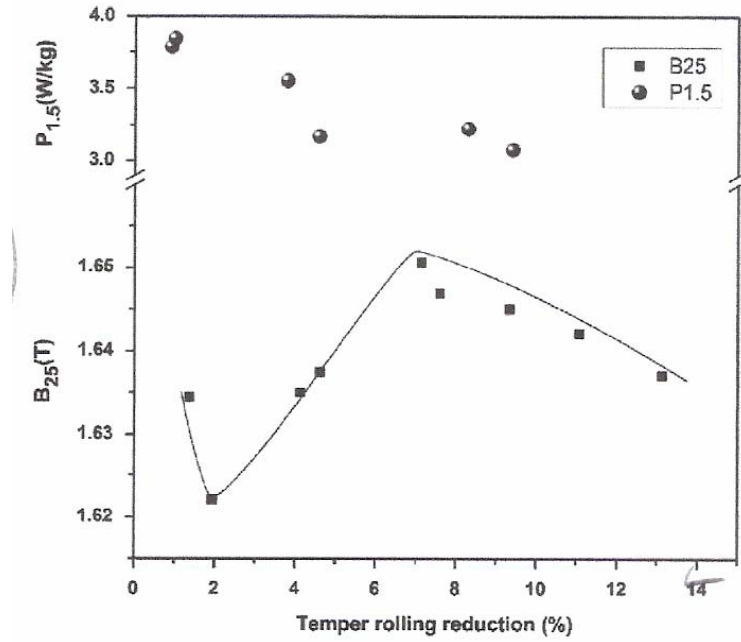


Şekil 4.17 Küçük ve büyük taneli alanlar için farklı kristolografik düzlemler
Bu mikro yapılar küçük ve büyük taneli alanlar için farklı kristolografik düzlemleri temsil etmektedir. (Barros, 2007)

Ayrıca; temper haddelemede haddeleme koşullarının etkileri millerin çapına, şeritin yüzey özelliklerine yağlama tipine ve beklendiği gibi bir de başlangıçtaki malzemenin tavlama

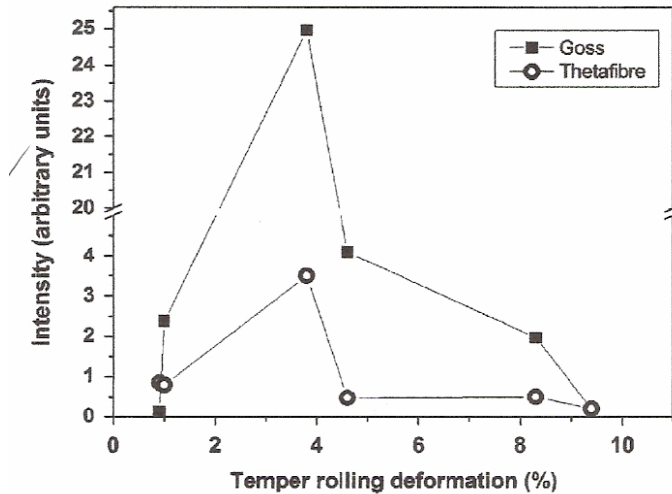
koşullarına bağlı olarak malzemeyi hazırlama koşullarıyla birlikte son mikro yapı ve tekstüre etki etmektedir.

Bölgesel düzensiz değişimlerin sonucu tane yapısı ve düşük deformasyon bölgesindeki tekstür, merdane üzerindeki malzemenin yüksek sertliğinden dolayı temper haddeleme sırasında depolanan enerji düzensiz değişimlere neden olabilir. (Şekil 4.18)



Şekil 4.18 Geçirgenlik ve güç kaybı (Barros, 2007)

B25 değeri %2 deformasyon değerinde %8'ine kadar artmaktadır. Bu sırada P 1,5 değeri düşerek %6 deformasyon oranında minimuma ulaşmaktadır.



Şekil 4.19 Sıcak haddeleme %deformasyon ve magnetik tekstür yoğunluk ilişkisi (Barros, 2007)

En uygun magnetik tekstürlerin yoğunluğu %4 ve üstü deformasyon oranlarıyla birlikte artmaktadır.

Fakat B25değerleri beklendiği ölçüde artmamıştır. Yarı mamül elektriksel çeliklerin geçirgenlik ve güç kaybı değerleri üretim parametrelerinden büyük ölçüde etkilenmektedir.

Anlaşılan ideal manyetik özelliklere %6 civarında temper haddeleme redüksiyon işlemiyle ulaşılabilir. B25 ve P1,5 değerlerine bağlı olarak ortaya çıkan tane boyutu ve magnetik tekstür ile ilgili özellikler mikroyapının heterojenliği ve tekstür yapısından kaynaklanmaktadır. Tane yapısını manyetik kayıplarla ilişkilendirme yöntemi ve B25, B50 manyetik tekstür değerleri beklendiği gibi sonuçlar vermemiştir. Bu yöntemler mikroyapıdaki düzensiz değişimleri ve tekstür yoğunlukları dikkate alınarak gözden geçirilmelidir.

Ek olarak tane boyutu dağılımı ve manyetik tekstürlerin manyetik davranış üzerine etkileri göz ardı edilmemelidir.

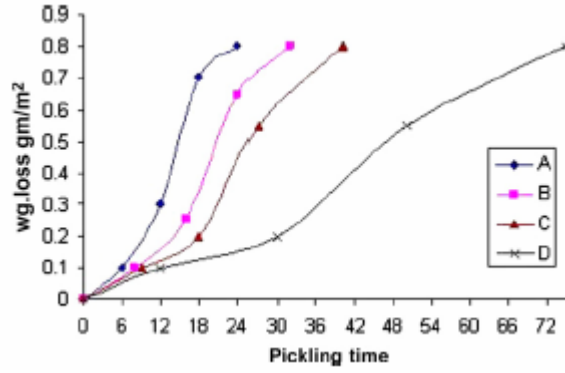
Dolayısıyla son tane boyutu ve tekstür komponentleri arasındaki ilişki ve etkileşim merak konusudur (Barros, 2007).

Çizelge 4.4Farklı çeliklerin kimyasal kompozisyonları(Chattopadhyay, 2008)

Steel	C	Mn	Si	Nb	Al	P	N (ppm)	S
A	0.035	0.15	0.06	–	0.05	0.012	40	0.01
B	0.08	1.33	0.30	0.04	0.04	0.012	40	0.01
C	0.075	1.35	0.54	0.04	0.04	0.023	40	0.01
D	0.27	1.60	2.0	0.005	0.021	0.021	40	0.01

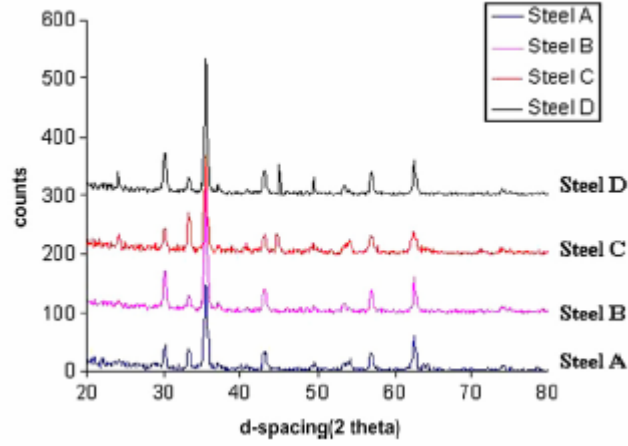
Bu deneysel çalışmada farklı Si içeriğine sahip çelikler dekape işlemine tabi tutulmuştur.

Asit çözeltisi 82 ± 1 C°ye ısıtılır ve deneysel çalışmaya her tüpün içindeki çözeltinin magnetik karıştırıcı kullanılarak karıştırılmasıyla devam edilir. Numuneler düşük asit banyosundan yüksek asit banyosuna geçmek suretiyle muamele edilir. Asitleme derecesi ağırlık kaybı ve yüzeyin incelenmesi ile değerlendirilir. (Chattopadhyay, 2008)



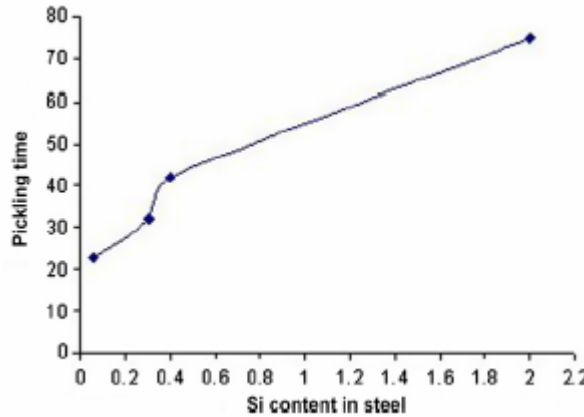
Şekil 4.20 Farklı çeliklerin dekapte edilebilme davranışı(Chattopadhyay, 2008)

Karşılaştırma yapılırsa; D çeliğinin dekapte süresi, diğer A çeliğine göre önemli derecede daha fazladır. Bu süre farklılığı oksit morfolojisinden kaynaklanmaktadır. Çalışma Şekil 2' de gösterildiği gibi tüm çeliklerin oksit tabakalarının XRD sonuçları ile devam etmiştir.



Şekil:4.21Farklı çeliklerdeki X-Ray difraksiyon çalışması.(Chattopadhyay, 2008)

XRD piklerine bakıldığında ise; bir çift durum hariç diğer şekillerin benzer davranışlar gösterdiği gözlenmiştir. 40 ve 50 ° arasında 2θ değerinde bazı ekstra pikler C ve D çeliklerinde belirlenmiştir. C ve D çelikerindeki bu extra piklerin $\text{Fe}_{2,44}\text{Si}_{0,55}\text{O}_4$ bileşimine sahip fayalit pikleri olduğu bulunmuştur.



Şekil:4.22Dekape kinetiğinin çelik içeriğindeki silis ile olan ilişkisi .(Chattopadhyay, 2008)

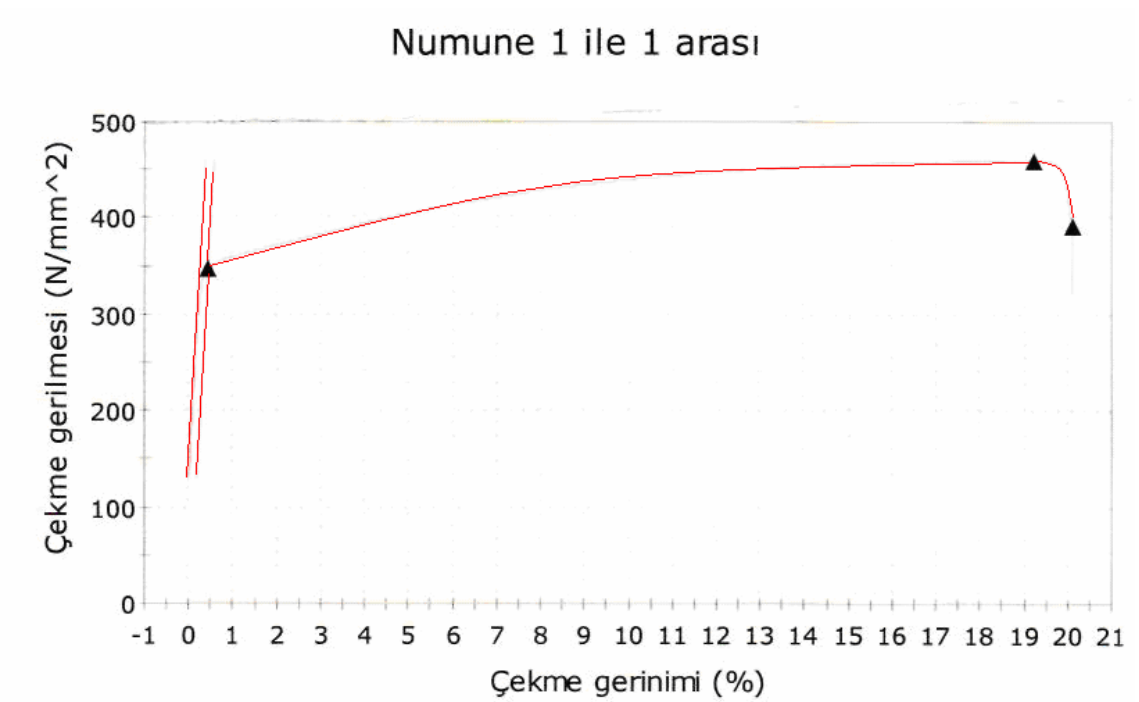
Sonuç olarak asitleme reaksiyon kinetiği, çoğunlukla oksit morfolojisine bağlıdır. Ve çelik içerisindeki silis içeriği oksit morfolojisini etkiler. Si içeriği %0,35'den fazla olduğunda

fayalit fazı baskın olur ve oksit morfolojisini etkiler. Bu durum difüzyonu önleyeceği için Si içeriğinin mümkün olduğunca az tutulması gereklidir.

4.4 Çekme Dayanımı

Çizelge 4.5 CCR-6112 çeliğinin (1 mm) çekme testi sonuçları (0,50x1000mm)

d0		A0	L0	LK	Fa ma	Re	Fmax	Rm	%δ
a	b	(mm ²)	(mm)	(mm)	kp(N)	kp/mm ² (N/mm ²)	kp(N)	kp/mm ² (N/mm ²)	
1.03	19.19	19.76	25	32.5	600	300	830	420	30



Şekil 4.23 MGE Metal'den alınan 0,50 mm orijinal M400 tip Silisli Sacın çekme testi eğrisi(0,50x1000mm) (Altun, 2007)

Çizelge 4.6 M400 çeliğinin (0,50 mm) çekme testi sonuçları(Altun, 2007)

	a0 (mm)	b0 (mm)	L0 (mm)	S0 (mm ²)	E-modülüs (N/mm ²)	Rp 0.2 (N/mm ²)	Rm (N/mm ²)
1	0,5	19,10	146,00	9,55	84959,15	346,63	459,75
Ortalama	0,5	19,10	146,00	9,55	84959,15	346,63	459,75
s	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
Min	0,5	19,10	146,00	9,55	84959,15	346,63	459,75
Maks	0,5	19,10	146,00	9,55	84959,15	346,63	459,75
R	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

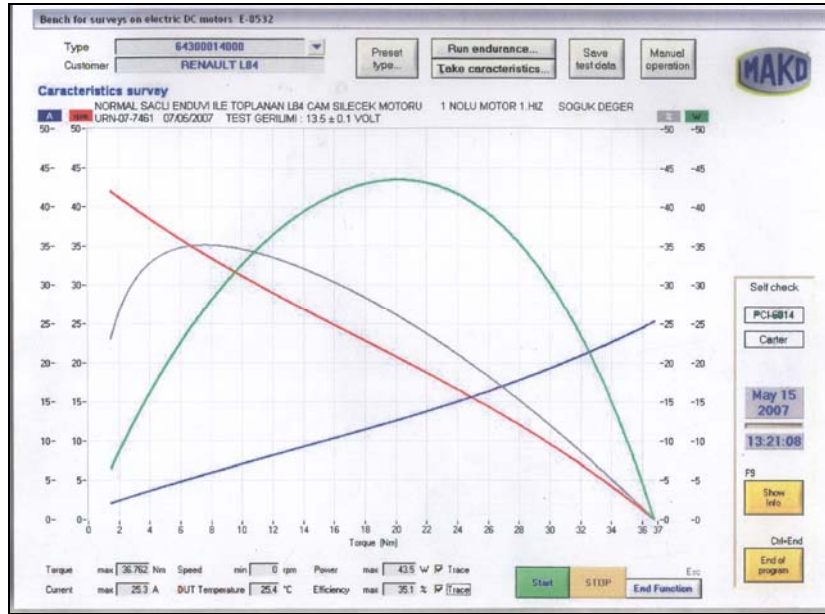
	Fm (N)	Ag (%)	A (%)
1	4390,60	19,78	20,09
Ortalama	4390,60	19,78	20,09
s	-----	-----	-----
Min	4390,60	19,78	20,09
Maks	4390,60	19,78	20,09
R	0,00	0,00	0,00

Çekme testi sonuçları incelendiğinde açıkça görülüyor ki, deformasyon oranı arttıkça çekme mukavemeti değerlerinde oldukça belirgin artışlar görülmektedir. %uzama değerlerinde ise yine deformasyon oranı arttıkça bir azalma görülmektedir. Akma mukavemetinde ise yine artan deformasyon oranlarında belirgin artışlar görülmektedir. (Altun, 2007)

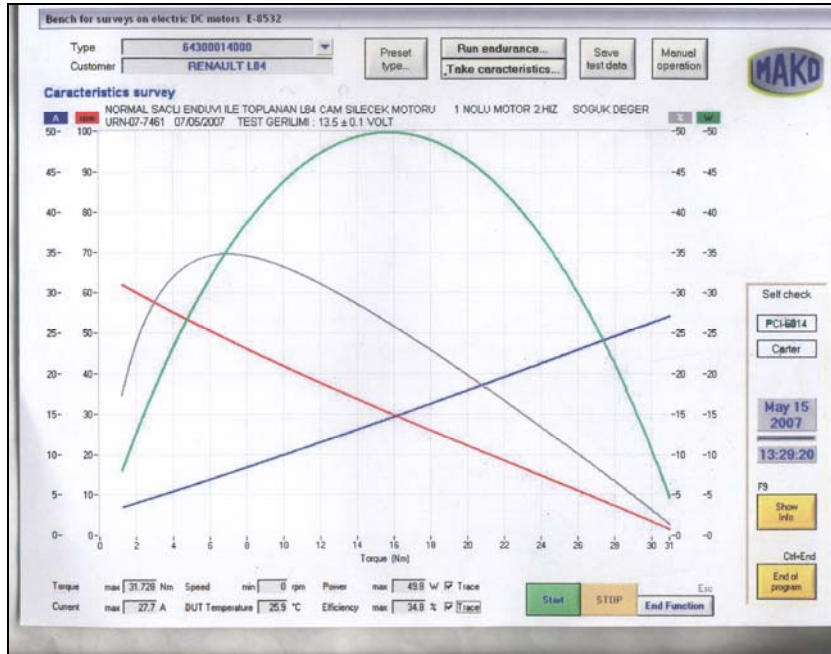
Çizelge 4.7 Çekme testi sonuçlarının değerlendirilmesi

Numune	Çekme muk. N/mm ²	Akma Muk. N/mm ²	% Uzama
0,50 mm	459,75	346,63	20,09

4.5 Performans Değerlendirmeleri



Şekil 4.24 Ereğli CCR-6112 tipi sac kullanılan endüvi ile toplanan L84 tipi cam silecek motoru 1 nolu motor 1.hız soğuk değer.



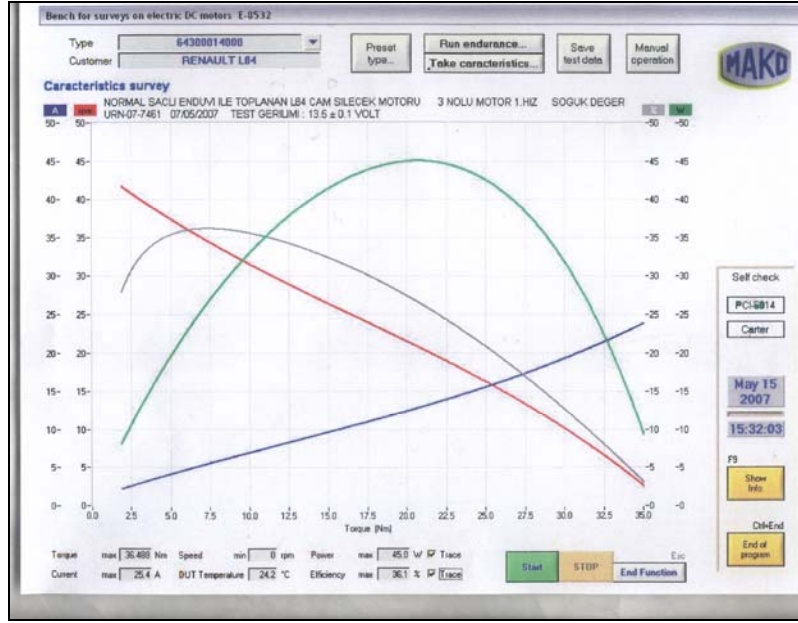
Şekil 4.25 Ereğli CCR-6112 tipi sac kullanılan endüvi ile toplanan L84 tipi cam silecek motoru 1 nolu motor 2.hız soğuk değer.



Şekil 4.26 Ereğli CCR-6112 tipi sac kullanılan endüvi ile toplanan L84 tipi cam silecek motoru 2 nolu motor 1.hız soğuk değer.



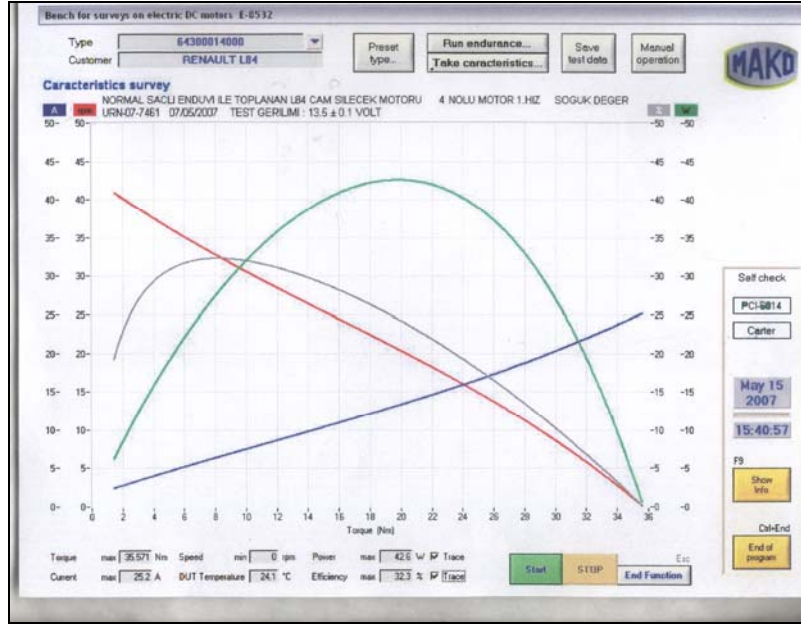
Şekil 4.27 Ereğli CCR-6112 tipi sac kullanılan endüvi ile toplanan L84 tipi cam silecek motoru 2 nolu motor 2.hız soğuk değer.



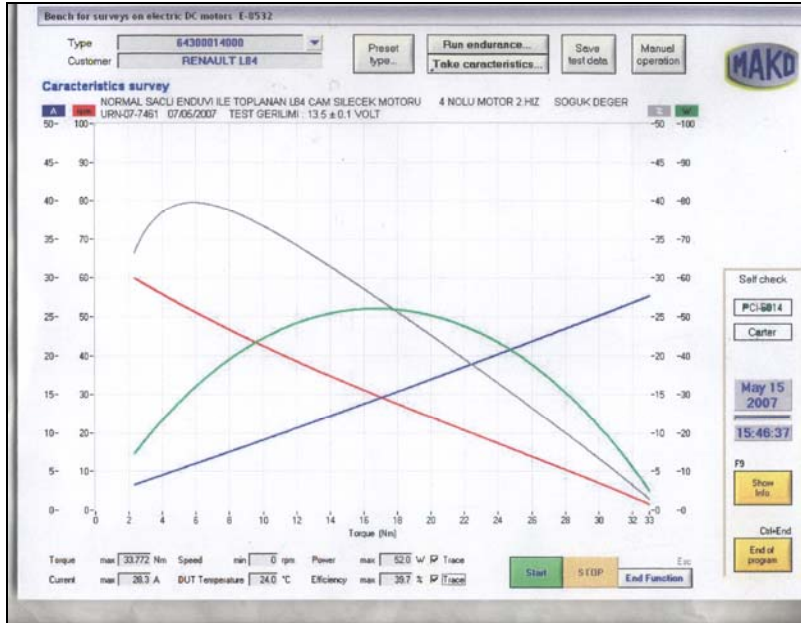
Şekil 4.28 Ereğli CCR–6112 tipi sac kullanılan endüvi ile toplanan L84 tipi cam silecek motoru 3 nolu motor 1.hız soğuk değer.



Şekil 4.29 Ereğli CCR–6112 tipi sac kullanılan endüvi ile toplanan L84 tipi cam silecek motoru 3 nolu motor 2.hız soğuk değer.



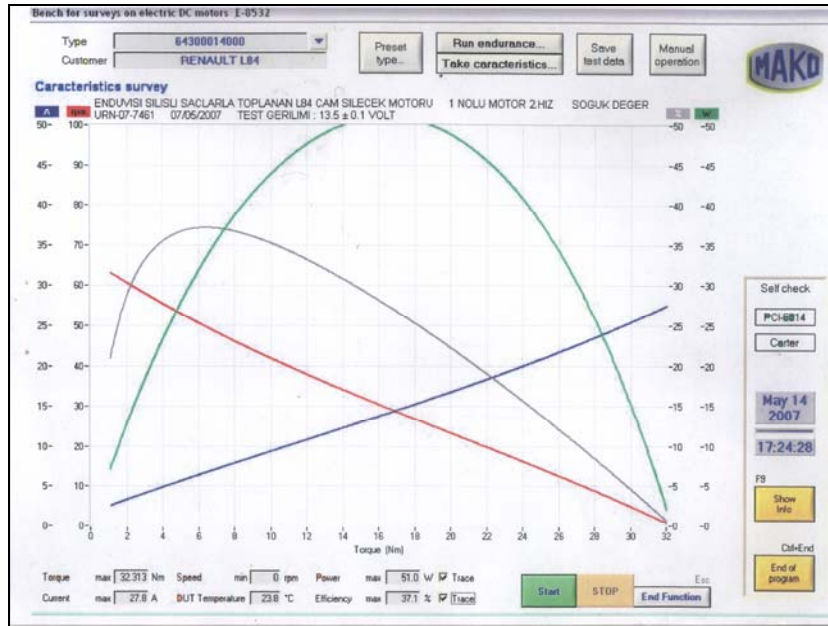
Şekil 4.30 Ereğli CCR–6112 tipi sac kullanılan endüvi ile toplanan L84 tipi cam silecek motoru 4 nolu motor 1.hız soğuk değer.



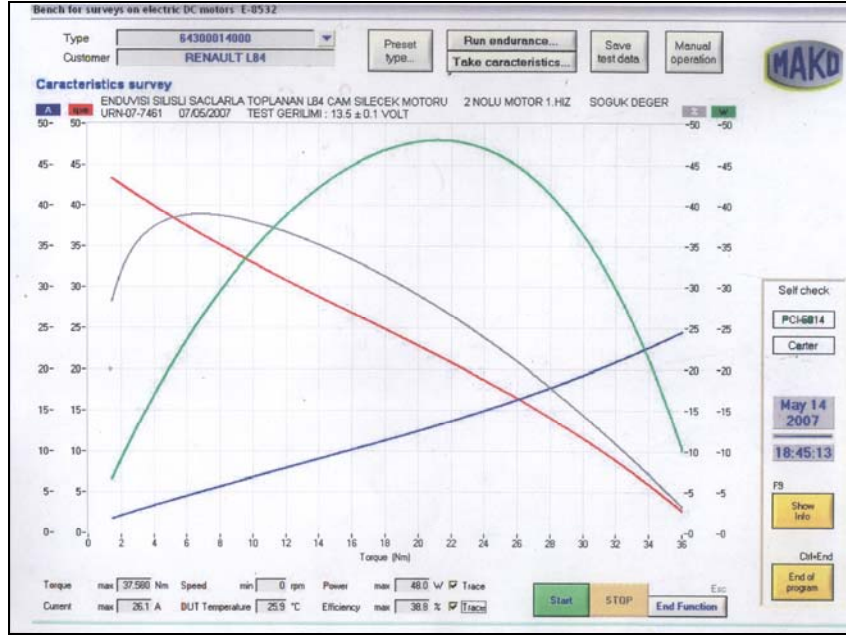
Şekil 4.31 Ereğli CCR–6112 tipi sac kullanılan endüvi ile toplanan L84 tipi cam silecek motoru 4 nolu motor 2.hız soğuk değer.



Şekil 4.32 Erdemir 6109 tipi laminasyon çeliği kullanılarak yapılan endüvi ile toplanan L84 cam silecek motoru 5 nolu motor 1.hız soğuk değer



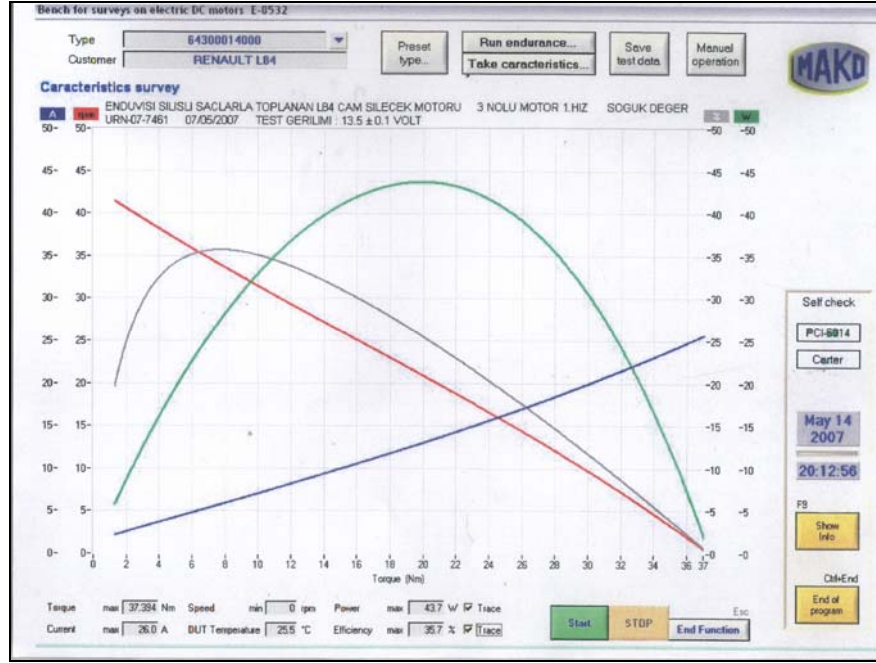
Şekil 4.33 Erdemir 6109 tipi laminasyon çeliği kullanılarak yapılan endüvi ile toplanan L84 cam silecek motoru 5 nolu motor 2.hız soğuk değer



Şekil 4.34 Erdemir 6109 tipi laminasyon çeliği kullanılarak yapılan endüvi ile toplanan L84 cam silecek motoru 6 nolu motor 1.hız soğuk değer.



Şekil 4.35 Erdemir 6109 tipi laminasyon çeliği kullanılarak yapılan endüvi ile toplanan L84 cam silecek motoru 6 nolu motor 2.hız soğuk değer



Şekil 4.36 Erdemir 6109 tipi laminasyon çeliği kullanılarak yapılan endüvi ile toplanan L84 cam silecek motoru 7 nolu motor 1.hız soğuk değer



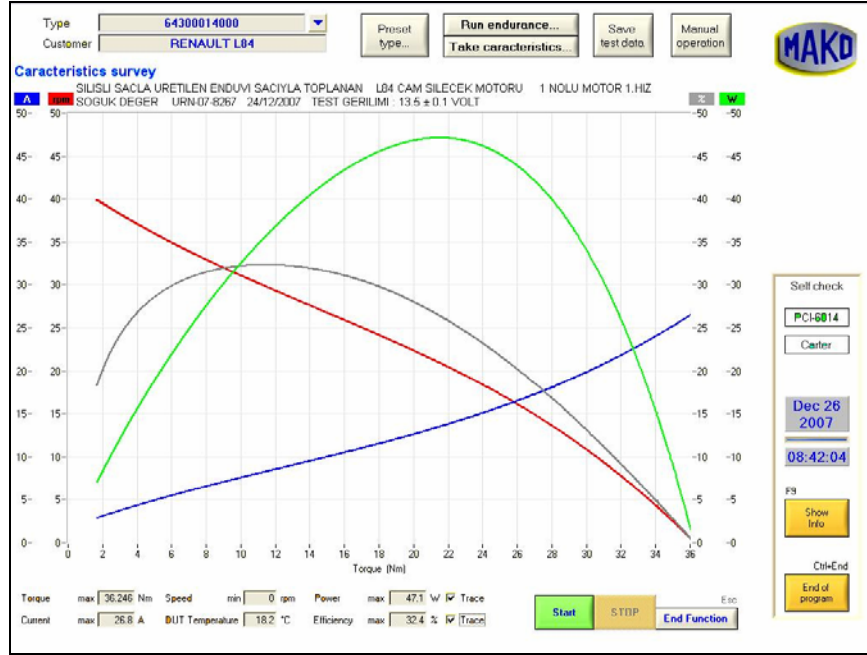
Şekil 4.37 Erdemir 6109 tipi laminasyon çeliği kullanılarak yapılan endüvi ile toplanan L84 cam silecek motoru 7 nolu motor 2.hız soğuk değer



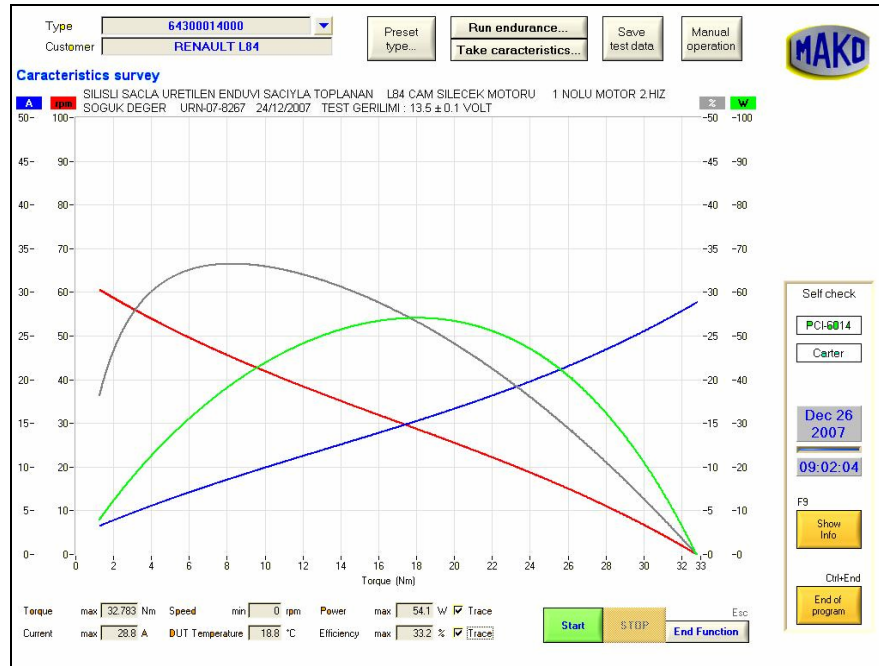
Şekil 4.38 Erdemir 6109 tipi laminasyon çeliği kullanılarak yapılan endüvi ile toplanan L84 tipi cam silecek motoru 8 nolu motor 1.hız soğuk değer.



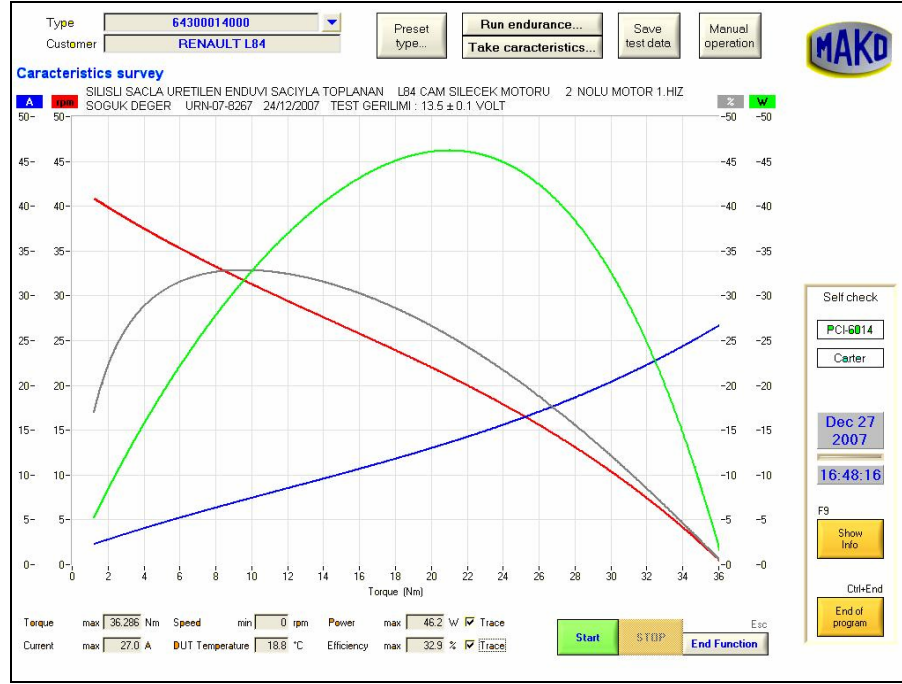
Şekil 4.39 Erdemir 6109 tipi laminasyon çeliği kullanılarak yapılan endüvi ile toplanan L84 cam silecek motoru 8 nolu motor 2.hız soğuk değer.



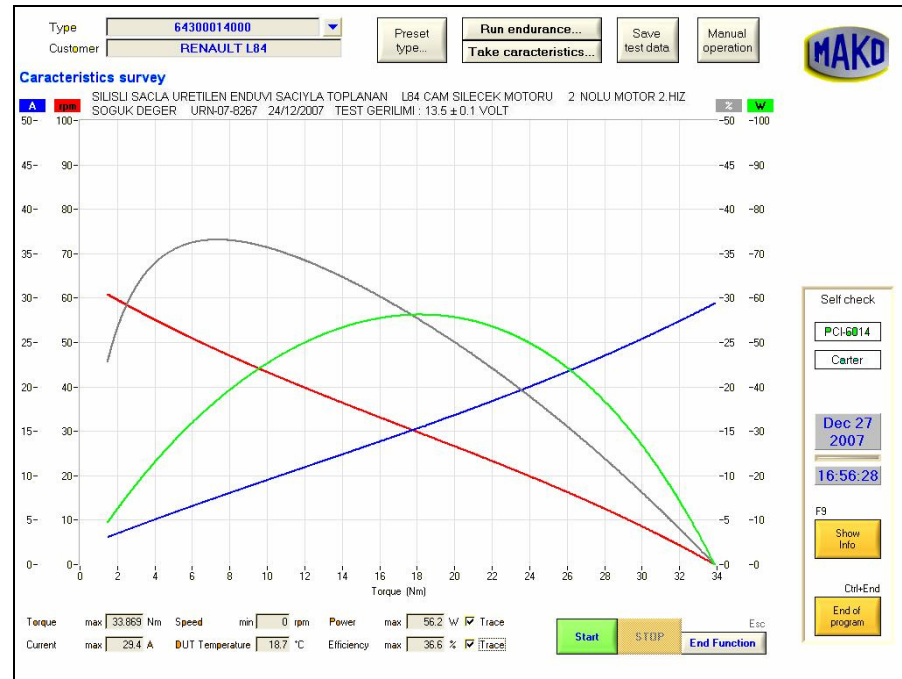
Şekil 4.40 M400 tipi silisli sacila üretilen, endüvi sacı ile toplanan L84 tipi cam silecek motoru 9 nolu motor 1.hız soğuk değer



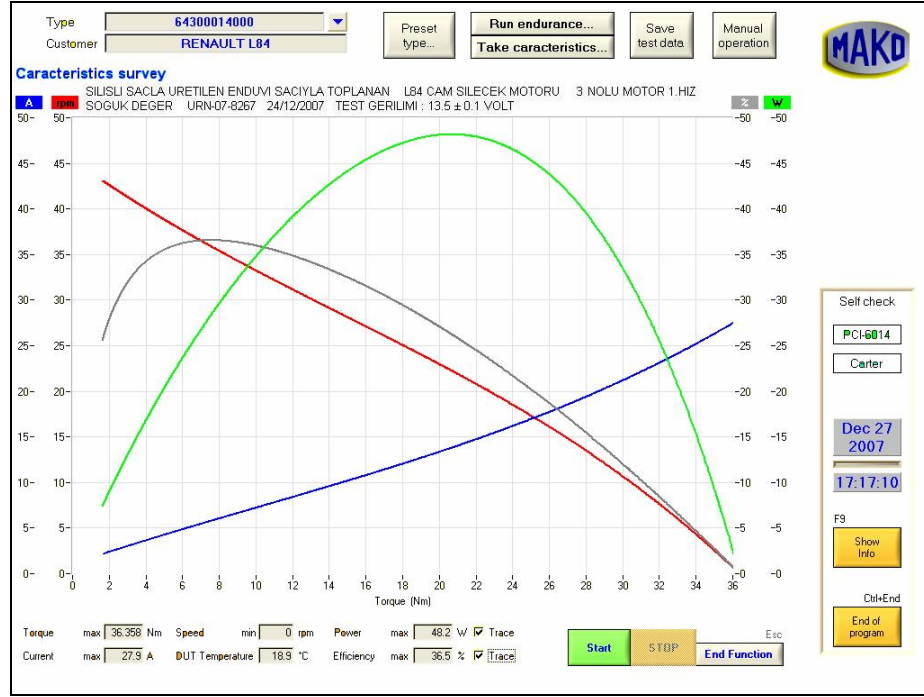
Şekil 4.41 M400 tipi silisli sacila üretilen, endüvi sacı ile toplanan L84 tipi cam silecek motoru 9 nolu motor 2.hız soğuk değer



Şekil 4.42 M400 tipi silisli sacla üretilen, endüvi sacı ile toplanan L84 tipi cam silecek motoru 10 nolu motor 1.hız soğuk değer



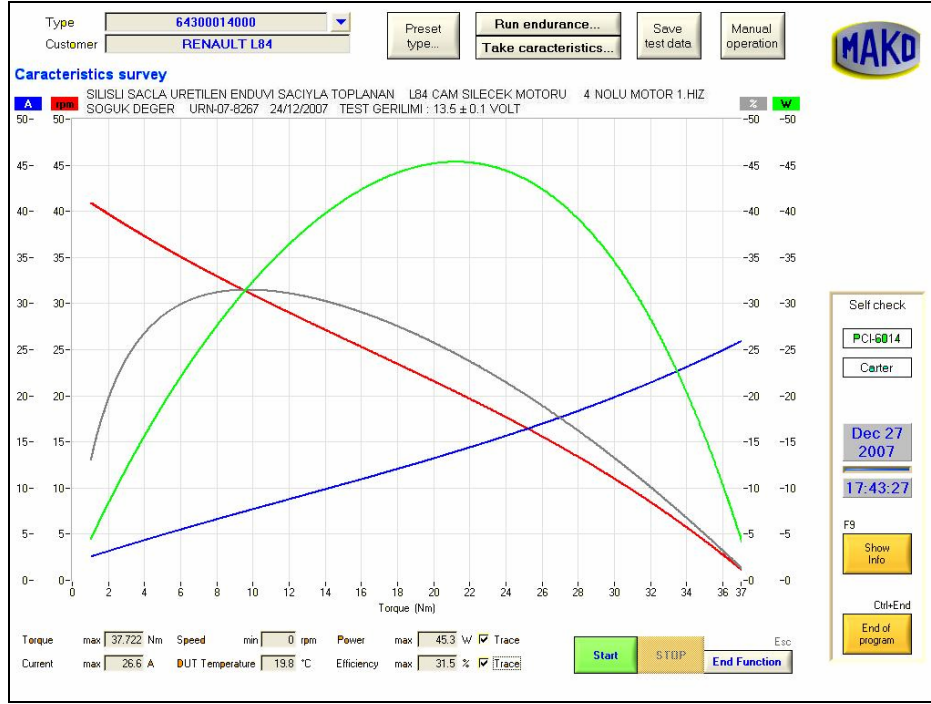
Şekil 4.43 M400 tipi silisli sacla üretilen, endüvi sacı ile toplanan L84 tipi cam silecek motoru 10 nolu motor 2.hız soğuk değer



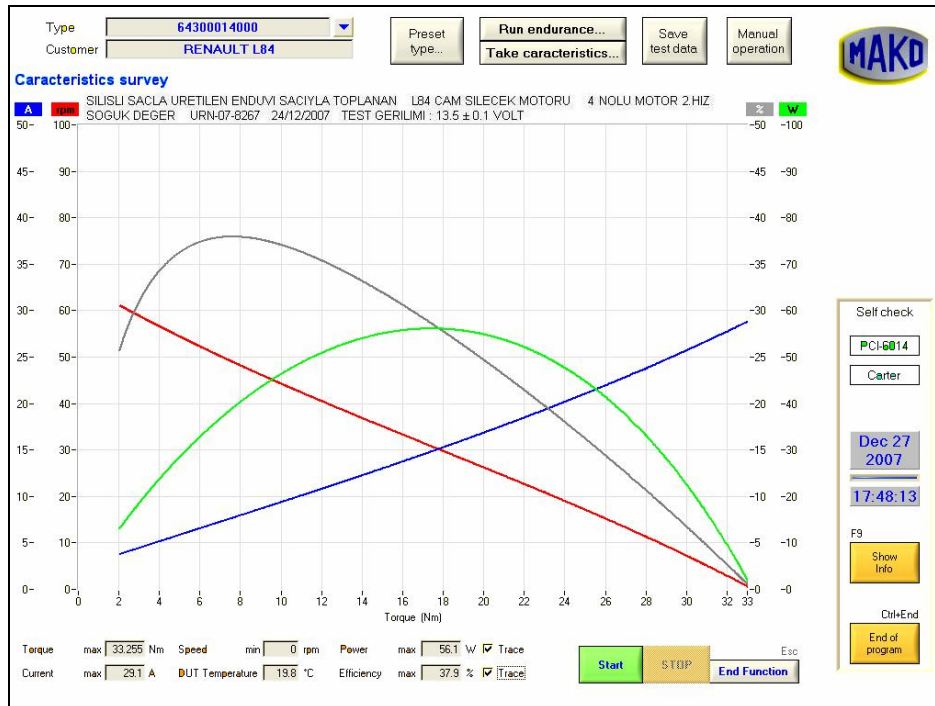
Şekil 4.44 M400 tipi silisli sacla üretilen, endüvi sacı ile toplanan L84 tipi cam silecek motoru 11 nolu motor 1.hız soğuk değer



Şekil 4.45 M400 tipi silisli sacla üretilen, endüvi sacı ile toplanan L84 tipi cam silecek motoru 11 nolu motor 2.hız soğuk değer



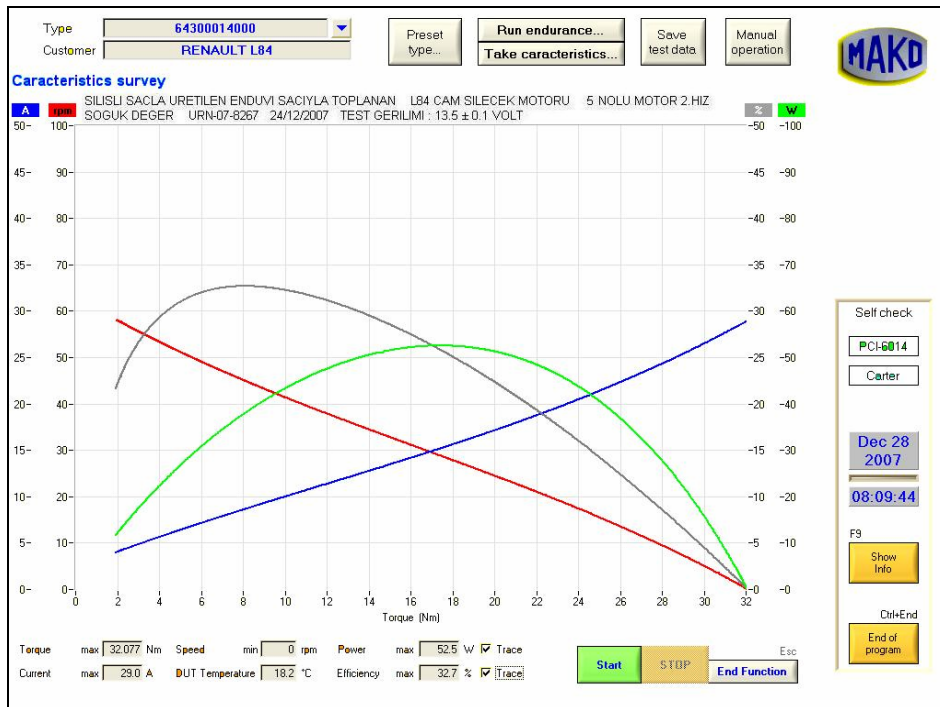
Şekil 4.46 M400 tipi silisli sacla üretilen, endüvi sacı ile toplanan L84 tipi cam silecek motoru 12 nolu motor 1.hız soğuk değer



Şekil 4.47 M400 tipi silisli sacla üretilen, endüvi sacı ile toplanan L84 tipi cam silecek motoru 12 nolu motor 2.hız soğuk değer



Şekil 4.48 M400 tipi silisli sacla üretilen, endüvi sacı ile toplanan L84 tipi cam silecek motoru 13 nolu motor 1.hız soğuk değer



Şekil 4.49 M400 tipi silisli sacla üretilen, endüvi sacı ile toplanan L84 tipi cam silecek motoru 13 nolu motor 2.hız soğuk değer

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

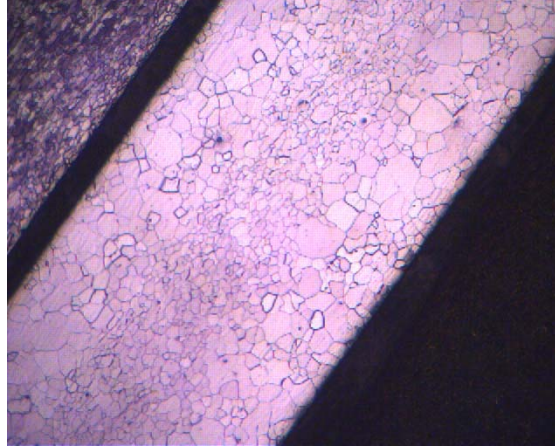
Otomotiv sektöründe silecek motoru olarak kullanılacak doğru akım motorları; % 2,84 Si (M400), % 0,019 Si (CCR-6112) ve % 0,1 -0,3Si (CCR-6109) içeren üç farklı malzemeden toplam 26 motor imal edilerek kimyasal analizin, mikro yapının, mekanik özelliklerin etkileri sabit tutularak performanslarındaki değişim araştırılmıştır.

5.1 Kimyasal Analizin Etkisi

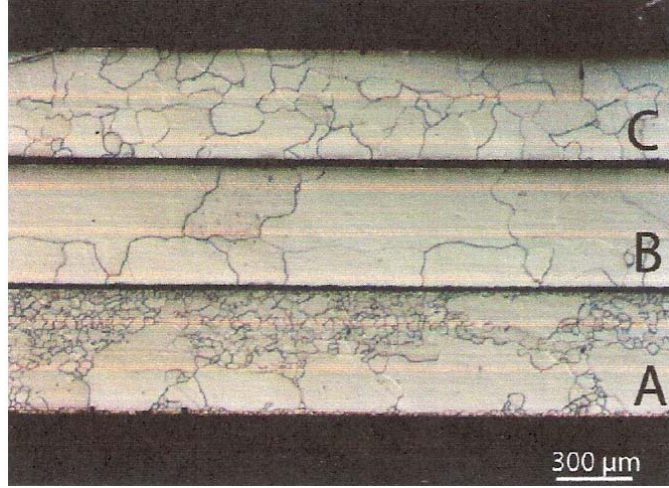
Çizelge 4.1, 4.2 ve 4.3 de verilen kimyasal analizlerden de görüldüğü gibi; düşük silisli(0,019 %Si), orta silisli(0,1-0,3 %Si) ve yüksek silisli (2,84%Si) çelik saclar optik foto spektrometre ile analiz edilmiştir.

5.2 Mikro Yapının Etkisi

Bu çelik sacların mikro yapıları numune hazırlama tekniğine göre zımparalanıp, parlatılıp, %4Ni ile dağlandıktan sonra, ışık mikroskobu ile incelendiğinde ferritik ve dokusundaki tanelerin şekli ve büyüklüğü belirlenmiştir. Haddedeleme hadde yönünde tanelerin uzadığı, enine kesite göre belirgin farklılıkların olduğu tespit edilmiştir. Kesitin kenarlarındaki tane yapısı ve şekli ile orta kısmı arasında da farklılıkların olduğu görülmüştür.



Şekil 5.1 6109 tipi %0,10–0,30 Si içeren elektrik motoru yapımına uygun laminasyon sacı. Nital 2X400. Görüntü kesitten alınmıştır.



Şekil 5.2%1,3 silis içeren FeSi elektriksel çeliği 0,5mm kalınlığında laboratuvar ortamında %1-%10 ve aynı malzemenin son tavlaması yapılmış şekilde standart şartlara bağlı olarak haddelenmiş. Sıcak haddeleme sonrası farklı deformasyondaki üç numunenin mikroyapısı Numunelere redüksiyon işlemi %1–4 arasında uygulandığı zaman tane boyutu çok geniş ve kompleks dağılıma sahip bir karakter göstermektedir. (Barros, 2007)

5.3 Dayanımın Etkisi

Çekme deneyi sonucu elde edilen 300 N/mm² akma, 420 N/mm² çekme dayanımı ve 30 kopma uzaması ile 460 N/mm² çekme dayanımı, 347 N/mm² akma ve %20 kopma uzaması silisin etkisini göstermektedir.

5.4. Performans Değişimi

Motorların performansı, kullanılan malzeme, motorun tipi, çeşiti göz önüne alınarak Eltra marka performans ölçüm cihazı ile Bursa Mako Elektrik Sanayi ve Ticaret A.Ş firmasında yapılmıştır. Her bir motora ait akım, gerilim, moment ve güç ayrı ayrı belirlenmiştir. Her bir malzemedan yapılmış motor hız kademesine soğuk ve sıcak çalışma koşullarına göre test edilmiştir. Yapılan bu testlerin sonuçları apsis(devir, akım, güç), ordinat (tork) değişkenlerini gösteren, mavi eğrinin akımı, egri eğrinin verimliliği, kırmızı eğrinin devri, yeşil eğrinin gücü temsil ettiği grafiklerden okunmuştur.

1. Şekil 4.24 Ereğli CCR–6112 tipi sac kullanılan endüvi ile toplanan L84 tipi cam silecek motoru 1 nolu motor 1.hız soğuk değer

Bu deneyin sonucunda; Şekil4.24 performans eğrisinde akım, devir, verimlilik ve gücün tork'a göre değişimi incelendiğinde minimum devir 0 rpm, maksimum tork 36,762 Nm iken; maksimum güç 43,5W maksimum verimlilik %35,1 max akım 25,3A olduğu görülmektedir.

2. Şekil 4.25 Ereğli CCR–6112 tipi sac kullanılan endüvi ile toplanan L84 tipi cam silecek motoru 1 nolu motor 2.hız soğuk değer.

Bu deneyin sonucunda; Şekil4.25 performans eğrisinde akım, devir, verimlilik ve gücün tork'a göre değişimi incelendiğinde minimum devir 0 rpm, maksimum tork 31,728 Nm iken; maksimum güç 49,8W maksimum verimlilik %34,8, maksimum akım 27,7A olduğu görülmektedir.

3. Şekil 4.26 Ereğli CCR–6112 tipi sac kullanılan endüvi ile toplanan L84 tipi cam silecek motoru 2 nolu motor 1.hız soğuk değer.

Bu deneyin sonucunda; Şekil4.26 performans eğrisinde akım, devir, verimlilik ve gücün tork'a göre değişimi incelendiğinde minimum devir 0 rpm, maksimum tork 35,924 Nm iken; maksimum güç 43,3W maksimum verimlilik %33,9 maksimum akım 25,0A olduğu görülmektedir.

4. Şekil 4.27 Ereğli CCR–6112 tipi sac kullanılan endüvi ile toplanan L84 tipi cam silecek motoru 2 nolu motor 2.hız soğuk değer.

Bu deneyin sonucunda; Şekil4.27 performans eğrisinde akım, devir, verimlilik ve gücün tork'a göre değişimi incelendiğinde minimum devir 0 rpm, maksimum tork 30,354 Nm iken; maksimum güç 50,0W maksimum verimlilik %34,7 maksimum akım 27,4A olduğu görülmektedir.

5. Şekil 4.28 Ereğli CCR–6112 tipi sac kullanılan endüvi ile toplanan L84 tipi cam silecek motoru 3 nolu motor 1.hız soğuk değer.

Bu deneyin sonucunda; Şekil4.28 performans eğrisinde akım, devir, verimlilik ve gücün tork'a göre değişimi incelendiğinde minimum devir 0 rpm, maksimum tork 36,488 Nm iken; maksimum güç 45,0W maksimum verimlilik %36,1 maksimum akım 25,4A olduğu görülmektedir.

6. Şekil 4.29 Ereğli CCR–6112 tipi sac kullanılan endüvi ile toplanan L84 tipi cam silecek motoru 3 nolu motor 2.hız soğuk değer.

Bu deneyin sonucunda; Şekil4.29 performans eğrisinde akım, devir, verimlilik ve gücün tork'a göre değişimi incelendiğinde minimum devir 0 rpm, maksimum tork 31,308 Nm iken; maksimum güç 51,3W maksimum verimlilik %32,0 maksimum akım 28,9A olduğu görülmektedir.

7. Şekil 4.30 Ereğli CCR–6112 tipi sac kullanılan endüvi ile toplanan L84 tipi cam silecek motoru 4 nolu motor 1.hız soğuk değer.

Bu deneyin sonucunda; Şekil4.30 performans eğrisinde akım, devir, verimlilik ve gücün tork'a göre değişimi incelendiğinde minimum devir 0 rpm, maksimum tork 35,571 Nm iken; maksimum güç 42,6W maksimum verimlilik %32,3 maksimum akım 25,2A olduğu görülmektedir.

8. Şekil 4.31 Ereğli CCR–6112 tipi sac kullanılan endüvi ile toplanan L84 tipi cam silecek motoru 4 nolu motor 2.hız soğuk değer.

Bu deneyin sonucunda; Şekil4.31 performans eğrisinde akım, devir, verimlilik ve gücün tork'a göre değişimi incelendiğinde minimum devir 0 rpm, maksimum tork 33,772 Nm iken; maksimum güç 52,0W maksimum verimlilik %39,7 maksimum akım 28,3A olduğu görülmektedir.

9. Şekil 4.32 Erdemir 6109 tipi laminasyon çeliği kullanılarak yapılan endüvi ile toplanan L84 cam silecek motoru 5 nolu motor 1.hız soğuk değer

Bu deneyin sonucunda; Şekil4.32 performans eğrisinde akım, devir, verimlilik ve gücün tork'a göre değişimi incelendiğinde minimum devir 0 rpm, maksimum tork 36,612 Nm iken; maksimum güç 46,6W maksimum verimlilik %40,1 maksimum akım 25,8A olduğu görülmektedir.

10. Şekil 4.33 Erdemir 6109 tipi laminasyon çeliği kullanılarak yapılan endüvi ile toplanan L84 cam silecek motoru 5 nolu motor 2.hız soğuk değer

Bu deneyin sonucunda; Şekil4.33 performans eğrisinde akım, devir, verimlilik ve gücün tork'a göre değişimi incelendiğinde minimum devir 0 rpm, maksimum tork 32,313 Nm iken; maksimum güç 51,0W maksimum verimlilik %37,1 maksimum akım 27,8A olduğu görülmektedir.

11. Şekil 4.34 Erdemir 6109 tipi laminasyon çeliği kullanılarak yapılan endüvi ile toplanan L84 cam silecek motoru 6 nolu motor 1.hız soğuk değer.

Bu deneyin sonucunda; Şekil:4.34 performans eğrisinde akım, devir, verimlilik ve gücün tork'a göre değişimi incelendiğinde minimum devir 0 rpm, maksimum tork 37,580 Nm iken; maksimum güç 48,0W maksimum verimlilik %38,8 maksimum akım 26,1A olduğu görülmektedir.

12. Şekil 4.35 Erdemir 6109 tipi laminasyon çeliği kullanılarak yapılan endüvi ile toplanan L84 cam silecek motoru 6 nolu motor 2.hız soğuk değer

Bu deneyin sonucunda; Şekil4.35 performans eğrisinde akım, devir, verimlilik ve gücün tork'a göre değişimi incelendiğinde minimum devir 0 rpm, maksimum tork 31,147 Nm iken; maksimum güç 54,8W maksimum verimlilik %38,0 maksimum akım 28,7A olduğu görülmektedir.

13. Şekil 4.36 Erdemir 6109 tipi laminasyon çeliği kullanılarak yapılan endüvi ile toplanan L84 cam silecek motoru 7 nolu motor 1.hız soğuk değer

Bu deneyin sonucunda; Şekil4.36 performans eğrisinde akım, devir, verimlilik ve gücün tork'a göre değişimi incelendiğinde minimum devir 0 rpm, maksimum tork 37,394 Nm iken; maksimum güç 43,7W maksimum verimlilik %35,7 maksimum akım 26,0A olduğu görülmektedir.

14. Şekil 4.37 Erdemir 6109 tipi laminasyon çeliği kullanılarak yapılan endüvi ile toplanan L84 cam silecek motoru 7 nolu motor 2.hız soğuk değer

Bu deneyin sonucunda; Şekil4.37 performans eğrisinde akım, devir, verimlilik ve gücün tork'a göre değişimi incelendiğinde minimum devir 0 rpm, maksimum tork 30,800 Nm iken; maksimum güç 52,1W maksimum verimlilik %35,4 maksimum akım 28,9A olduğu görülmektedir.

15. Şekil 4.38 Erdemir 6109 tipi laminasyon çeliği kullanılarak yapılan endüvi ile toplanan L84 cam silecek motoru 8 nolu motor 1.hız soğuk değer.

Bu deneyin sonucunda; Şekil4.38 performans eğrisinde akım, devir, verimlilik ve gücün tork'a göre değişimi incelendiğinde minimum devir 0 rpm, maksimum tork 36,165 Nm iken; maksimum güç 42,5W maksimum verimlilik %35,2 maksimum akım 25,3A olduğu görülmektedir.

16. Şekil 4.39 Erdemir 6109 tipi laminasyon çeliği kullanılarak yapılan endüvi ile toplanan L84 cam silecek motoru 8 nolu motor 2.hız soğuk değer.

Bu deneyin sonucunda; Şekil4.39 performans eğrisinde akım, devir, verimlilik ve gücün tork'a göre değişimi incelendiğinde minimum devir 0 rpm, maksimum tork 31,354 Nm iken; maksimum güç 51,2W maksimum verimlilik %36,2 maksimum akım 28,5A olduğu görülmektedir.

17. Şekil 4.40 M400 tipi silisli sacı üretilen, endüvi sacı ile toplanan L84 tipi cam silecek motoru 9 nolu motor 1.hız soğuk değer

Bu deneyin sonucunda; Şekil4.40 performans eğrisinde akım, devir, verimlilik ve gücün tork'a göre değişimi incelendiğinde minimum devir 0 rpm, maksimum tork 36,246 Nm iken; maksimum güç 47,1W maksimum verimlilik %32,4 maksimum akım 26,8A olduğu görülmektedir.

18. Şekil 4.41 M400 tipi silisli sacı üretilen, endüvi sacı ile toplanan L84 tipi cam silecek motoru 9 nolu motor 2.hız soğuk değer

Bu deneyin sonucunda; Şekil4.41 performans eğrisinde akım, devir, verimlilik ve gücün tork'a göre değişimi incelendiğinde minimum devir 0 rpm, maksimum tork 32,783 Nm iken; maksimum güç 54,1W maksimum verimlilik %33,2 maksimum akım 28,8A olduğu görülmektedir.

19. Şekil 4.42 M400 tipi silisli sacı üretilen, endüvi sacı ile toplanan L84 tipi cam silecek motoru 10 nolu motor 1.hız soğuk değer

Bu deneyin sonucunda; Şekil4.42 performans eğrisinde akım, devir, verimlilik ve gücün tork'a göre değişimi incelendiğinde minimum devir 0 rpm, maksimum tork 36,286 Nm iken; maksimum güç 46,2W maksimum verimlilik %32,9 maksimum akım 27,0A olduğu görülmektedir.

20. Şekil 4.43M400 tipi silisli sacı üretilen, endüvi sacı ile toplanan L84 tipi cam silecek motoru 10 nolu motor 2.hız soğuk değer

Bu deneyin sonucunda; Şekil4.43 performans eğrisinde akım, devir, verimlilik ve gücün tork'a göre değişimi incelendiğinde minimum devir 0 rpm, maksimum tork 33,869 Nm iken; maksimum güç 56,2W maksimum verimlilik %36,6 maksimum akım 29,4A olduğu görülmektedir.

21. Şekil 4.44 M400 tipi silisli sacı üretilen, endüvi sacı ile toplanan L84 tipi cam silecek motoru 11 nolu motor 1.hız soğuk değer

Bu deneyin sonucunda; Şekil4.44 performans eğrisinde akım, devir, verimlilik ve gücün tork'a göre değişimi incelendiğinde minimum devir 0 rpm, maksimum tork 36,358 Nm iken; maksimum güç 48,2W maksimum verimlilik %36,5 maksimum akım 27,9A olduğu görülmektedir.

22. Şekil 4.45 M400 tipi silisli sacı üretilen, endüvi sacı ile toplanan L84 tipi cam silecek motoru 11 nolu motor 2.hız soğuk değer

Bu deneyin sonucunda; Şekil4.45 performans eğrisinde akım, devir, verimlilik ve gücün tork'a göre değişimi incelendiğinde minimum devir 0 rpm, maksimum tork 34,604 Nm iken; maksimum güç 58,0W maksimum verimlilik %42,5 maksimum akım 30,3A olduğu görülmektedir.

23. Şekil 4.46M400 tipi silisli sacı üretilen, endüvi sacı ile toplanan L84 tipi cam silecek motoru 12 nolu motor 1.hız soğuk değer

Bu deneyin sonucunda; Şekil:4.46 performans eğrisinde akım, devir, verimlilik ve gücün tork'a göre değişimi incelendiğinde minimum devir 0 rpm, maksimum tork 37,722 Nm iken; maksimum güç 45,3W maksimum verimlilik %31,5 maksimum akım 26,6A olduğu görülmektedir.

24. Şekil 4.47 M400 tipi silisli sacı üretilen, endüvi sacı ile toplanan L84 tipi cam silecek motoru 12 nolu motor 2.hız soğuk değer

Bu deneyin sonucunda; Şekil4.47 performans eğrisinde akım, devir, verimlilik ve gücün tork'a göre değişimi incelendiğinde minimum devir 0 rpm, maksimum tork 33,255 Nm iken; maksimum güç 56,1W maksimum verimlilik %37,9 maksimum akım 29,1A olduğu görülmektedir.

25. Şekil 4.48 M400 tipi silisli sacı üretilen, endüvi sacı ile toplanan L84 tipi cam silecek motoru 13 nolu motor 1.hız soğuk değer

Bu deneyin sonucunda; Şekil4.48 performans eğrisinde akım, devir, verimlilik ve gücün tork'a göre değişimi incelendiğinde minimum devir 0 rpm, maksimum tork 37,589 Nm iken; maksimum güç 43,5W maksimum verimlilik %29,9 maksimum akım 26,2A olduğu görülmektedir.

26. Şekil 4.49 M400 tipi silisli sacı üretilen, endüvi sacı ile toplanan L84 tipi cam silecek motoru 13 nolu motor 2.hız soğuk değer

Bu deneyin sonucunda; Şekil4.49 performans eğrisinde akım, devir, verimlilik ve gücün tork'a göre değişimi incelendiğinde minimum devir 0 rpm, maksimum tork 32,077 Nm iken; maksimum güç 52,5W maksimum verimlilik %32,7 maksimum akım 29,0A olduğu görülmektedir.

Çizelge 5.1 Performans Değerleri Karşılaştırması

Soğuk Değer	Verimlilik	CCR-112 Tipi %0,019 Si içeren 1mm Kalınlıktaki Sac									
		1nolu motor		2nolu motor		3nolu motor		4nolu motor			
		1.hız	2.hız	1.hız	2.hız	1.hız	2.hız	1.hız	2.hız		
		43,5	49,8	43,3	50	45	51,3	42,6	52		
		35,1	34,8	33,9	34,7	36,1	32	32,3	39,7		
Soğuk Değer	Güç	6109 Tipi 0,30 Si içeren 0,65mm Kalınlıktaki Sac									
		5nolu motor		6nolu motor		7nolu motor		8nolu motor			
	1.hız	2.hız	1.hız	2.hız	1.hız	2.hız	1.hız	2.hız			
	46,6	51	48	54,8	43,7	52,1	42,5	51,2			
	Verimlilik	40,1	37,1	38,8	38	35,7	35,4	35,2	36,2		
Soğuk Değer	Güç	M400 Tipi %2,84 Si İçeren 0,50mm Kalınlıktaki Sac									
		9nolu motor		10nolu motor		11nolu motor		12nolu motor		13nolu motor	
	1.hız	2.hız	1.hız	2.hız	1.hız	2.hız	1.hız	2.hız	1.hız	2.hız	
	47,1	54,1	46,2	56,2	48,2	58	45,3	56,1	43,5	52,5	
	Verimlilik	32,4	33,2	32,9	36,6	36,5	42,5	31,5	37,9	29,9	32,7

Sonuç olarak; yukarıdaki çizelgeden de görüleceği üzere, 11 nolu motorda 1.Hız soğuk değerinde %48,2 ile 11 nolu motor 2.Hız soğuk değerinde %58 oranında en fazla güç M400 tipi silisli sac ile üretilen elektrik motorundan elde edilmiştir.

Verimlilik ise, 5 nolu motor 1.Hız soğuk değerinde %40.1olarak 6109 tipi silisli sac ile üretilen elektrik motorundan elde edilirken, 11 nolu motor ile 2.Hız soğuk değerinde %42,5 olarak en fazla M400 tipi silisli sac kullanılarak üretilen elektrik motorundan elde edilmiştir.

Daha ince kalınlıklara inilebilseydi verim ve buna bağlı değerler daha yüksek bulunabilirdi. Daha yüksek silis içerikli saclar kullanılabilirse daha iyi sonuçlar elde edilebilir. Malzemeler daha düşük oranda karbon içerirse daha yüksek oranda haddelemelere gidilebilir. Silisyum elementi soğuk haddeleme prosesi için bir dezavantaj olmakla beraber manyetik özellikler yönünde avantajlıdır. Bu yüzden silisyum elementinden vazgeçemeyiz. Bunun içinde

iyileştirilmesi gereken proses soğuk haddelemedir. Dokudaki tane şekilleri daha uzun haddeleme hatları oluşturulmalıdır. Kaliteli ve silisli çeliklere uygun merdaneler kullanılarak haddeleme sırasında oluşan bazı istenmeyen yüzey çatlamları, yırtılma ve şekil bozukluklarını önlemeye yönelik çalışmalar gerekli görülmektedir. Bu çalışmada bu tür hatalar incelenmemiştir. İçyapı hatalarını ve haddeleme koşullarını yeni araştırmalarla inceleyerek iyileştirme yapılması gerekmektedir.

KAYNAKLAR

- Altun, A., (2007), Silisyumlu Çeliklerin Soğuk Haddelenebilirliğinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ Kimya-Metalurji Fakültesi.
- Barros, J. ve Targhetta, A., (2007), “Effect of Temper Rolling on The Texture Formation and Magnetic Properties of Non-Oriented Semi Processed Electrical Steel”, (866–867), Germany.
- Chaudhury, A. ve Khatirkar, R., (2007), “Low Silicon Non-Grain-Oriented Electrical Steel: Linking Magnetic Properties with Metallurgical Factors” (23–27), India.
- Chattopadhyay, A. ve Chanda, T., (2008), “Rol of Silicon on Oxide Morphology and Pickling Behaviour of Automotive Steels”(1-3), India.
- Duman, H., (1989), Elektrik Makinelerinin Kayıpları ve Teorisi. (203–244–314)
- Genç, A., (2007), Yüksek Silisyumlu Çeliklerin Üretimi ve Özelliklerinin Araştırılması, Lisans Tezi, YTÜ Kimya-Metalurji Fakültesi.
- Gorican, V. ve Hamler, A., (2000) “Measurement of Magnetic Properties of Grain Oriented Silicon Steel Using Round Rotational Single Sheet Tester” (2314-2316), Slovenia.
- Huang, BY. ve Yamamoto, K., (2000) “Effect of Cold Rolling on Magnetic Properties Of Non Oriented Silicon Steel Sheets” (197-2000), Japan.
- Lloyd, C.T., (1969), Electric Motors And Their Applications. (Chapter 7, 14)
- Tacer E., (2005), “Elektromekanik Enerji Dönüşümü” , İTÜ Elektronik Fakültesi, İstanbul.
- Taşkıran İ.A., (2003), Alaşımsız Düşük Karbonlu Çelikten Soğuk Haddeli Sacların Kalitesini Etkileyen Faktörlerin İncelenmesi, Doktora Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü.

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi	16.02.1982	
Doğum yeri	Bursa	
Lise	1996–2000	Bursa Cumhuriyet Lisesi
Lisans	2001–2005	Afyon Kocatepe Üniversitesi Mühendislik Fak. Seramik Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans	2006–2008	Yıldız Teknik Üniversitesi Kimya-Metalurji Fak. Metalurji ve Malzeme Müh., Üretim Anabilim Dalı

Çalıştığı kurumlar

2005–2007	Bursa Seramik Yapı ve Taah. Ltd Şti.
2007-Devam ediyor	Bodycote Istaş Isıl İşlem Sanayi ve Ticaret A.ş
Kalite Yöneticisi	