

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

**RÜZGAR TÜRBİNİ DÖKÜMLERİNDE HASSAS METALÜRJİK DEĞİŞKENLERİN
OPTİMİZASYONU**

ERDOĞDU GÜZEL

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
METALÜRJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ÜRETİM PROGRAMI**

**DANIŞMAN
PROF. DR. AHMET EKERİM**

İSTANBUL, 2012

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**RÜZGAR TÜRBİNİ DÖKÜMLERİNDE HASSAS METALÜRJİK DEĞİŞKENLERİN
OPTİMİZASYONU**

Erdoğdu GÜZEL tarafından hazırlanan tez çalışması 13.08.2012 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Prof. Dr. Ahmet EKERİM
Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Ahmet EKERİM
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Cemalettin YAMAN
Yıldız Teknik Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Burcu Didem ÇORBACIOĞLU
Yıldız Teknik Üniversitesi

Bu alışma, Sanayi ve Ticaret Bakanlığınca desteklenen 00453 STZ.2009-2 numaralı SANTEZ projesi kapsamında yapılmıştır.

Bu tezin hazırlanmasında yardımlarını, hoşgörüsünü ve yol göstericiliğini ve bilgi birikimini esirgemeyen değerli tez danışmanım Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölüm Başkanı Sayın Prof. Dr. Ahmet EKERİM'e, desteğinden dolayı Araştırma Görevlisi Sayın Dr. Özkan ŞEN'e ve Uzman Yahya BAYRAK'a, çalışmalarımızı gerçekleştirmemiz için tüm imkanlarını sunan İğrek Makine A.Ş'ne ve T.C Bilim, Sanayi Ve Teknoloji Bakanlığı'na ve çalışma boyunca maddi ve manevi desteğini benden esirgemeyen değerli eşim Nuriye GÜZEL teşekkürlerimi sunarım.

Ağustos, 2012

Erdoğan GÜZEL

ÖNSÖZ.....	iii
İÇİNDEKİLER	iv
SİMGE LİSTESİ	viii
ŞEKİL LİSTESİ.....	x
ÇİZELGE LİSTESİ	xiv
ÖZET	xv
ABSTRACT	xvii
GİRİŞ.....	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	2
1.3 Hipotez	3
DÜNYADA VE TÜRKİYE’DE RÜZGAR ENERJİSİ	5
RÜZGAR TÜRBİNİ YAPISI VE BİLEŞENLERİ	8
3.1 Rüzgar Türbinlerinin Sınıflandırılması	9
3.1.1 Dikey Eksenli Rüzgar Türbinleri.....	9
3.1.1.1 Darrieus tipi rüzgar türbinleri	10
3.1.1.2 Savonius tipi rüzgar türbinleri.....	11
3.1.2 Yatay Eksenli Rüzgar Türbinleri.....	11
3.1.2.1 Tek Kanatlı Rüzgar Türbinleri	13
3.1.2.2 Çift Kanatlı Rüzgar Türbinleri	14
3.1.2.3 Üç Kanatlı Rüzgar Türbinleri.....	15
3.2 Rüzgar Türbini Bileşenleri	16
3.2.1.1 Kanatlar	17
3.2.1.2 Kule.....	18
3.2.1.3 Kanat Döndürme Mekanizması (Pitch)	18

3.2.1.4	Fren	19
3.2.1.5	Dişli Kutusu.....	20
3.2.1.6	Jeneratör	20
3.2.1.7	Kontrol Kutusu	20
3.2.1.8	Anemometre Ve Rüzgar Gülü	20
3.2.1.9	Rota Mekanizması Ve Motoru (Yaw)	21
3.2.1.10	Rotor Göbeği (HUB).....	22
3.3	Rüzgar Türbini Pervane Göbeği Üretimi İçin Malzeme Seçimi	24
DÖKME DEMİRLER		27
4.1	Dökme Demirin Tanımı	27
4.2	Dökme Demirlerin Sınıflandırılması	30
KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİR		34
5.1	Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Yapısal ve Mühendislik Özellikleri	35
5.1.1.1	Dökme demirin mikro yapısal özellikleri.....	35
5.1.1.2	Grafit	35
5.2	Mikro Yapı	37
5.3	Küresel Grafitli Dökme Demir Üretimi.....	38
5.3.1	Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Sınıflandırılması	46
5.3.1.1	Ferritik KGDD.....	48
5.3.1.2	Ferritik – Perlitik KGDD	48
5.3.1.3	Perlitik KGDD	48
5.4	Mekanik Özellikler	49
5.4.1	Aşınma direnci	50
5.4.2	Mukavemet	50
5.4.3	Süneklik	51
5.4.4	Dökülebilirlik	52
5.4.5	Darbe direnci.....	52
5.4.6	Basınca dayanım	52
5.4.7	Çekme Dayanımı	52
5.4.8	Elastisite Modülü	54

RÜZGAR TÜRBİNİ DÖKÜMLERİNDE HASSAS METALÜRJİK DEĞİŞKENLER.....	56
6.1 Ferritik Küresel Grafitli Dökme Demir Standartları.....	57
6.2 Kimyasal Bileşim.....	60
6.2.1.1 Karbon	61
6.2.1.2 Silisyum	61
6.2.1.3 Manganez.....	62
6.2.1.4 Kükürt.....	63
6.2.1.5 Fosfor	63
6.2.1.6 Bakır	63
6.2.1.7 Magnezyum.....	63
6.2.1.8 Eser Elementlerin Dökme Demire Etkisi	65
6.3 Aşılama.....	69
6.3.1.1 Aşılamanın Önemli Faydaları	71
6.3.1.2 Aşı Alaşım Bileşimi.....	71
6.3.1.3 Aşılama Mekanizmaları	73
6.3.1.4 Aşılama Uygulamaları.....	75
6.3.1.4.1 Potada Aşılama	76
6.3.1.4.2 Döküm akışında aşılama	77
6.3.1.4.3 Kalıpta aşılama	77
6.3.1.5 Aşı Etkisinin Azalması	77
6.3.1.6 Küresel grafitli dökme demir Dökümde Aşılama Seçimi.....	79
6.3.1.7 Kalın Kesitlerin Aşılama	80
6.3.1.7.1 Pota Aşısı.....	81
6.3.1.7.2 Kalıpta aşılama	82
Döküm yolluk girişine yerleştirilen tabletler.....	82
Yolluk sistemine yerleştirilen tabletler	83
6.4 Magnezyum Tretman Prosesleri.....	84
6.4.1 Küresel Grafitli Dökme Demir Döküm Pota Tretman Proseslerinde Magnezyum İlavesi Ve Verimini Etkileyen Faktörler	86
6.4.2 Küresel grafitli dökme demir Dökümde Magnezyum Miktarı	88

6.5	Küreselleştirme	90
6.5.1	Küreselleştirici Seçimi	91
6.5.1.1	Sandwich Pocket Prosesi.....	93
6.5.1.2	Kalıpta Küreselleştirme	95
6.5.1.3	Tundish Potada Küreselleştirme	96
6.5.2	Küreselleşmenin Bozulması	99
6.5.2.1	Magnezyum etkisinin azalması	100
6.5.2.2	Aşıl原因 etkisinin azalması	101
6.6	Ergitme ve Döküm	102
6.7	Kesit Kalınlığı (Soğuma Hızı)	103
6.7.1.1	Kesit Kalınlığının Mekanik Özelliklere Etkisi	104
6.7.1.2	Kesit Kalınlığı İle Kimyasal Bileşimin Etkileşimleri	108
6.7.1.3	Kalın Kesitlerin Dökümü	112
	DENEYSEL ÇALIŞMALAR	114
7.1	Üretim Prosesi.....	114
7.2	Kimyasal Bileşim.....	115
7.3	Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi	115
7.3.1	Çekme Deneyi	117
7.3.2	Çentik Darbe Testleri	119
7.3.3	Sertlik İncelenmesi.....	121
7.4	Mikro Yapısal İnceleme.....	121
7.5	Kesit Değişiminin Etkisinin Belirlenmesi	125
7.5.1	Rüzgar Türbini Pervane Göbeği Üretimi	131
	ÖZGEÇMİŞ	144
	YAYINLARI	145

α Alfa

λ Kanat Uç Hızı Oranı

KISALTMA LİSTESİ

BCIRA	British Cast Iron Researchlı Association
CFRP	Karbon Fibiyle Kuvvetlendirilmiş Plastik(Carbon Fibre Reinforced Plastic)
CG	Kompakt (solucan) grafit
DERT	Düşey Eksenli Rüzgar Türbinleri
FG	Lamel Grafit
GRP	Cam Takviyeli Plastik (Glass Reinforced Plastic)
INCO	Uluslararası Nikel Birliği (International Nikel Company)
NACA	Havacılık Ulusal Danışma Komitesi RTRüzgar Türbini
RE	Rare Elementleri(Yeryüzü, eser)
SG	Küresel Grafit
TG	Temper Grafit
YAW	Rota Mekanizması Ve Motoru
YERT	Yatay Eksenli Rüzgar Türbinleri

	Sayfa
Şekil 2. 1 a)2011 yılı sonunda Dünyada toplam kurulu rüzgar enerjisi kapasitesi b)2011 yılı içerisinde yeni kurulan kapasite	5
Şekil 2.2 Dünya üzerinde mevcut kurulu rüzgar enerjisi	6
Şekil 2.3 Bandırmadaki rüzgar türbinleri	7
Şekil 2.4 Türkiye’de kurulan toplam kapasitenin yıllara göre gelişimi.	7
Şekil 3.1 Dikey Eksenli Rüzgar Türbinleri	10
Şekil 3.2 Darrieus tipi rüzgar türbini	11
Şekil 3.3 Yatay Eksenli Rüzgar Türbinleri	13
Şekil 3.4 Tek kanatlı rüzgar türbini.....	14
Şekil 3.5 Çift kanatlı rüzgar türbini.....	15
Şekil 3.6 Üç kanatlı rüzgar türbini	16
Şekil 3.7 Yatay eksenli rüzgar türbinin bileşenleri	17
Şekil 3.8 Pitch mekanizması	19
Şekil 3.9 Rüzgar gülü	21
Şekil 3.10 Yaw Mekanizması	22
Şekil 3.11 Farklı tasarıma sahip rotor göbekleri	23
Şekil 3.12 Rüzgar türbini dökümünde kullanılabilen malzemelerin özelliklerinin karşılaştırılması.	25
Şekil 4.1 Genel ticari dökme demir elde etmek için temel mikroyapı ve işlemleri	29
Şekil 4.2 Dökme Demirlerin Sınıflandırılması.....	33
Şekil 5.1 Çeşitli dökme demirler ve çelik için C ve Si içeriğinin değişimi	35
Şekil 5.2 Temper dökme demirin içyapısındaki küresel grafitler (a) ve gri dökme demirin içyapısındaki yaprak şekilli grafitler (b).....	36
Şekil 5.3 Soğuma hızının dökme demir yapısına olan etkisi	38
Şekil 5.4 Fe-C-Si denge diyagramı % 2.5 seviyesindeki yüksek sıcaklık bölgesi.	41
Şekil 5.5 Fe-C denge diyagramı (Kesik Çizgiler Demir-Grafit Sistemi)	42
Şekil 5.6 Ötektik altı KGDD’in tipik ideal ve gerçek soğuma eğrileri.....	43
Şekil 5.7 Küresel grafitli dökme demirler ferrit gelişim kademeleri.	45

Şekil 5.8 (a) Küresel grafitli dökme demirlerde mikro yapı katılaşma başlangıcı	
(b) Küresel grafitli dökme demirlerde mikro yapı katılaşmasının tamamlanması.....	46
Şekil 5.9 KGDD’lerde sertlik ve dayanım arasındaki ilişki	51
Şekil 5.10 Ferritik ve Perlitik KGDD ile Gri DD ve çeliğin elastik ve akma davranışı	53
Şekil 5.11 Sünek malzemeler için tipik uzama- gerilme eğrisi	54
Şekil 6.1 Küresel grafitli dökme demir üretimine etki eden parametreler.....	60
Şekil 6.2 Dökme demir üretimi için yaygın olarak kullanılan C-Si oranları.	62
Şekil 6.3 Mikro yapı görüntüleri (100X) (a) Aşılammamış gri dökme demirin grafit yapısı	
(b) Aşılammamış gri dökme demirin grafit katılaşması (c) Aşılammamış dökme demir	
dökümünün mikroyapısı (d) Aşılammış dökme demir dökümünün mikroyapısı.....	70
Şekil 6.4 Ferrosilisyum bazlı aşılایıcının reaktif element miktarının malzemenin	
verimine etkisi (örneğin nodül sayısı ya da çil oluşumunun azaltılması).....	73
Şekil 6.5 (a) Sfero dökümde sülfid/oksit mikro inklüzyonu (b) X-içeren ferrosilisyum aş	
ile aşılamadan sonra bir inklüzyonun şematik gösterimi (X=Ca, Sr ya da Ba)	74
Şekil 6.6 (a) Çekirdek sayısında (mikroinklüzyonlar) zamanla azalma (b) Aşı etkisi	
kaybının karakteristik özellikleri.	78
Şekil 6.7 Kalıp içerisindeki aşılamada kullanılan tabletin şekli ve boyutları	82
Şekil 6.8 Döküm yolluk girişine yerleştirilen tablet.....	83
Şekil 6.9 Yolluk sistemine yerleştirilen tabletler	83
Şekil 6.10 Ticari sfero döküm tretman prosesleri için “reaksiyon şiddeti”, “magnezyum	
verimi”, “toz ve cüruf oluşumu” ve “aşılama etkisi” parametreleri arasındaki ilişkinin	
şematik gösterimi.	85
Şekil 6.11 Sfero döküm pota tretmanında MgFeSi ilavesini etkileyen faktörler.	88
Şekil 6.12 Tretman görmüş sfero dökümde Magnezyumun uzun bekleme esnasındaki	
azalması (sol), tretman potasında magnezyum kayıplarının şematik gösterimi (sağ). ..	89
Şekil 6.13 Bekletme esnasında nodül sayısındaki azalmanın şematik gösterimi. İkinci bir	
aşılایıcı ilavesi, magnezyum içeriğinin devamlı düşmesine rağmen tamamen küresel	
grafit yapıların tekrar kazanılmasını sağlar.	90
Şekil 6.14 Magnezyum Ferrosilisyum alaşımı seçimini etkileyen proses değişkenleri ...	92
Şekil 6.15 Sürekli Tretman için Küreselleştiriciler	92
Şekil 6.16 Alaşım ve kaplama malzemesiyle Sandviç prosesi.	94

Şekil 6.17 Kalıpta magnezyum tretman proses çiziminin tipik örneği. Genel dizayn kuralları: A = sistem tıkaçı, B = A+10%, C = A+12%, D = E = A+30%.....	96
Şekil 6.18 Tandış örtülü potanın şematik görünümü.....	97
Şekil 6.19 Sülfür içeriği, tretman sıcaklığı ve pota dizayn modifikasyonlarının bir fonksiyonu olarak verim artırmanın şematik sunumu.....	99
Şekil 6.20 KGDD'lerde Mg ve aşılama yağına bağlı olarak mikro yapıdaki değişimler.....	100
Şekil 6.21 Katılma hızı(süresi) ile mm ² 'deki küre sayısının değişimi	104
Şekil 6.22 Mekanik özelliklerle kesit kalınlığı arasındaki ilişki.	106
Şekil 6.23 Dökme demirin soğuma eğrisi sistematığı	107
Şekil 6.24 Farklı kesit kalınlıkları için tavsiye edilen (CE).	108
Şekil 6.25 Farklı kesit kalınlıklarındaki dökme demirlerde Si ve Mn Ferrit/perlit bileşimine etkisi	109
Şekil 6.26 Artan kesit kalınlığı ile birlikte çeşitli seviyelerdeki Mn ve düşük seviyede Si içeren dökme demirlerin ferrit ve perlit değişimleri	110
Şekil 6.27 Düşük Mn(0,08-0,09) içeren Dökme demirlerde kesit kalınlığı ile Si içeriğinin ferrit % olan etkisi	111
Şekil 6.28 Çeşitli bileşimlerde Si ve tavsiye edilen Mn miktarı ile kesit kalınlığı arasındaki ilişki.	112
Şekil 7.1 TS 526 EN 1563 standardına göre ayrı dökülmüş Y blok.....	116
Şekil 7.2 Mohr-Federhaff Universal çekme-basma makinesi	118
Şekil 7.3 Numuneye ait çekme eğrisi ve elde edilen değerler.....	119
Şekil 7.4 Mohr-Federhaff çentik darbe test cihazı.....	120
Şekil 7.5 Görüntü analiz cihazında mikro yapı incelemesi küre sayısının tayini.	122
Şekil 7.6 Dökümü yapılmış olan rüzgar türbini numunesinin mikro yapısı(X100)	122
Şekil 7.7 ASTM Standartlarına göre küresel dökme demirlerdeki küre sayısının sınıflandırılması(X100).	123
Şekil 7.8 Dökümü yapılmış olan rüzgar türbini numunesinin dağlanmış mikro yapısı(X100).....	124
Şekil 7.9 Basamaklı döküm numunesi.....	125
Şekil 7.10 Basamak dökümün a) kesit ölçüleri, b) dökümden sonraki görüntüleri	126
Şekil 7.11 Basamaklı dökümden elde edilen numunelerin mikro yapı görüntüleri	127

Şekil 7.12 Küresel grafitli dökme demirin farklı kesit kalınlıklardaki mikro yapıları (nital 2 ile dağlanmış, 100x) ; a) 12,7mm, b) 25,4mm, c) 38,1mm, d) 50,8mm, e) 63,5mm ve f) 76,2mm.....	127
Şekil 7.13 Kesit kalınlığının küre sayısına olan etkisi.....	129
Şekil 7.14 Kesit kalınlığı ile % Ferrit miktarının değişimi.....	129
Şekil 7.15 Kesit kalınlığının sertliğe olan etkisi.....	130
Şekil 7.17 Ergiyik metali potaya alma işlemi.....	132
Şekil 7.18 Pota içerisindeki ergiyik metale uygulanan Mg treatmentı (Sandwich Prosesi)	132
Şekil 7.19 Mg işlemi sırasında Mg ile tepkime sonucu çıkan parlak ışık (Mg parlaması)	133
Şekil 7.20 Mg işleminden sonra Cüruf alma işlemi	134
Şekil 7.21 Cüruf alındıktan sonra döküm hattına transfer edilen potaların kalıba dökümü	134
Şekil 7.22 İğrek Makine A.Ş de dökme demirden dökülen örnek prototip pervane göbeğinin döküm sonrası görüntüsü	135
Şekil 7.23Dökümü yapılan prototip rüzgar türbin göbeğinin farklı görüntüsü.....	136
Şekil 7.24 Dökümü yapılmış olan prototip rüzgar türbin göbeğine ait mikroyapı görüntüleri	136

Çizelge 1 Ticari isim, mikroyapı ve kırılmaya göre dökme demirlerin sınıflandırılması..	32
Çizelge 2 Tipik Mg küreselleştirme alaşımları ve kullanılan ekleme yöntemleri.	40
Çizelge 3 TS 526 göre Küresel Dökme Demirlerin sınıflandırılması	47
Çizelge 4 DIN 1693'e göre Küresel Dökme Demirlerin sınıflandırılması	47
Çizelge 5 Küresel grafitli dökme demirin mekanik özellikleri	50
Çizelge 6 Rüzgar Türbinlerinde uygulamalarında kullanılan ferritik dökme demirin mekanik özellikleri	57
Çizelge 7 Çeşitli Küresel Grafitli Dökme Demirlerin dokusal ve mekanik özellikleri.....	58
Çizelge 8 Çeşitli Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Uluslararası eşdeğer standartları ..	58
Çizelge 9 Ferritik dokuya sahip dökme demirin kimyasal bileşimi.	59
Çizelge 10 Eser elementlerinin (RE) dökme demire olan etkileri	66
Çizelge 11 Dökme demir dökümleri için ISO standart sınıflarına göre tavsiye edilen hedef analizi	68
Çizelge 12 Aşılama ilavesi yapılmış ve yapılmamış dökme demir dökümlerinde tipik özelliklerin karşılaştırılması	71
Çizelge 13 Ticari aşılama ilavesi yapılmış ve yapılmamış dökme demir dökümlerinde tipik özelliklerin karşılaştırılması	72
Çizelge 14 Pota ve akışa vererek ilave edilen aşı malzemeleri	80
Çizelge 15 Dökümhanelerin şartlarına en uygun treatment prosesleri	84
Çizelge 16 Değişik treatment prosesleri için tipik MgFeSi alaşım spesifikasyonları	93
Çizelge 17 Sfero döküm kalıpta treatment prosesinin bazı avantaj ve dezavantajları...	95
Çizelge 18 Dökümün Kimyasal Bileşimi.....	115
Çizelge 19 Kimyasal Analizler	115
Çizelge 20 TS 526 EN 1563 Standardına göre ayrı dökülmüş numunelerden çıkarılan deney parçalarının üzerinde olması gereken mekanik özellikler.	117
Çizelge 21 TS 526 EN 1563 Standardına göre ayrı dökülmüş numunelerden çıkarılan v-çentikli deney parçalarının olması gereken minimum vurma dayanım değerleri.....	117
Tablo 22 Çekme deneyi sonucunda elde edilen mekanik özellikler	118
Çizelge 23 Çentik darbe deney sonuçları	119
Çizelge 24 Dökümü yapılmış olan malzemenin sertlik değerleri.	121
Çizelge 25 Yapılan dökümden alınan numuneden elde edilen değerler.	124
Çizelge 26 Küreselleşme yüzdesi	124
Çizelge 27 İncelenen numunelerin mikro yapısal özellikleri ve sertlikleri.	128

RÜZGAR TÜRBİNİ DÖKÜMLERİNDE HASSAS METALÜRJİK DEĞİŞKENLERİN OPTİMİZASYONU

Erdoğan GÜZEL

Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Üretim Programı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Ahmet EKERİM

Enerji; insanoğlunun tarihsel gelişimi ile kendini göstermiş ve her geçen gün kendine olan ihtiyaç artmıştır. Teknolojini gelişmesiyle birlikte enerjiye duyulan ihtiyaç her geçen gün artmaktadır. Fakat enerjiyi karşılayan kaynaklar yeryüzünde sınırlı olduğu için yok olmaya doğru hızla ilerlemektedir.

Enerji kaynaklarının tükeniyor olması insanoğlunu yeni arayışlara itmiştir. Böylece sınırlı kaynaklardan sınırsız kaynaklara yönelme olmuştur. Petrol, doğalgaz kömür gibi fosil yakıtlar önümüzdeki 50 yıl içerisinde tükenme seviyesine kadar düşecektir. Bu nedenle artan enerji ihtiyacını karşılayacak yeni arayışlar içerisine girilmiştir. Bu süreçte, sonsuz enerji kaynakları olarak güneş ve rüzgar enerjisini kullanmayı bilim adamları kendine hedef olarak belirlemiştir.

Sonsuz enerji kaynaklarından birisi olan rüzgar enerjisi; fosil yakıtlar gibi çevresel kirliliğe yol açmadan temiz ve sonsuz bir enerji sunmaktadır. Türkiye'nin rüzgar kapasitesi incelendiğinde Ege ve Marmara bölgesinde yüksek verimli rüzgar enerjisi üretmenin mümkün olduğu belirlenmiştir. Ülkemizde 2000'li yılların başlangıcında rüzgar enerjisi kullanılmaya başlanmıştır. Rüzgar enerjisi kullanımı olarak yeni bir ülke olduğumuzdan dolayı dışa bağımlılık söz konusudur. Dışa bağımlı oluşumuz ilk yatırım maliyetini yükselterek daha ucuza enerji temin etmemizi engellemektedir.

Bu çalışmada, rüzgar enerjisi kullanımının en verimli şekli olan rüzgar türbinlerinin hayati öneme sahip parçalarından rüzgar türbini pervane göbeğinin (HUB) üretimi ve özelliklerinin uluslar arası standartlara uygun hale getirilmesi amaçlanmıştır. Üretim metalürjisinde hassas metalürjik değişkenler olarak; kimyasal bileşim, aşılama, Mg işlemleri, küresellik parametreleri, soğuma hızı ve kesit kalınlığı belirlenmiştir. Üretim esnasında hassas metalürjik değişkenlerin optimizasyonu hedeflenmiş ve yapılan çalışmalarla birlikte standartlara uygun olarak üretimin gerçekleşmesinin yanında orijinal katkılarda sağlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Yenilebilir Enerji, Rüzgar Enerjisi, Rüzgar Türbini, Rüzgar Türbini Pervane Göbeği, HUB, Dökme Demir, Küresel Grafitli Dökme Demir, Aşılama, Kesit Kalınlığı.

**OPTIMIZATION OF SENSITIVE METALLURGICAL VARIABLES IN WIND
TURBINE CASTING**

Erdoğdu GÜZEL

Department of Metallurgy and Material Engineering

MSc. Thesis

Advisor: Prof. Dr. Ahmet EKERİM

Energy, showed itself with the historical development of mankind, and every day has increased the need for self. The need for energy is increasing every day with the development of technology. However, there is limited earth resources to meet the energy, it will progressing rapidly toward extinction.

Humanbeing has led to searches for new sources of energy to be running out. Therefore, limited resources were unlimited resources orientation. Petrol,natural gas, fossil fuels such as coal will be reduced to the level of extinction in the next 50 years. Therefore, to meet increasing energy demand is entered into the new searches. In this process, scientists have set as its goal use endless energy sources as solar and wind energy.

Wind energy which is one of endless energy sources, is not causing environmental pollution like the fossil fuels, such as offering a clean and endless energy. Wind capacity examined in Turkey, Ege and Marmara regions were able to produce highly efficient wind energy. In Turkey, wind energy has been used at the beginning of the 2000s. Since we are a new country as the use of wind energy dependence on foreign technology. The first investment cost is high because we were dependent on foreign supplies. That prevents us to get cheaper energy.

In this study, the rotor hub (HUB) which is the vital part of wind turbine, intended to make the production and characteristics of international standards. Production metallurgy sensitive metallurgical variables are : chemical composition, inoculation, Mg treatments , nodularizing parameters, cooling rate, and section thickness were determined. During the production, the optimization of sensitive metallurgical variables targeted and with the conjunctions work besides the original contributions to the realization of production in accordance with the standards achieved.

Key words: Railway traffic control, conflicts between trains, re-scheduling, genetic algorithms, neural networks, optimization

1.1 Literatür Özeti

Enerji; iş yapabilme yeteneği olarak basitçe tanımlanabilir. Kullanım alanına göre elektrik enerjisi, mekanik enerji, kimyasal enerji gibi farklı alanlara ayrılabilir. Dünya üzerinde yer alan enerji kaynaklarının bazıları kullanıldıkça tükenir ve tekrar kullanılamazlar. Bu durum 1970'li yıllara gelindiğinde var olan enerji kaynaklarının ihtiyaçları karşılayamaması ile sonuçlanmıştır. Böylece insanoğlu yeni arayışlar içerisine girmiştir. İnsanoğlu sınırsız ya da başka bir deyişle sonsuz ihtiyacını karşılamak için güneş ve rüzgar gibi sonsuz enerji kaynaklarına yönelmiştir. Çünkü artan enerji talebiyle beraber fosil yakıtlar hızla tükenmektedir. 2050'li yıllara gelindiğinde bilim adamları petrolün tükenme noktasına gelineceğini varsaymaktadır. Ayrıca Doğalgaza 2070, kömüre ise 2150 yılına kadar ömür biçilmektedir. [1]

Nükleer ve yenilenebilir enerjilerin her geçen gün kullanımının artmasına rağmen dünya hala fosil enerji çağında bulunmaktadır. Fosil yakıtlar – kömür, petrol ve doğal gaz – birincil enerji kaynağı olarak kullanılmaktadır. Elektrik üretiminde kömür egemendir, petrol taşıma yakıtları üzerinde neredeyse tekeldir ve doğal gaz, gelişmekte olan ülkelerde kışın ısıtma için kullanılan en yaygın yakıttır.[2]

Rüzgar enerjisinden elektrik enerjisi üretimi, doğaya vermiş olduğu zararın çok az olması ve sonsuz bir enerji kaynağı olması nedeniyle, alternatif enerji kaynakları arasında oldukça önemli bir yer tutmaktadır. Dünya'ya genel olarak baktığımızda Almanya, Hollanda, İsviçre gibi ülkeler rüzgar enerjisinden azami derecede faydalanmaktadır. Ülkemizde ise bu konu 2000'li yıllarda dikkat çekmeye başlamıştır. Bu enerjiden faydalanmada konusunda biraz geç kalmış olsak da Türkiye'de ki rüzgar potansiyeline bakıldığında, rüzgar enerjisi açısından zengin bir ülkedir. Gelişmiş ülkelerde rüzgar enerjisi öncelikle çevreye duyarlı olması ve maliyeti sebebiyle giderek daha fazla tercih edilir hale gelmektedir.

Rüzgar enerjisinin bu kadar popüler olmasının sebepleri, ucuz, bol ve tükenmez bir enerji kaynağı olmasıdır. 1980'lerde rüzgar enerjisinin kWh maliyeti 38 cent iken

günümüzde bu rakam 3 cent civarlarına düşmüştür. Bu rakamın 2020’de 2.1 cent’e kadar düşmesi tahmin edilmektedir.[2]

Rüzgar enerjisi kullanımının avantajları şunlardır:

- Sera gazı etkisi yaratmaz,
- Temiz bir enerji kaynağıdır,
- Güvenirliği ve ucuzluğu gittikçe artmaktadır,
- Rüzgar türbini kurulan bir arazi ikili kullanım imkanına sahiptir.

Bu sebeplerin yanı sıra fosil yakıtların karbon emülsiyonu ve çevreye salgıladığı diğer atıklar doğal yaşamı olumsuz yönde etkilemektedir. Bu zararlı etkiler ozon tabakası delinmiş ve güneşten gelen zararlı ışınlar karşı olan koruyucu etkisini kaybetmiştir. Sera etkisi, asit yağmurları bize hiç yabancı değildir ve küresel ısınmanın etkilerini her geçen gün şiddetle hissetmeye başladığımız gerçeğini hiç kimse kaşı çıkmamaktadır. Bu etkiler insanoğlunu hem temiz hem de ucuz enerji olan rüzgar enerjisine yönlendirmektedir.

Rüzgar enerjisinin kullanımı ve verimliliği ise kurulacak olan rüzgar türbininin MW olarak yüksek bir değere sahip olmasının yanında ilk yatırım maliyetinin yüksek olması sebebiyle, düşük bakım maliyeti ve uzun ömürlü olması gerekmektedir. Verimli bir rüzgar türbininin ömrü yaklaşık 25 yıldır. Bu nedenle rüzgar türbini dökümlerinde üretilen parçadan yüksek dayanım ve uzun ömür beklenmektedir. Bu şartların sağlanması ise ancak üretim sırasında hassas metalüjik değişkenlerin kontrolü ile mümkündür.

1.2 Tezin Amacı

1911 Rüzgar enerjisi kullanarak elektrik enerjisi üretmek, var olan enerji kaynakları rezervleri göz önüne alındığında önemini arttırarak devam etmektedir. Günümüzde rüzgar enerjisini daha verimli kullanmak amacıyla daha yüksek kapasiteli, daha verimli, daha güvenilir ve çevreye en az zararı veren rüzgar türbinlerinin üretimi ve geliştirilmesi için, gelişmiş ülkeler büyük yatırımlar yapmaktadırlar. Bu durum Türkiye açısından da benzerlik göstermektedir. Türkiye rüzgar potansiyeli olarak yüksek

potansiyele sahip ülkeler arasında yer almaktadır. Bu nedenle Türkiye, rüzgar enerjisini kullanma açısından son yıllarda hızla gelişim gösteren ülkelerden birisidir.

Sektörün hızla gelişmesine rağmen, mevcut yatırım ve çalışmalar göz önüne alındığında Ülkemiz için yeterli değildir. Rüzgar enerjisini kullanım konusunda dışa bağımlılık fazladır. Bu faktör özellikle enerji maliyetini attırmaktadır.

Bu çalışmamızın amacı, 2MW güç kapasiteli yatay eksenli üç kanatlı bir rüzgar türbini için pervane göbeği üretimi ve hassas metalürjik değişkenlerin optimizasyonudur. Uluslararası Rüzgar Türbini Üretimi Standartlarına uygun olarak üretimin gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Farklı malzemeler kullanılarak bu üretim gerçekleştirilebilir. Bu çalışmada öne çıkan 2MW güç kapasiteli bir rüzgar türbini göbeğinin üretimi ve bu büyüklükteki malzemenin mekanik özellikleri ve kullanım süreleri açısından standartlara uygun olarak üretilebilmesidir. Çünkü Rüzgar türbini pervane göbeğinin diğer parçalar gibi belirli bir standardı yoktur. Elde edilmek istenen enerji ne kadar yüksek olursa kanatlar o kadar büyük olacak, bu yükü taşıyacak temel bileşen olan pervane göbeği de o oranda büyüyecektir.

2MW güç kapasiteli bir rüzgar türbini göbeği üretimi sırasında çok fazla parametre bulunmaktadır. Bu parçanın üretimi sırasında değişken parametreler seçilirken her biri üzerinde durulmuş ve mekanik özelliklere ve mikro yapıya etkisi en fazla olanlar seçilerek optimizasyon yapılmıştır. Bunun sonucunda daha önce bu konuda yayınlanmış herhangi bir akademik çalışma bulunmadığından malzemenin standartlara uygunluğu araştırılmış ve bu konuda daha sonraki çalışmalara referans olabilecek reçeteler hazırlanmıştır.

1.3 Hipotez

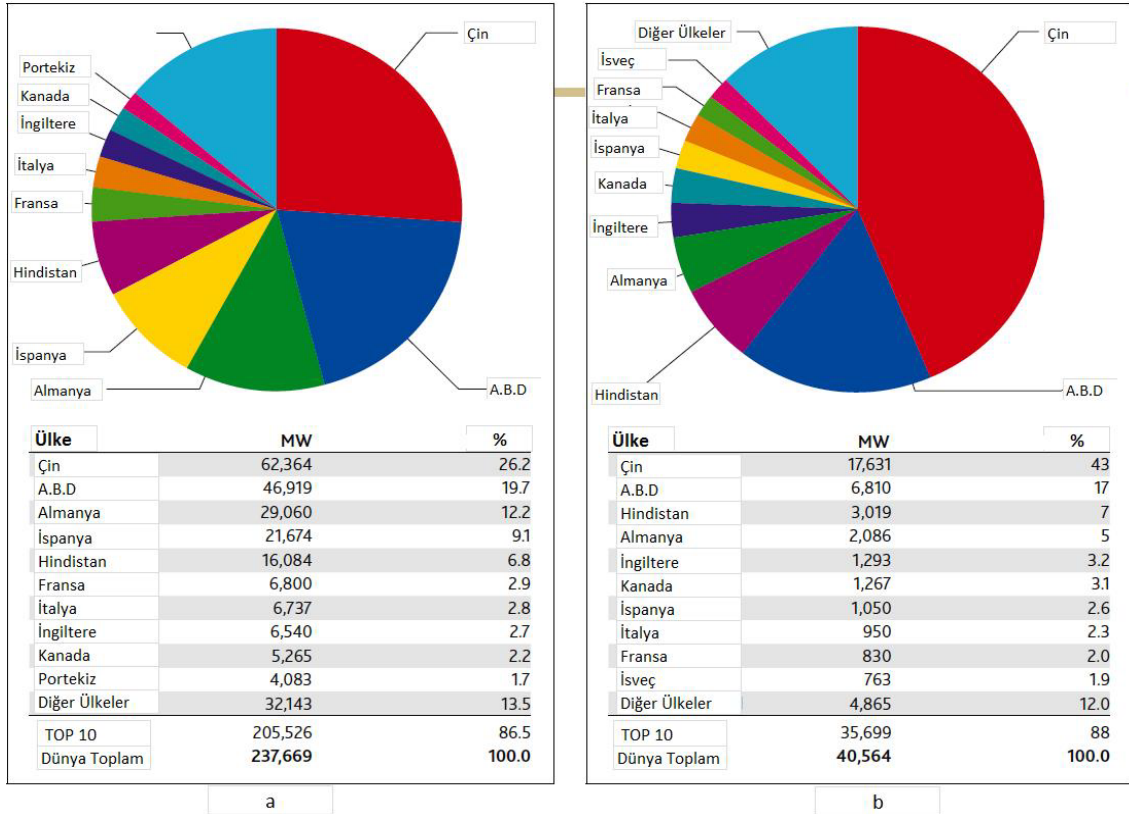
2MW güç kapasiteli bir rüzgar türbini göbeği üretimi sırasında çok fazla parametre bulunmaktadır. Bu parametrelerinin tamamının kontrolü imkansızdır. Laboratuvar şartlarında elde edilen numune özellikleri sanayi şartlarında elde edilememektedir. Bu değişkenlerin yapıyı ve özellikleri etkilediği için farklı değişkenlerin farklı etkileri bulunmaktadır. Bu çalışmada bu değişkenler arasından en etkin ve kontrol edilebilir olanlar belirlenerek, bu değişkenlerin kontrol altına alınıp özellikleri standart hale

getiren aralıklar belirlenecektir. Tüm çalışmaların ardından üretim gerçekleştirilecek ve prototip üretimin gerekleri yerine getirip getirmediği kontrol edilecektir.

BÖLÜM 2

DÜNYADA VE TÜRKİYE’DE RÜZGAR ENERJİSİ

Rüzgar enerjisi teknolojisi tüm dünyada çok hızlı bir şekilde ilerlemektedir. 1989 sonunda 300kW kapasiteli ve 30m rotor çapına sahip rüzgar türbinleri kullanılmaktaydı. Sadece on yıl sonra 1500kW kapasiteli ve 70m rotor çapına sahip rüzgar türbinleri bir çok üretici tarafından imal edilmeye başlanmıştır. 2000’li yılların başında 2MW kapasiteli 74m rotor çapına sahip rüzgar türbini projeleri gerçekleştirilmeye başlanmıştır. 2001 yılından itibaren 5MW kapasiteli rüzgar türbinlerinin geliştirilmesi çalışmaları başlamıştır.[3]

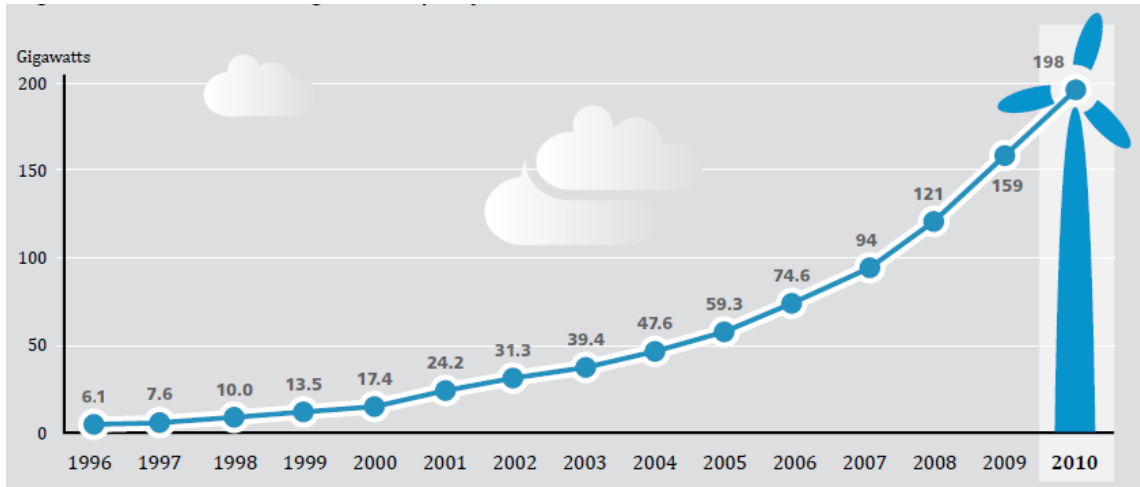


Şekil 2. 1 a)2011 yılı sonunda Dünyada toplam kurulu rüzgar enerjisi kapasitesi b)2011 yılı içerisinde yeni kurulan kapasite

Dünya üzerinde rüzgar enerjisi hem toplam kapasite olarak hem de kurulu kapasite olarak Çin egemenliğindedir. Bu ülkeleri U.S.A, Hindistan, Almanya, İspanya, Kanada ve İngiltere gibi ülkeler takip etmektedir.

Dünya enerji birliğinin 2011 raporuna bakıldığında 2011 yılı sonunda kurulmuş olan rüzgar türbini kapasitesi 237,669 MW' a çıkmıştır. Diğer grafik incelendiğinde ise yıllık kurulma miktarı olarak 2011 yılında toplam 40,564 MW Rüzgar türbini kurulmuştur.

Kıtalar arası mukayese yapıldığında ilk sırayı Asya kıtası almaktadır. Bunun en büyük nedeni Çin'in rüzgar enerji santralleri kurmasıdır. Mevcut duruma bakıldığında Çin toplam kapasitenin %26,2'sine sahiptir. Yeni kurulmuş olan rüzgar enerji santrallerinde ise Çin açık ara lider durumda ve Dünya genelinde kurulanların %43 bu ülkede bulunmaktadır.



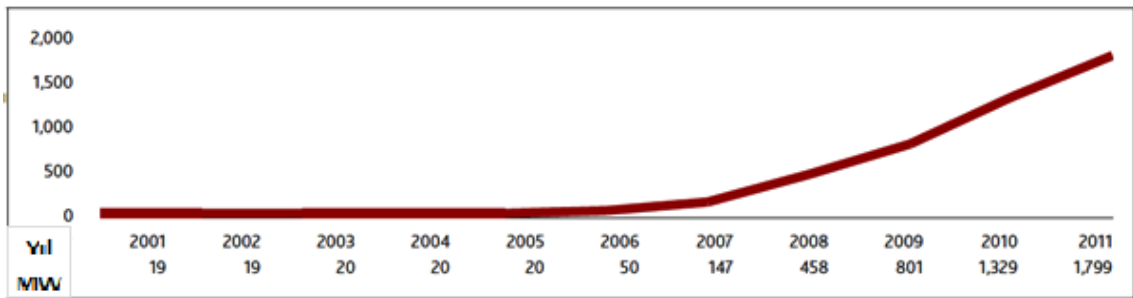
Şekil 2.2 Dünya üzerinde mevcut kurulu rüzgar enerjisi

Dünya genelinde durum bu şekil 2.1'de ki gibi iken Türkiye' de trende ayak uydurmuş ve hızlı gelişen ülkeler arasındaki yerini almıştır. Dünya Rüzgar Enerjisi Birliği (GWEC) 2011 raporunda Türkiye son 20 yılda dünyada en fazla büyüyen ülkedir. Türkiye'de rüzgar enerjisi sektörü hızlı bir ilerlemeye sahiptir, 2007 yılında 30 MW'lık olan rüzgar enerjisi 2011 yılı sonuna gelindiğinde 1,800 MW'a çıkarılmıştır. Türkiye, özellikle Çanakkale-İzmir, Balıkesir ve Hatay bölgelerinde muhteşem rüzgar kaynağına sahiptir. Türkiye'deki mevcut rüzgar enerji kaynakları değerlendirildiğinde, gelecek yıllarda 47 GW bir kapasiteye kadar çıkabileceği öngörülmektedir. [3]



Şekil 2.3 Bandırmadaki rüzgar türbinleri

2011’de Türkiye’de 470 MW yeni rüzgar enerjisi kurularak kapasite toplamda 1800 MW’a çıkarılmıştır. Yıllık büyüme oranına bakıldığında bu oran %35’in üzerindedir. Türkiye’de önümüzdeki yıllarda yıllık 500-1000 MW’lık artış beklenmekte ve 2015’de 5 GW 2020 ‘ye gelindiğinde ise 20 GW’lık rüzgar enerji potansiyeli beklenmektedir. Beklenen bu değerlere ulaşıldığında elektrik üretiminin %30 yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlanmış olacaktır. [3]



Şekil 2.4 Türkiye’de kurulan toplam kapasitenin yıllara göre gelişimi.

BÖLÜM 3

RÜZGAR TÜRBİNİ YAPISI VE BİLEŞENLERİ

Rüzgar türbinleri, rüzgarın kinetik enerjisini mekanik enerjiye, daha sonra da bu mekanik enerjiyi elektrik enerjisi ya da başka türlü enerjilere çeviren sistemlerdir. Rüzgar türbinleri dikey ve yatay olmak üzere ikiye ayrılır. Dikey rüzgar türbinleri daha çok deneysel olup, ticari amaçlı uygulamaları azdır. Günümüzde enerji üretiminde büyük oranda kullanılan istemler yatay türbin sistemlerdir. [2]

Rüzgar türbini rotoru bir jeneratöre bağlıdır. Jeneratör çıkışı, istenen gerilim değerini takip etmek için kontrol edilebilmektedir. Rüzgar türbinleri, rüzgarlardan elde edilen aerodinamik gücü kontrol etmek için eğimli kanatlara sahiptir. Düşük hız mili, aerodinamik güç üreten türbin kanatları tarafından sürülmektedir. Yüksek hızlı şaft ise elektrik jeneratöründe oluşturulan elektromanyetik indüksiyondan kaynaklanan manyetik alan etkisinde yüklenmektedir.

Temel olarak rüzgar türbinleri üç birimden meydana gelmektedir:

- Türbin Kulesi
- Makine Dairesi
- Rotor

Türbin kulesi, kule ve kule temelinden meydana gelmektedir. Makine dairesi, içerisinde rotorda oluşturulan kinetik enerjiyi ve dönme hareketini jeneratöre ileten düşük hız şaftı, redüktör, yüksek hız şaftı, fren, kavrama ve jeneratörden barındırmaktadır. Rotor ise türbin tipine göre iki veya üç adet kanat ve bu kanatlarda oluşan aerodinamik gücü düşük hız şaftına ileten rotor göbeğinden meydana gelmektedir.[6]

Kanatlar, esen rüzgarın uçak kanatlarında yarattığı kaldırma kuvveti prensibine göre çalışırlar. Bu şekilde dönen sistemler rüzgar enerjisini rotora aktarırlar. Modern Megavat boyutlu sistemlerde bu kanat boyutları 35 metreden büyük olabilir.

Rotor: Kanatlar ve kanatları birleştiren merkez, rotor olarak adlandırılır. Geçmişte farklı sayıda kanatlı sistemler denenmişse de günümüzde 2 kanatlı veya 3 kanatlı sistemler kullanılmaktadır. Sistemin merkezi rotor şaftına bağlıdır. [2]

3.1 Rüzgar Türbinlerinin Sınıflandırılması

Kullanımdaki rüzgar türbinleri boyut ve tip olarak çeşitlilik göstermektedirler. Türbinler, dönme eksenine, g kontrol sistemlerine, rotorun dönüş hızına ve kullanım yerine göre sınıflandırılabilirler. Rüzgar türbinleri dönme eksenine göre "Yatay Eksenli Rüzgar Türbinleri" (YERT) ve "Düşey Eksenli Rüzgar Türbinleri" (DERT) olmak üzere iki sınıfa ayrılır.[6,7]

3.1.1 Dikey Eksenli Rüzgar Türbinleri

Dönme eksenini, rüzgar akış yönüne dik olan türbinlerdir. Başlıca rnekleri Darrieus ve Savonius tipi rüzgar türbinleridir. şekil 3.1'de tipik bir dikey eksenli rüzgar türbini görülmektedir. Ticari kullanımı çok azdır. Kanatlar, yaklaşık olarak türbin mili uzun eksenli olan bir elips oluşturacak biçimde yerleştirilmişlerdir. Kanatların içbükey ve dışbükey yüzeyleri arasındaki çekme kuvveti farkı nedeniyle dönme hareketi oluşur.[1,7,9,10]

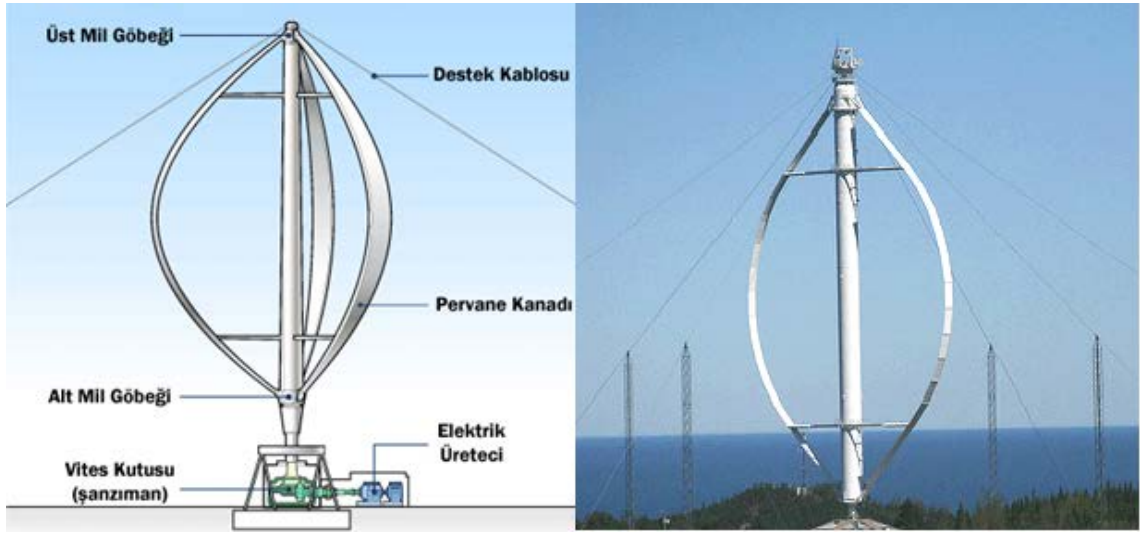
Dikey eksenli rüzgar türbinleri her istikametlidirler ve değişen rüzgar yönlerinde dönerler. Böylece rüzgarı her bir yönden kabul ederler. Dönüşün dikey eksenini, sürücünün toprak seviyesine dahi yerleştirilmesine izin vermektedir. Bu tipteki rüzgar türbinlerinin güç katsayısı 0,15'ten azdır. Bu nedenle g üretiminde tercih edilmezler.[1]

Bu türbinlerin üstünlükleri şöyle sıralanabilir:

- Jeneratör ve dişli kutusu yere yerleştirildiği için, türbini kule üzerine yerleştirmek gerekmez, böylece kule masrafı olmaz.
- Türbini rüzgar yönüne çevirmeye, dolayısıyla dmen sistemine ihtiyaç yoktur.
- Türbin mili hariç diğer parçaların bakım ve onarımı kolaydır.
- Elde edilen güç toprak seviyesinde çıktığından, nakledilmesi daha kolaydır.

Sakıncaları ise şöyledir:

- Yere yakın oldukları için alt noktalardaki rüzgar hızları düşüktür.
- Verimi düşüktür.
- Çalışmaya başlaması için bir motor tarafından ilk hareketin verilmesi gerekir, bu yüzden ilk hareket motoruna ihtiyacı vardır.
- Ayakta durabilmesi için tellerle yere sabitlenmesi gerekir, bu da pek pratik değildir.
- Türbin mili yataklarının değişmesi gerektiğinde, makinenin tamamının yere yatırılması gerekir. [9]



Şekil 3.1 Dikey Eksenli Rüzgar Türbinleri

3.1.1.1 Darrieus tipi rüzgar türbinleri

Adını 1931 yılında icadı gerçekleştiren George J.M. Darrieus'un adından alır. Orijinal tasarımında kanatlar yumurta şekline benzemektedir ve işlem esnasında gerilim altındadır. Bu tip kanat yapılandırması kanat tarafından maruz kalınan kanat stresini minimize etmeye yardımcı olur. Darrieus türbinleri yüksek kanat ucu hızı altında çalıştığından rüzgar elektrik jeneratörleri için daha kullanışlı duruma gelirler. Kanatlardaki hafif eğim sayesinde kanatlardaki çekme gerilimleri minimuma iner.[12]



Şekil 3.2 Darrieus tipi rüzgar türbini

3.1.1.2 Savonius tipi rüzgar türbinleri

1925 yılında Finlandiyalı bir mühendis olan Sigurd Savonius tarafından keşfedilmiştir. Savonius türbinleri, iki ya da üç adet kepçeye benzer kesitin birleşimi şeklindedir. En yaygını iki adet kepçenin bulunduğu durumudur ve “S” şeklini andıran bir görüntüsü vardır. Bu türbinlerde güç üretimini sağlayan kuvvet sürüklenme kuvvetidir. Savonius türbininde akışkan içbükey kanat üzerinde türbülanslı bir yol izler ve burada dönel akışlar meydana gelir. Bu dönel akışlar Savonius türbininin performansını düşürür, bu nedenle elektrik üretiminde pek fazla kullanılmazlar. Daha çok su pompalama amaçlı ve rüzgar ölçümlerinde kullanılan anemometre olarak kullanılırlar.[7]

3.1.2 Yatay Eksenli Rüzgar Türbinleri

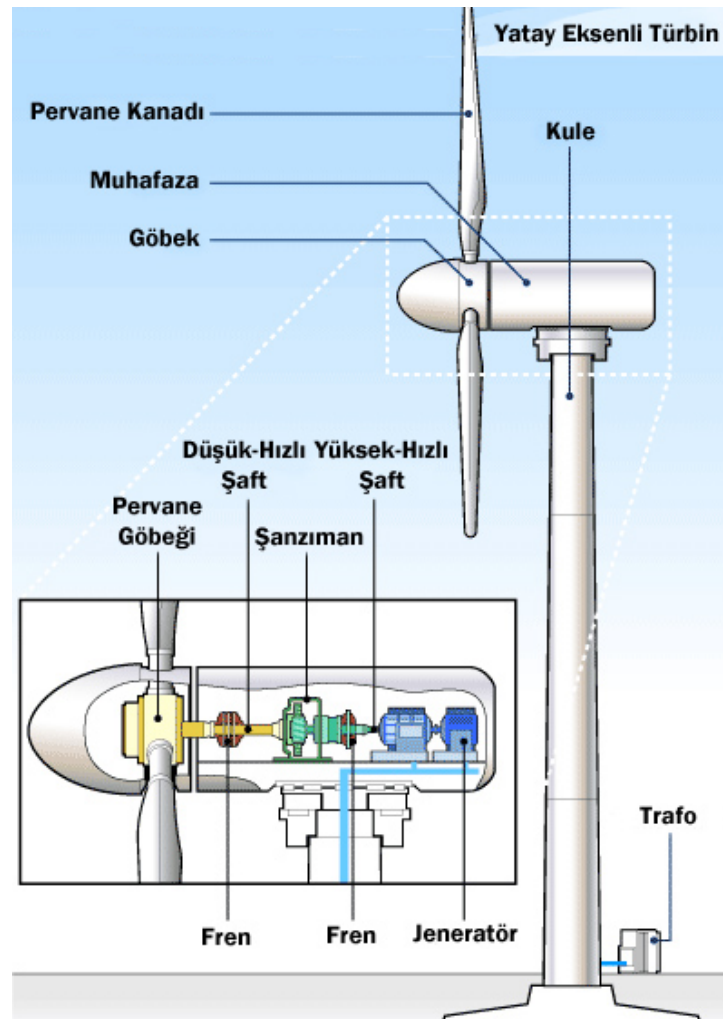
Bu türbinlerde; dönme eksenini rüzgar yönüne paralel, kanatlar rüzgar yönüne diktir. Bu türbinler en yaygın kullanılan türbin çeşididir. Yatay eksenli rüzgar türbinleri, temel olarak bir adet kule ve bu kule üzerine kurulmuş olan makine dairesinden meydana gelmektedir. Makine dairesi içerisinde rotor göbeği, dişli kutusu, düşük hız mili ve jeneratör bulunmaktadır.[1,11]

Yatay eksenli rüzgar türbinleri, sabit rotor sistemine sahip ya da değişen rüzgar yönüne uyum sağlayacak şekilde hareketli rotor sistemine sahip olacak şekilde dizayn edilmektedir. Bu, rüzgardan sürekli olarak maksimum güç elde etmeyi sağlamaktadır. Küçük kapasiteli yatay eksenli rüzgar türbinlerinde rotor oryantasyonu, rotor ve makine dairesinin arka tarafına konumlandırılan kuyruk kanadı vasıtasıyla sağlanmaktadır. Büyük kapasiteli yatay eksenli rüzgar türbinlerinde ise rotor oryantasyonu, kuleye entegre edilmiş elektronik kontrollü yönlendirici ile sağlanmaktadır. Bu türbinlerin verimi yaklaşık %45'dir .[6]

Bu türbinlerde rotor kanatların sayısı azaldıkça rotor daha hızlı dönmektedir. YERT genel olarak yerden 20-30m yüksekte ve çevredeki engellerden 10m yüksekte olacak şekilde yerleştirilmelidir. Rüzgar hızının, rotor kanadı uç hızına bölünmesi ile elde edilen orana kanat uç hız oranı (λ) denir. Eğer;

- ✓ $\lambda = 1-5$ Çok kanatlı rotor,
- ✓ $\lambda = 6-8$ Üç kanatlı rotor,
- ✓ $\lambda = 9-15$ İki kanatlı rotor,
- ✓ $\lambda > 15$ Tek kanatlı rotor kullanılır. [1]

Yatay eksenli türbinlerin çoğu, rüzgarı önden alacak şekilde tasarlanır. Rüzgarı arkadan alan türbinlerin yaygın bir kullanım yeri yoktur. Rüzgarı önden alan türbinlerin iyi tarafı, kulenin oluşturduğu rüzgar gölgelenmesinden etkilenmemesidir. Kötü tarafı ise, türbinin sürekli rüzgara bakması için dümen sisteminin yapılmasıdır. Yatay eksenli türbinlere örnek olarak pervane tipi rüzgar türbinleri verilebilir. Bu tip türbinlerin kanatları tek parça olabileceği gibi iki ve daha fazla parçadan da oluşabilir. Günümüzde en çok kullanılan tip üç kanatlı olanlardır. Bu türbinler elektrik üretmek için kullanılır.[7]



Bu türbinler kanat sayısına göre tek kanatlı, 2 kanatlı, 3 kanatlı ve çok kanatlı olarak sınıflandırılırlar.

3.1.2.1 Tek Kanatlı Rüzgar Türbinleri

Tek kanatlı RT'nin yapılmasının sebebi, kanat sayısına göre dönme hızının yüksek olması ve bu sayede makine kütlesini ve rotorun döndürme momentini azaltmaktır. Ek olarak rotor kanadı, kanat üzerindeki yapısal yükleri azaltacak mekanizma ve kanat mekanizma hareketinin pürüzsüz olabilmesi için, tek menteşe ile sabitleştirilip, 2 karşı ağırlıkla dengelenmelidir. Diğer taraftan tek kanatlı rotorlarda, ilave yüklerden ortaya çıkan aerodinamik balanssızlık ve mekanizma hareketinin kontrol altında tutulması için kanat bağlantı noktaları çok iyi yapılmalıdır.

Bir kanatlı RT'nin kanat üç hızı, üç kanatlı RT ile karşılaştırıldığında, iki kat daha yüksektir. Bu da çalışma esnasında aşırı gürültüye sebebiyet vermektedir.[1]



Şekil 3.4 Tek kanatlı rüzgar türbini

3.1.2.2 Çift Kanatlı Rüzgar Türbinleri

Üç kanatlı türbinlere göre rotor maliyetinin azaltılmak istenmesi bu türbin fikrini doğurmuştur. Birçok ülkede 10 ila 100m rotor çaplı ölçülerde RT'ler tasarlanıp, Avrupa ve ABD'de çalışmaya başlamıştır. Bu ticari RT'lerden sadece birkaç tanesi prototip durumundan, seri üretime geçebilmiştir. İki kanatlı rotorun balansı, bir kanatlı rotora göre daha düzgündür. Fakat maalesef iki kanatlı rotorun sebep olduğu dinamik hareketleri önlemek için ilave teknik güç, maliyetin daha fazla artısına sebep olmaktadır. Kanat bağlantı noktalarının titreşimi azaltmak için rotora kadran sistemi ilave edilmiştir. Bu kadran, rotor şaftına dikey ve iki rotor kanadına dik yerleştirilir. Üç kanatlı rotorla karşılaştırıldığında en büyük avantajı; kanat üç hızlarının yüksek olmasıdır. Bu RT'nin gürültü seviyesinin yüksek olması ve düşük rüzgar hızlarında (3m/sn) çalıştırılması dezavantajdır. Günümüzde iki kanatlı rotor, şimdi birkaç ünitelidir ve en az bir an için artan piyasaya dikkat edecek olursak iki kanatlı rotora hiçbir eğilim bulunmamaktadır.[1]



Şekil 3.5 Çift kanatlı rüzgar türbini

3.1.2.3 Üç Kanatlı Rüzgar Türbinleri

Üç kanatlı modern türbinler, dünyanın her tarafında kullanılmaktadır. Üç kanat kullanımının asıl sebebi, dönme momentinin daha düzgün olmasıdır. Bu türbinde, türbinin yapısı üzerinde depolanan yüklerden dolayı salınım yapan atalet momenti olmadığından, Kanat bağlantı göbeğinin içinde titreşimi önleyici pahalı parçalara gerek yoktur. Kanat üç hızı 70m/sn altında olduğundan gürültünün düşüklüğü, sarsıntısız döndükleri için göz estetiğini bozmamaları önemli bir avantaj olup, halk tarafından kabulünü sağlamıştır. Küçük güçlü RT'lerde, üç kanatlı rotor kullanıldığında güç problemleri ortaya çıkar. Bu problemin çözümü için düşük devirde dönen rotorun devir sayısını $1/n$ oranında arttıran dişliler kullanılır ve "Cut in" olarak adlandırılan hız değerine ulaşıncaya kadar, jeneratör boşa çalıştırılır.[1]



Şekil 3.6 Üç kanatlı rüzgar türbini

3.2 Rüzgar Türbini Bileşenleri

Geçmişten günümüze çok farklı tasarımlarda rüzgar türbinleri geliştirilmiştir. Her ne kadar farklı tasarımlara sahip olsalar da günümüzde modern rüzgar türbinlerinin konstrüksiyonları genel olarak benzerlik göstermektedir. Bunun nedeni çalışma prensibinin tamamen aynı olmasıdır. Genel olarak bileşenlerin sınıflandırılması şu şekildedir;



Şekil 3.7 Yatay eksenli rüzgar türbinin bileşenleri

Rüzgar türbinleri; rotor, güç şaftı ve rüzgarın kinetik enerjisini elektrik enerjisine çeviren bir alternatörden (generatör) oluşur. [12]

3.2.1.1 Kanatlar

Kanatlar rüzgarı yakalar ve onun gücünü rotora aktarır. Rotor, gücü şaft vasıtasıyla dişli kutusuna, oradan da jeneratöre gönderen en dış birimdir.

Kanat tasarımı, rüzgar türbininde çok önem arz etmektedir. Bu yüzden kanat tasarımı konusunda uzun süre çalışmalar yapılmış ve çeşitli kanat profilleri geliştirilmiştir. Türbinlerin verimlerinin artırılması için geliştirilen bu kanat profillerine üzerinde yoğun olarak teorik çalışmalar yapılan NACA (National Advisory Committee for Aeronautics)

profilleri örnek olarak gösterilebilir. Herhangi bir yerde rüzgar türbini kurulacağı zaman, çevrenin spesifik özelliklerine bakılarak bu kanat profillerinden uygun olan seçilmelidir. Seçilen kanadın önemli olduğu kadar, bu kanadın rotora bağlanma açısı da çok önemlidir. Büyük ölçekli türbinlerde kanatlar istenildiği gibi, verim optimum olacak şekilde ayarlanabilmektedir ancak küçük türbinlerde kanadın bağlama açısı uygun seçilmelidir.

Kanat malzemesi olarak genellikle GRP (Glass Reinforced Plastic), ağaç, haddelenmiş ağaç, karbon fiberiyle kuvvetlendirilmiş plastik CFRP (Carbon Fibre Reinforced Plastic), çelik ve alüminyum kullanılmaktadır. Ağaçtan yapılan kanatlar çok iyi yorulma dayanımı vermektedir. Büyük türbinlerde kanatlar CFRP'den imal edilmektedir ancak maliyeti yüksektir. Çelik malzemede ise yorulma dayanımı düşüktür. Tokluk yüksektir ve ağırlık önemli bir sorun teşkil etmektedir. Günümüzde büyük türbinlerde GRP kullanılmaktadır.[5]

3.2.1.2 Kule

Rüzgar türbininin kulesi, kafa kısmını ve rotoru üzerinde taşır. Genellikle kulenin yüksek olması bir avantajdır çünkü, rüzgar hızları yerden yükseldikçe artar. Ancak kule ağırlığının ve maliyetin artması kule yüksekliğini sınırlamaktadır. Rotor 3-26 ton, gövde 10-56 ton ve kule ağırlığı 12-88 ton arasında değişmektedir. Tipik olarak 600 KW'lık modern bir rüzgar türbininin kulesi 40-60 m yüksekliktedir (bir 13-20 katlı bina yüksekliği kadar). Kuleler tüp ya da kafes biçimindedir. Tüp biçimli kuleler çalışanlar için daha avantajlıdır, çünkü gerektiğinde bir merdivenle içeriden türbinin tepesine çıkmak daha kolaydır. Kafes kulelerin avantajı esas olarak ucuz oluşlarıdır.[1]

3.2.1.3 Kanat Döndürme Mekanizması (Pitch)

Pitch kontrollü türbinlerde kanatlar, göbeğe sabit bir açı ile sabitlenmiş değildirler. Kanat, pitch kontrol mekanizması sayesinde rüzgar hızına göre eksenini etrafında döndürülebilmektedir. Bu türbinler, nominal hız üzerinde sabit güç üretimi sayesinde daha kaliteli bir güç çıkışı sağlamaktadırlar. Bu sistem ile bütün hızlarda kullanılarak elde edilen enerjinin arttırılması sağlanabilir ya da sistemde aşınmayı azaltmak için sadece nominal hızın üzerinde güç kontrolü için kullanılabilir. Pitch kontrollü

türbinlerden elde edilecek performans artışı temel olarak kullanılan pitch mekanizmalarının hızına ve hassasiyetine bağlıdır. Bu makineler sahip oldukları pitch sistemleri sebebiyle yüksek hızlarda yapısal sorunlara gebedirler. Ancak gelişen teknolojiyle bu sorunlar en aza indirilmektedir.[1]



Şekil 3.8 Pitch mekanizması

3.2.1.4 Fren

Rüzgardan elde edilen enerji, rüzgar hızının küpü ile doğru orantılıdır. Dolayısı ile yüksek rüzgar hızlarında meydana gelebilecek kuvvetler tahmin edilebilir. Bu kuvvetleri kontrol altına alabilmek için fren sistemi kullanılmaktadır.

Özellikle fırtınalı havalarda rüzgara karşı küçük bir yüzey çıkarmak, hatta tesisten yararlanılmayacaksa tamamen durdurmak gerekir. Bu sonuçları elde etmek amacıyla çeşitli sistemler uygulanmaktadır. Bunlardan birisi de mekanik fren düzenidir. Mekanik fren, dişli kutusuna yerleştirilen bir diskten oluşmaktadır. Fren diski çelikten yapılır ve mil üzerine sabitlenir. Olabilecek arızalara karşı frenleme sistemini korumak için hidrolik yağ basıncı gerekmektedir. Hidrolik sistem türbinin aerodinamik frenlerini ayarlamak için kullanılır. Yağ basıncı olmadığında, fren blokları fren diskini sıkıştırır. Frenleme, fren bloğu ile disk arasındaki sürtünmenin bir sonucudur.[1]

3.2.1.5 Dişli Kutusu

Solunda düşük hızlı şaft vardır. Düşük hızlı şafttan yaklaşık olarak 50 kat daha hızlı dönen yüksek hızlı şaft ise sağındadır. Rüzgar türbini rotorunun (pervanesinin) dönmesiyle elde edilen güç, ana şaft, dişli kutusu ve yüksek hız şaftından oluşan güç ünitesiyle jeneratöre aktarılır. Rüzgar türbini rotorundan elde edilen yavaş dönme hızı ve yüksek tork, dişli kutusuyla jeneratör için kullanılan yüksek hız, düşük tork gücüne dönüştürülür. Genellikle rotorun dönüşüyle jeneratör arasında, tek bir dişli oranı vardır.

3.2.1.6 Jeneratör

Rüzgar türbinlerinde mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürmek için gerekli olan parçadır. Senkron ve asenkron olmak üzere iki türü kullanılır. Senkron jeneratörler şebeke frekansında çalışırlar. Şebekeden reaktif güç çekmezler. Fakat pahalıdırlar. Çalışmaya başlamaları için şebekeye bağlı olmaları gerekir. Asenkron jeneratörler basit ve ucuzdurlar. Şebeke frekansından biraz yüksek frekansta çalışırlar. Ancak şebekeden reaktif güç çekerler.

3.2.1.7 Kontrol Kutusu

Elektronik kontrolcü, rüzgar türbininin şartlarını sürekli olarak takip eden ve rota mekanizmasını kontrol eden bir bilgisayar bulundurur. Herhangi bir bozukluk (dişli kutusu veya jeneratörün aşırı ısınması gibi) durumunda türbini otomatik olarak durdurur ve türbin operatörü bilgisayarına modem hattı ile çağrı mesajı gönderir.

3.2.1.8 Anemometre Ve Rüzgar Gücü

Rüzgarın hızını ve yönünü ölçmek için kullanılırlar. Örneğin türbin devreye girme hızı 5 m/s olan, Kesme hızı 25 m/s olan bir türbinde, rüzgar hızı 5 m/s'ye eristiğinde türbini harekete geçirmek için rüzgar türbininin elektronik kontrolcüsü tarafından anemometrenin gönderdiği elektronik sinyaller kullanılır. Eğer rüzgar hızı 25 m/s'yi asarsa bilgisayar, türbini ve çevresindekileri korumak için rüzgar türbinini otomatik olarak durdurur. Rüzgar gülünden gelen sinyaller, rüzgar türbini elektronik kontrolcüsü

tarafından alınarak, rota mekanizması yardımıyla rüzgara karşı türbini döndürmek için kullanılır.[1]



Şekil 3.9 Rüzgar gülü

3.2.1.9 Rota Mekanizması Ve Motoru (Yaw)

Rota mekanizması, rüzgar vanasını kullanarak rüzgar yönünü belirleyen elektronik kontrolcü tarafından işletilir. Rüzgardan azami derecede faydalanabilmek için kanatların yönü daima rüzgara dik olmalıdır. Rüzgar yönü değiştiği zaman rota mekanizması devreye girerek türbin kanatlarını en uygun duruma getirir. Bu genelde birkaç derecelik bir açı değişimi ile sağlanabilir. Bu rota motorunun döndürme etkisiyle olur. Bazen de, çok yüksek rüzgar hızlarında kanatların dönüşünün yavaşlaması hatta durması istenebilir. Bu gibi durumlarda rota mekanizması ters yönde çalıştırılabilir.

Yeni nesil türbinlerde yaw mekanizması hidrolik fren sistemiyle birlikte takılmaktadır. Hidrolik fren rotor dönüşündeki pürüzleri düzelttiği gibi, rüzgara göre uygun konum yakalandığında rotoru sabitlemektedir. [1]



Sekil 3.10 Yaw Mekanizması

3.2.1.10 Rotor Göbeği (HUB)

Rotor göbeği, kanatları taşıyan ve kanatlarda oluşturulan mekanik enerjiyi aktarma organlarına ileten elemandır. Rotor göbeği, pozisyonu ve görevi gereği büyük ve karmaşık gerilmelere maruz kalmaktadır. Pitch kontrolüne sahip olan rüzgar türbinlerinde rotor göbeği üzerinde kanatların kanat boyunca olan ekseninde dönebilmelerini sağlayan yataklar yer almaktadır. Yine pitch kontrolüne sahip olan rüzgar türbinlerinde pitch kontrol mekanizmaları da rotor göbeğinin iç kısmına konumlandırılmaktadır.

Rüzgar türbinlerinde çok farklı tasarımlara sahip rotor göbekleri kullanılmaktadır. Her üretici kendi bilgi birikimi ışığında; üretim parametrelerini sağlayabileceği ve kendisi için en ekonomik üretimi yapacaktır. Bu nedenle kanat tasarımına aksine rotor göbeği tasarımında serbest parametre sayısı oldukça fazladır. Bunun sonucu olarak rotor göbeği hem geometrik olarak hem de metalürjik olarak üretici firmaya göre farklılıklar göstermektedir.

Rotor göbeği tasarımında dikkat edilecek husus, serbest parametreleri mümkün olduğunca kaliteli bir şekilde kontrol edebilmektir. Rotor göbeği üretimi esnasında, göbeğin görev ve pozisyonu gereği belli olan bazı geometri ve boyutları haricinde, birçok hassas metalürjik değişken bulunmaktadır. Bu nedenle öncelikle üretimi

yapılacak olan rotor göbeğinin büyüklüğü belirlenmeli, gerekli standartları sağlayacak malzeme belirlenerek üretim optimum şartlarda gerçekleştirilmelidir. Farklı tasarımda ve üretilmiş çeşitli rotor göbeklerini şekil 3.11’de görülmektedir.

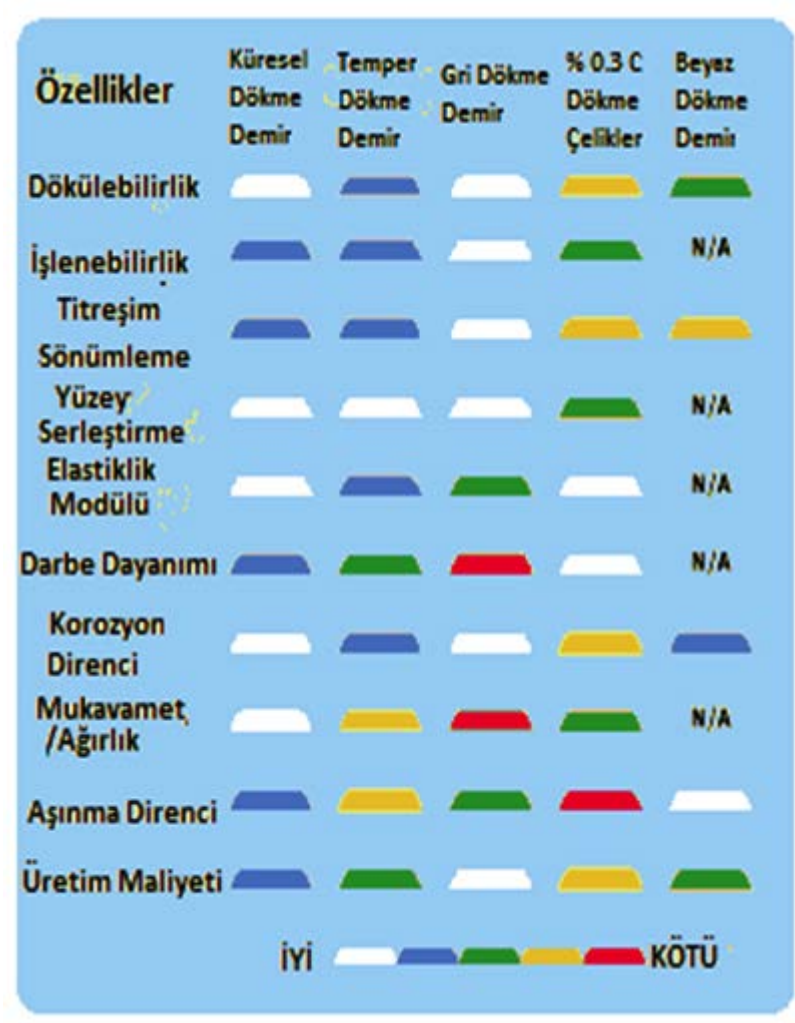


Şekil 3.11 Farklı tasarıma sahip rotor göbekleri

3.3 Rüzgar Türbini Pervane Göbeği Üretimi İçin Malzeme Seçimi

Tasarımın yanında üretim için seçilecek malzemelerde metalürjik olarak beklenen özelliklerin başında malzemenin yorulma dayanımı gelmektedir. Bunun en önemli nedeni; rüzgar türbini gibi ilk yatırım maliyeti yüksek olan bir yenilenebilir enerji üreticisinin uzun yıllar maliyet gerektirmeden çalışabilir durumda kalabilmesidir. Bu özellik de ancak malzemenin yüksek mekanik özellik ve uzun bir ömre sahip olması ile mümkündür. Özellikle rüzgar türbinin kanatlardaki tüm yüklerinin yüklendiği Rotor göbeğinin, yüksek bir dayanım ile uzun yıllar görevini yerine getirebilmesi ancak seçilen malzemenin doğru olmasına, üretimin optimum şartlarda yapılmasına ve standartları uygun olmasına bağlıdır. Bu nedenle üretim için gerekli olan malzemeden beklenen başlıca özellikler;

- ✓Yüksek tokluk
- ✓Dökülebilirlik ve işlenebilirlik
- ✓Düşük maliyet
- ✓Yüksek korozyon direncidir.



Şekil 3.12 Rüzgar türbini dökümünde kullanılabilen malzemelerin özelliklerinin karşılaştırılması.

Rüzgar türbini pervane göbeği çalışma esnasında çok fazla değişken kuvvetin etkisinde kaldığından tasarımına ve üretimine çok önem vermek gerekir. Tasarımın yorulmaya göre yapılması gerekir çünkü kaynak gibi malzemenin yorulma dayanımını düşüren işlemlerden kaçınılarak tek parça halinde üretime önem verilmelidir. Özellikle küresel geometrili ve karmaşık yapıya sahip olan göbeklerin üretimi ancak döküm yöntemi ile mümkündür. Şekil 3.12’de incelendiğinde döküm ile üretim yapıldığı takdirde seçilebilecek en uygun malzeme küresel dökme demirdir.

Normal dökme demirler de, artan karbon oranına bağlı olarak ergime sıcaklığının düşmesinin döküm işlemini kolaylaştırması ve ekonomikleştirmesi nedeniyle döküme katılmış olan karbon atomları, katılma sırasında demir içersin de yayılı grafit taneleri şeklinde kümelenmektedirler. Bu taneler demir içersin de süreksizliğe neden

olmaktadırlar. Grafitin basma dayanımı çok iyi olduğundan dökme demirin de basma dayanımı çok iyi olmaktadır. Ancak grafit tanelerinin, özellikle tabaka şeklinde olanların, neden olduğu süreksizlik nedeniyle çekme kuvvetleri altında malzemede gerilme yığılmaları olduğundan dökme demirin çekme dayanımı çeliğe kıyasla çok düşük kalmaktadır. Bunu giderebilmek için gerilme yığılmalarını azaltmak gerektiğinden ve bunun için de büyük kısmı tabaka şeklinde olan grafit tanelerinin olabildiğince küreselleştirilmesi gerektiğinden dolayı döküm işlemine ağırlıklı olarak silisyum olmak üzere çeşitli alaşım elementleri ilavesi yapılarak grafit tanelerinin küreselleşmesi sağlanmaktadır. Böylece küresel grafitli demir elde edilmiş olacaktır. Böylelikle iyileştirilmiş çekme dayanımı ve yüksek yorulma dayanımı nedeniyle malzeme son zamanlarda rüzgar türbinlerindeki döküm parçalarında yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. [8]

Pervane göbeğinden beklenen özelliklere göre kıyaslama yapıldığında küresel grafitli dökme demirin diğer malzemelere göre daha üstün özellikler gösterdiği belirlenmiştir. Hem şekil 3.12’de belirtilen özelliklerde hem de diğer literatür taramalarından elde edilen bilgiler ışığında, en uygun malzemenin yüksek tokluk ve yorulma dayanımının yanında ekonomik olması nedeniyle küresel grafitli dökme demir olduğuna karar verilmiştir.

Döküm endüstrisinin birçok özelliğinden dolayı en büyük üretim kapasitesine sahip ürünü dökme demirlerdir. Dökme demirler, gerek döküm ve gerekse mamul parça özellikleri bakımından birçok avantaja sahiptirler. Bunların en önemlileri; alaşımı meydana getiren hammaddelerin ucuzluğu ve kolay temin edilebilmesidir. [13][14]

Bunlara ek olarak;

- a) Düşük ergime sıcaklığı (1150 - 1300⁰C),
 - b) Yüksek akışkanlık (ötektik bileşimine yakınlık)
 - c) Döküm ve kalıp şeklini alabilme kabiliyetinin üstünlüğü,
 - d) Ergitme ve döküm işlemlerinin ucuzluğu,
 - e) Kimyasal bileşim sınırlarının geniş tutulabilmesi ve yakın özellikler elde edilebilmesi,
 - f) Karmaşık yapıli parçaların tek bir işlemle elde edilebilmesi,
 - g) Talaşlı imalat tekniğinde iyi işlenebilmesi,
 - h) Titreşim sönümleme özelliğinin çok iyi olması,
 - ı) Basma mukavemetinin yüksek olması,
 - i) Aşınma ve korozyona direncinin yüksek oluşu
- olarak sıralanabilir.[14]

4.1 Dökme Demirin Tanımı

Dökme demirler çelikler gibi geniş demir alaşımları ailesinin bir üyesi olarak tanımlanabilir. Dökme demirler ötektik katılaşılan çok bileşenli demir alaşımlarıdır. Dökme demirler, başlıca olarak (Fe, C, Si), küçük miktarda (<0.1 %) ve genellikle (>0.1%) alaşım elementi içerirler. Dökme demirler Si, Mn, P, S çeşitli elementlerle birlikte Ti, Sb ve Sn gibi yeryüzü elementlerini (RE) de bünyesinde bulundurulabilirler.

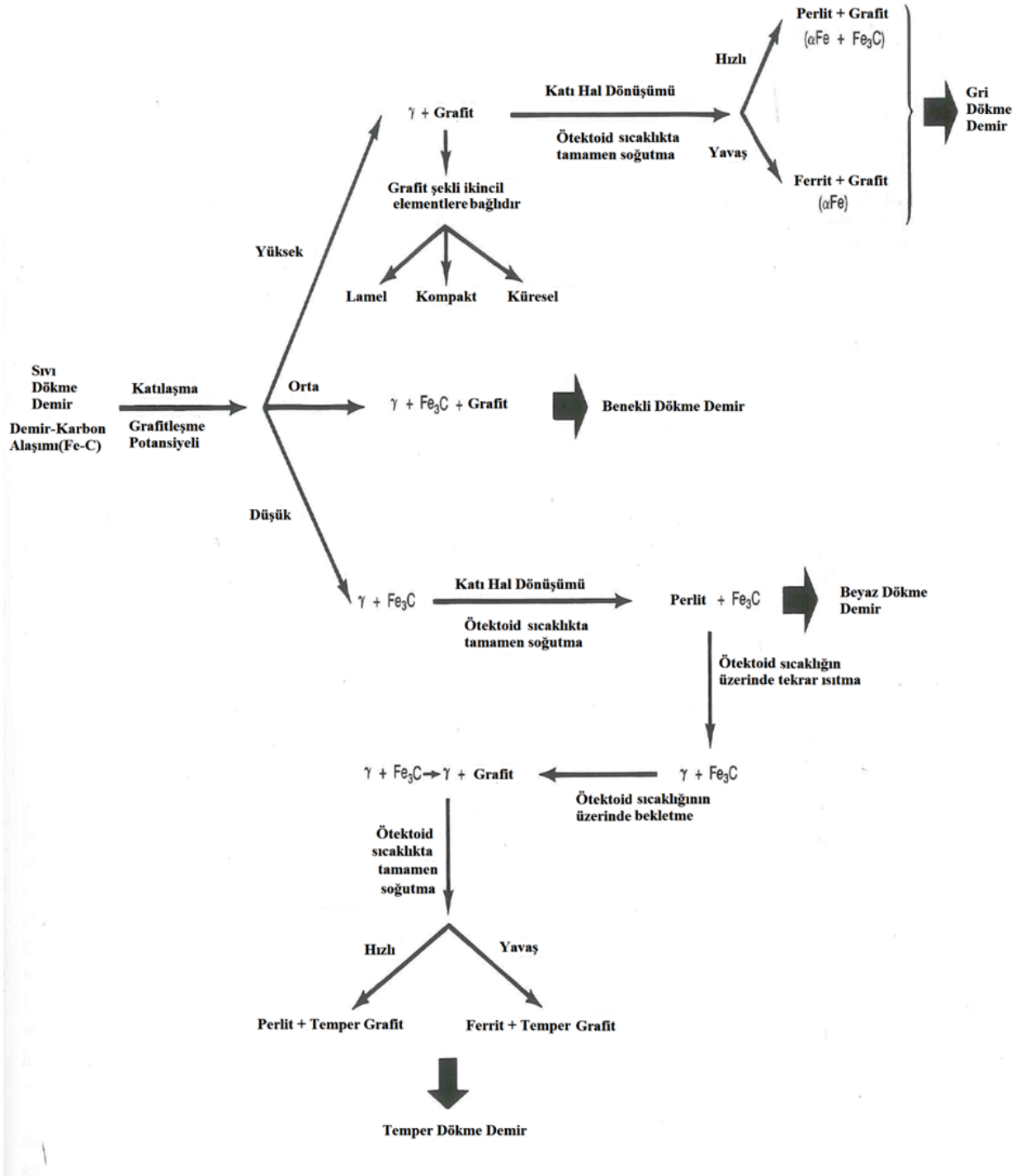
Dökme demirler çeliklerden daha fazla miktarda C ve Si içerirler. Çünkü yüksek karbon içeriği, dökme demirin yapısında çelikten daha zengin bir karbon fazı sergiler.

Dökme demirler öncelikle kimyasal bileşime bağlı olarak, soğuma hızı ve ergiyik işlemleri ve sıvının termodinamik yarı kararlı Fe-Fe₃C ya da kararlı demir-grafit sistemine göre katılaşabilir. Yarı kararlı yolu izlediğinde, karbonca zengin faz ötektik demir karbür olur; kararlı katılaşma yolunu takip ederse karbonca zengin faz grafit olur.[15]

Sadece ikili Fe-Fe₃C yada Demir-Grafit sistemine bakılarak dökme demir %2 C den fazla demir-karbon alaşımı olarak tanımlanabilir. Östeinitin içerisindeki maksimum Karbon çözünürlüğünü Si ve diğer alaşım elementlerinin sıklıkla değiştirebildiği konusunda dikkate alınmalıdır. Bu nedenle, % 2'den daha az C içeren alaşımlar istisnai durumlarda, ötektik yapıda katılaşır, bu sebeple bu alaşımlar yine de dökme demir ailesinin içerisinde yer alırlar.

Kararlı yada yarı kararlı ötektiğin oluşumu sıvının çekirdeklenme potansiyeli, kimyasal bileşim ve soğuma hızı dahil olmak üzere bir çok faktörün fonksiyonudur. İlk iki faktör demirin grafitleşme potansiyelini belirler. Yüksek bir grafitleşme potansiyeli demir ile grafit içerisinde zengin karbon fazına sebep olabilirken, düşük grafitleşme potansiyeli demir ile demir karbüre sebep olabilir. Şekil 4.1'de ticari dökme demirlerin yaygın tiplerinin yapılarını ve elde etmek için gerekli işlemler şematik gösterilmektedir.

Ötektiğin iki temel çeşidi, kararlı östenit-grafit ve yarı kararlı östenit-demir karbür (Fe₃C) kendi içerisinde geniş farklılık gösteren; mukavemet, sertlik, tokluk ve süneklik gibi mekanik özellikler sahiptir. Bu sebeple, dökme demir metalürjisinin temel amacı istenilen mekanik özelliklerde başarıya ulaşmak için gerekli ötektiğin morfolojisini, miktarını ve tipini elde edebilmektir.[15]



Şekil 4.1 Genel ticari dökme demir elde etmek için temel mikroyapı ve işlemleri

4.2 Dökme Demirlerin Sınıflandırılması

Tarihsel olarak, dökme demirin ilk sınıflandırmasının esası kırılmadır. Başlangıçta iki tip demir kabul edilmiştir.

Beyaz Demir: Beyaz, kristal kırılma yüzeyi gözüktür çünkü karbür plakalar demir boyunca ortaya çıkar. Bu yarı kararlı katılaşmanın sonucudur. (Fe₃C ötektik)

Gri Demir: Gri kırılma yüzeyi gözüktür çünkü grafit plakalar kırılma boyunca ortaya çıkarlar. Bu kararlı bir katılaşmanın sonucudur.(Gr Ötektik)

Metalografinin keşfi ve dökme demirlerle ilgili bilgi birikiminin artmasıyla birlikte, temeli mikroyapısal özellikler olan diğer sınıflandırmalar mümkün olmuştur.

Grafit Şekli: Lamel grafit (FG), küresel grafit (SG) , Kompakt (solucan) grafit (CG) ve temper grafit (TG) .[15][16]

Matris: Ferritik, perlitik, östenitik, martensitik ve beynitik(menevişli).

Diğer bir genel sınıflandırmada dökme demirleri 4 temel çeşide ayırır; beyaz demir, gri demir, küresel grafitli demir ve temper demir. Yukarıda belirtildiği gibi beyaz ve gri demir isimlerini kırılma yüzeylerinden almışlardır. Küresel dökme demir ismi aslında döküm şeklinde iken ölçülebilir süneklik gösterdiğinden dolayı türemiştir. Buna karşın, ne beyaz nede gri dökme demir standart çekme deneyinde süneklik göstermez. Temper demir başlangıçta beyaz demir gibidir, sonra 'temperlenir' . Isıl işlem süneklik kazandırır aksi takdirde aşırı derecede kırılgan malzemedir

Dört temel tipin yanısıra, dökme demirler isimlerini uygulamalardan aldıkları özel formları da vardır.

Çil dökme demir beyaz dökme demirin katılaşma sıcaklığına çok hızlı soğutularak üretilir

Benekli demir döküm bölgesi çil ve gri dökme demir arasında orta katılaşma hızındadır. Benekli demir mikroyapısal ve kırılma yüzeyi özellikleri olarak her iki tipe de benzer.

Kompakt grafitli dökme demir (solucansı demir olarak da bilinir) ötektik hücreler içerisinde birbirine bağlı grafitler olarak tanımlanır, tıpkı gri dökme demirin içerisindeki lamel grafitler gibi. Bununla birlikte gri dökme demirdeki grafitlerle karşılaştırıldığında, kompakt grafitli dökme demirin içindeki grafit daha kalın ve daha yuvarlaktır. Yapısı gri ve küresel dökme demir arasındadır.

Yüksek alaşımlı grafitik demir öncelikle oksidasyon direnci ve mukavemeti birlikte yada korozyon direncini gerektiren uygulamalar için kullanılır. Bunlar hem lamel grafitli hem de küresel grafitli olarak üretilirler.

Şekil 4.2’de dökme demirler ticari isimlerine, uygulamalarına ve yapılarına göre sınıflandırılmıştır.[17]

Bu sınıflandırma dökümcüler tarafından nadir kullanılır. En yaygın kullanılanı ticari olanıdır. İlk bölüm iki kategoridir.

Genel dökme demirler: Genellikle uygulama maksatlardır. Alaşımsız ve düşük alaşımlıdır.

Özel Dökme Demirler: Özel uygulamalar içindir. Genellikle yüksek alaşımlıdır. Ticari ve yapısal sınıflandırma arasındaki benzerlik genel dökme demirler son üretim aşamasında elde edilir. Çizelge 1’de verilmiştir. [17]

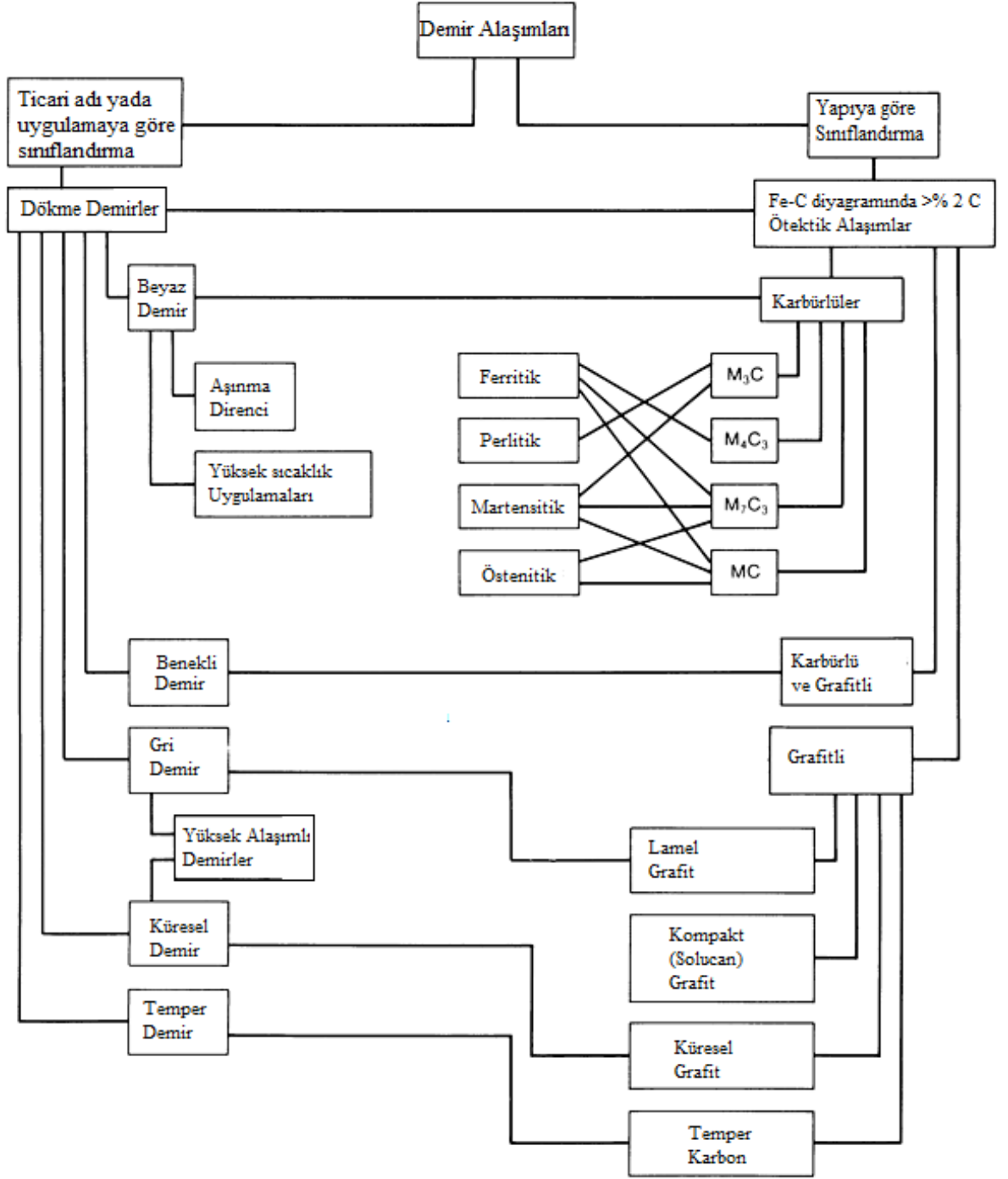
Çizelge 1’de ticari ve yapısal sınıflandırma arasındaki benzerliğin yanı sıra genel dökme demir elde etmek için son işlem aşaması da verilmiştir. Özel dökme demirler genel dökme demirlerden farklı olarak özellikle (>3%) daha yüksek alaşım elementi içerir. Aynı zamanda yapının yüksek sıcaklık uygulamaları, korozyon direnci ve aşınma direnci için özel özelliklere sahip olmasına katkıda bulunur.[16]

Çizelge 1 Ticari isim, mikroyapı ve kırılmaya göre dökme demirlerin sınıflandırılması.

Ticari İsmi	Karbonca Zengin Faz	Matrisi ^(a)	Kırılma Yüzeyi	Son Yapı Sonrası
Gri Dökme Demir	Lamel Grafit	P	Gri	Katılaşma
Küresel Grafitli Dökme Demir	Küresel Grafit	F, P, A	Gümüş-Gri	Katılaşma-Isıl İşlem
Kompakt Grafitli Dökme Demir	Kompakt Solucansı Grafit	F, P	Gri	Katılaşma
Beyaz Dökme Demir	Fe ₃ C	P, M	Beyaz	Katılaşma Ve Isıl İşlem ^(b)
Benekli Demir	Lamel Gr + Fe ₃ C	P	Alacalı	Katılaşma
Temper Demir	Temper Grafit	F,P	Gümüş-Gri	Isıl İşlem
Beynitik Küresel Demir	Küresel Grafit	Östenitik	Gümüş-Gri	Isıl İşlem

(a) F, ferrit; P, perlit; A, Östenit; M, martensit; At, Östemperlenmiş (Beynit).

(b) Beyaz demirlere genellikle ısıtıl işlem, gerilim giderme ve östenit dönüşüme devam etme durumları haricinde uygulanmaz.[15][16]



Şekil 4.2 Dökme Demirlerin Sınıflandırılması

Sınıflandırmasını yapmış olduğumuz dökme demirleri farklı kaynaklarda farklı isim ve farklı sayılarda görmek mümkündür. Biz bu aşamadan sonra rüzgar türbini pervane göbeği üretimi için seçmiş olduğumuz küresel grafitli dökme demir üzerinde duracağız.

Küresel grafitli dökme demir, birbirinden bağımsız olarak (British Cast Iron Research Association (BCIRA) ve International Nickel Company (INCO) tarafından geliştirilmiş ve ilk defa Amerikan Dökümcüler Cemiyetinin 1948 deki yıllık toplantısında döküm endüstrisi için yeni bir malzeme olarak tanıtılmıştır.[18]

Dökme demir ailesinde bulunan küresel grafitli dökme demirler, küresel grafitli dökme demir, nodüler vb. olarak ta bilinir. Türk standartlarında adı “Küresel Grafitli Dökme Demir” olarak bilinir. Lamel grafitlerde görülen çentik etkisini azaltmak amacıyla, katılaşma sırasındaki müdahalelerle (%0,5 Ce veya %0,5 Mg ilavesi gibi) iç yapıda küre şeklinde grafit oluşumunun sağlandığı dökme demirlerdir. Küre şekilli grafitler dökme demire yumuşaklık (süneklik) kazandırır.[19]

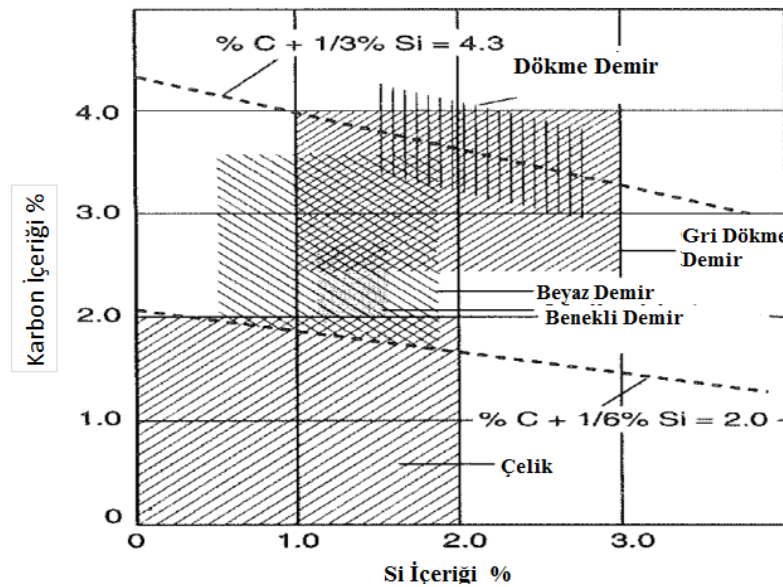
Endüstrinin bütün alanlarındaki kritik parçalarda KGDD’in çok ayıdaki başarılı uygulamaları bu malzemenin çok yönlülüğünü belirtir ve beraberinde pek çok ilave uygulama sunar. KGDD’i güvenilir şekilde kullanmak için tasarım mühendisleri bu malzemenin mekanik özelliklerini dikkate almak zorundadırlar. Bu mekanik özellikler; elastik davranış, statik dayanım, süneklik, sertlik, kırılma tokluğu ve yorulma özellikleridir. Mekanik özelliklerin yanı sıra termal genleşme, termal iletkenlik, ısı kapasitesi, yoğunluğu, manyetik ve elektriksel özellikler ile şekillendirilebilme ve işlenebilirlik KGDD’lerde ön plana çıkan özelliklerdir.

Küresel grafitli dökme demirler tek bir malzeme değil, iç yapı kontrolüyle farklı özelliklere sahip olabilen bir malzeme grubudur. Bütün bu malzemelerin ortak özelliği küresel yapıya sahip grafit tanecikleridir. [19]

5.1 Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Yapısal ve Mühendislik Özellikleri

5.1.1.1 Dökme demirin mikro yapısal özellikleri

Karbon ve silisyum dökme demirin özelliklerinde etkin rol oynayan en önemli iki elementtir. Dökme demirlerde karbon ve silisyum içerikleri, içyapı özelliklerini değiştirir. Şekil 5.1’de karbon ve silisyumun birlikte döküm yapısına olan etkileri görülmektedir[22]. Dökme demirlerin metal özellikleri büyük ölçüde metalografik yapılarına bağlıdır. Dökme demirin yapısal bileşikleri ayrı tipte dökme demirlerin ve değişik şekilli grafitlerin oluşumuna neden olurlar. En önemli yapılar; grafit, sementit, ferrit, perlit, ostenit, ledeburit, steadit ve bainittir.[21]



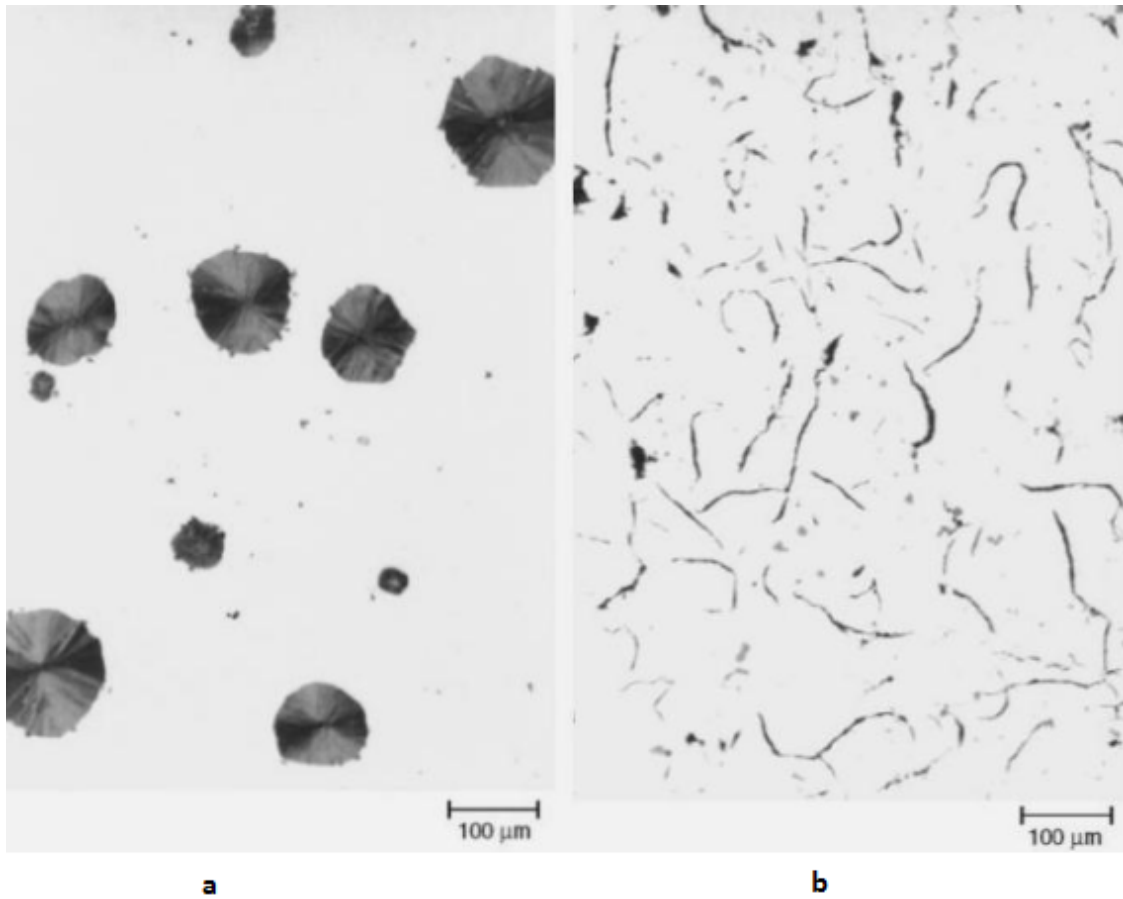
Şekil 5.1 Çeşitli dökme demirler ve çelik için C ve Si içeriğinin değişimi

5.1.1.2 Grafit

Dökme demirlerde karbon, kimyasal bileşim ve soğuma hızına bağlı olarak, bileşik veya serbest halde bulunabilir. Gri dökme demirde katılaşmayla birlikte grafit lamelleri de oluşur ve düşük yoğunlukları nedeniyle toplam döküm hacminin % 6-17 sine erişebilirler. Dökme demirde lamel'den farklı şekilde de grafitler oluşabilir, örneğin beyaz dökme demirin ısıtılması ile temper karbonu veya rozet şekilli grafitler oluşabilir.[21]

Grafit, gerek kristal şekli gerekse bağ kuvvetleri yönünden zayıftır. Bunun için grafitin şekli, büyüklüğü ve yapıdaki dağılmasına göre dökme demirin özellikleri üzerinde büyük etkisi vardır. Gri dökme demirde süneklik özelliğinin olmayışı lamel grafitler nedeniyledir. Temper dökme demir yapısındaki rozet şekilli grafitler veya küresel grafitli dökme demirdeki küre şekilli grafitler süneklığe lameller kadar kötü etki etmez(. Şekil 2.7’de küresel ve yaprak şekilli grafitler görülmektedir.

Dökme demirde saf karbonun en kararlı halidir. Önemli fiziksel özellikleri düşük yoğunluk, düşük sertlik ile yüksek ısıl iletkenlik ve kayganlıktır. Grafit, şekil itibariyle iğnemsî yapıdan küreselliğe kadar değişen mekanik özellikler üzerinde etkin bir rol oynayan yapıdır. İğnemsî yapıdaki grafitler dökme demir yapısında çatlak etkisi yaparken, küresel grafit tam ters etki ile çatlak durdurucu olarak görev yaparak grafitin mekanik özellikler üzerindeki ilginç etkilerini göstermektedir[22].



Şekil 5.2 Temper dökme demirin içyapısındaki küresel grafitler (a) ve gri dökme demirin içyapısındaki yaprak şekilli grafitler (b)

5.2 Mikro Yapı

Küresel grafitli dökme demirde katılaşma esnasında ilk görülen yapı östenittir. Bu sıradan metalik olmayan kalıntılar ve östenit içinde çözünebilen maksimum karbon miktarını aşan karbon grafit olarak ayrışır. Östenit içindeki maksimum karbon çözünürlüğü yaklaşık olarak;

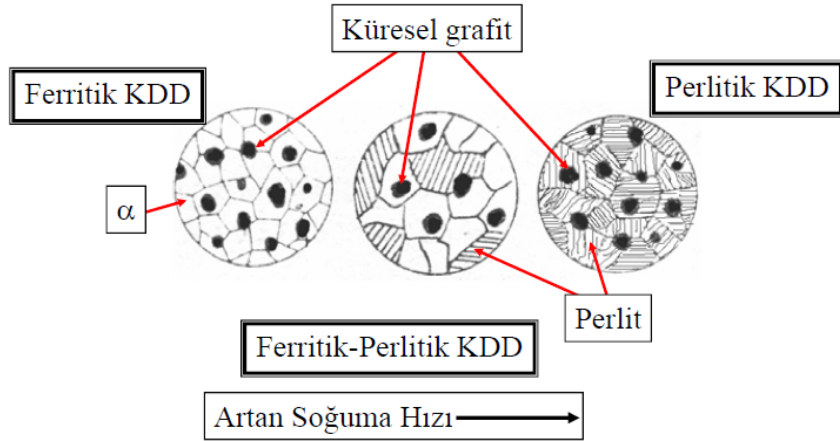
$$\%C + 1/3 \%Si = 2' \text{dir.}$$

Sıcaklık düştükçe östenit içinde karbon çözünürlüğünün azalması nedeniyle östenitik yapıdan ayrılan karbon difüze olarak grafit halinde toplanır. Ayrıldığı bölgeyi karbonsuzlaştırarak ferrit oluşumunu sağlar. Ferritik yapıli küresel dökme demir üç farklı şekilde elde edilebilir;

- 1- Sıvı küresel dökme demirin katılaşmasını çok yavaş bir şekilde gerçekleşmesini sağlamak.
- 2- Dökme demirin ağırlığına göre % 0,20 Magnezyum karbür alaşımı kullanmak.
- 3- Perlitik küresel dökme demir tavlama.

Ferritik yapı yüksek uzama kabiliyetine sahiptir. Ferrit oluşumu, perlit nispeten yüksek sıcaklıklarda başlar ve perlit oluşumuyla devam ederek perlit oluşumu tamamlanmadan biter. Perlit oluşumu daha düşük sıcaklıklara kadar devam eder.

Küresel grafitli dökme demirlerde ferrit ve perlit miktarlarının birbirine göre oranları, malzemenin kimyasal bileşimi ile soğuma hızına bağlıdır ve malzemenin çekme, akma, uzama ve sertlik gibi mekanik özelliklerini doğrudan etkilerler[25].



Şekil 5.3 Soğuma hızının dökme demir yapısına olan etkisi

Şekil 5.3 'de görüldüğü gibi artan soğuma hızı mikro yapıyı tamamen değiştirmekte ve küresel grafit haricinde olan ana yapı dönüşüm göstermektedir. Bu dönüşüm sadece mikro yapısal olmakla kalmaz aynı zamanda mekanik özelliklerin tamamı değişir. Örneğin ferritik küresel dökme demir sünek bir yapıda iken perlitik küresel dökme demir daha sert ve kırılgan yapıya sahiptir.[25]

5.3 Küresel Grafitli Dökme Demir Üretimi

KGDD, ilave magnezyum içeren düşük sülfür sıvılı dökme demirin ısıtılması ile oluşmakta ve genellikle döküm esnasında veya hemen öncesinde Silisyum içeren alaşımla aşılması sonucunda oluşmaktadır. Sünek demir oluşturmak için yapılacak ısıtılma işlemi; grafit formu değiştirmek için magnezyum ilavesi, bu işlemi takip eden veya bu işleme kombine olan karbürlerden serbest kalan grafitik yapıyı sağlayan silikon içeren malzemenin aşısıdır. Ferrit; yumuşak, düşük karbonlu alfa (α) fazıdır ve düşük çekme dayanımı ve yüksek süneklik ortaya koymaktadır. Soğuma oranı, birçok farklı değişkenden etkilenmekte ve bu değişkenler, akış oranı, akış sıcaklığı, soğutulacak demirin hacmi, demirin yüzey hacmi, kalıp malzemesinin ısı iletkenliği, dökümü çevreleyen kalıp malzeme miktarı, kalıp içerisindeki dökümlerin sayısı, iç nüvelerin lokasyonu, kolon ve kirişlerin pozisyonları gibi parametreleri içermektedir[15,16].

KGDD'in başarılı üretiminin anahtarı, magnezyumun tek başına ya da seryum gibi toprak nadir elementler ilavesiyle dökme demirde küresel grafitin oluşumunu meydana

getirmektir. Seryum, kalsiyum, lityum, sodyum, yitrium gibi diğer elementler de küresel grafit oluşumunu teşvik ediyorken, magnezyum ilavesi, KGDD üretimi için en basit ve en ekonomik yöntemdir[26].

Yeterli miktarda magnezyum ilavesinden sonra demir aşılır ve dökülür. Grafit sonra küreler şeklinde çökelir. Sıvı demire magnezyumu ilave etmek kolay değildir. Magnezyum düşük sıcaklıkta (1090⁰C) kaynar, bu sıvı demirin şiddetli karışmasına ve Mg 'un yüksek buhar basıncından dolayı şiddetli bir reaksiyona sebep olur. Beyaz magnezyum oksit dumanı ile eşlik edilen işlem esnasında “magnezyum parlak ışığında” yükselme olur. Mg ilave işlemi ile oksitler ve sülfidler metal yüzeyinde cüruf oluşturur. Cüruf dökümden önce mümkün olduğunca tamamen uzaklaştırılmalıdır. Yoksa oluşmuş cüruf döküm parçalarda zararlı kalıntılara yol açabilir[26].

Bu çalışmada kullanılan ferritik küresel grafitli sünek dökme demir malzemesinin üretim yöntemi olan kum kalıba döküm metodunun avantajları, düşük maliyet ve düzenli hazırlanmış karmaşık içyapıların oluşturulabilmesidir. Majör dezavantajları ise pürüzlü yüzeyler ve düşük döküm hassasiyetleridir. Bu da yüksek maliyetli işleme ve bitirme operasyonlarını beraberinde getirmektedir.

KGDD dökümleri üretiminin ilk adımı, şarj malzemesinin dikkatli seçimidir. Çelik hurdası, dönüş hurdası ve diğer malzemelerin bileşimleri tam olarak bilinmelidir. Çünkü KGDD üretmek için bileşimdeki elementlerin belirli aralıkta kalması gerekir. Ayrıca matris yapısı da önemli ise bazı elementlerin özellikle kontrol edilmesi gerekir. C, Si, ferrit oluşumunu desteklerken, Mn, Ni, Cu, N, Mo, Sn, P ve Sb perlit oluşumunu destekler. Ferritik dökümler için yüksek saflıkta demire ve yüksek saflıkta çelik hurdasına ihtiyaç duyulmaktadır. Yüksek kaliteli KGDD dökümlerin üretimi bileşim, döküm sıcaklığı, bekleme zamanları v.b.'nin sıkı şekilde kontrolüne bağlıdır. Kupol ocakları ve indüksiyon ergitme fırınları genellikle ihtiyacı karşılar. Ancak şu anda üretimde çekirdeksiz indüksiyon ocakları yaygındır[26].

İkinci adım, küreselleştirme işlemidir. Bu zamana kadar birçok küreselleştirme metodu geliştirilmiştir. KGDD küreleştirme ve ilave yöntemleri için kullanılan çeşitli Mg alaşımları Çizelge 2’de verilmiştir. Bireysel bir dökümhane için işlem yönteminin seçimi önemlidir ve birçok faktör içerir.

Çizelge 2 Tipik Mg küreselleştirme alaşımları ve kullanılan ekleme yöntemleri.

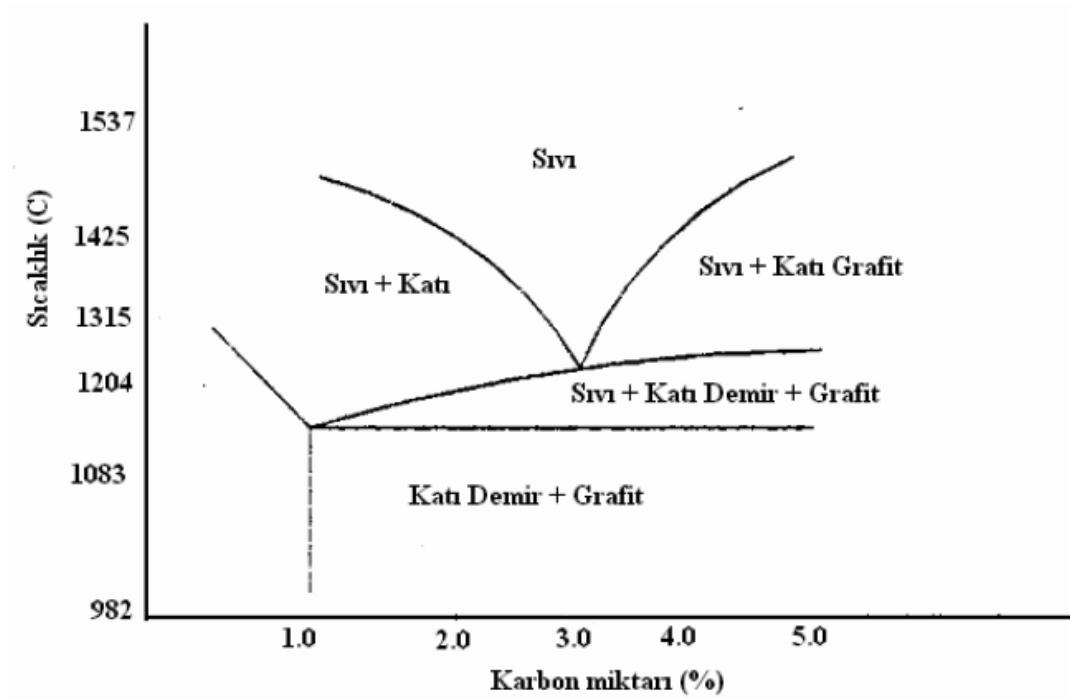
Alaşımlar	İlave Etme Metodu
NiMg	Açık Pota
CuMg	
FeSiMg (% 3–5)	Sandviç, Tandiş Kapak
FeSiMg (% 5–7)	Flotret, İnconod, Kalıp içinde
FeSiMg (% 8–10)	Gazal
FeMg pelletleri (% 6–10)	
Mg kaplı tel	Daldırma, Dönen pota
Mg kok	Daldırılmış ilaveli pota
FeSiMg (% 30–40)	
Saf Mg çubuk	Konvertör, basınçlı pota
Saf Mg toz	Daldırma, enjeksiyon

Aşılama, KGDD dökümlerin üretimi için gerekli bir adımdır. Potada, kalıba metal akışı sırasında ve kalıp içerisinde olmak üzere üç farklı şekilde Mg eklenebilir. KGDD’in aşılama, çil eğilimini azaltır ve oluşan küresel grafit sayısını arttırır. Aşılama için kullanılan çoğu Al, Ca, Ba, Mn, Zr içeren Fe-Si alaşımlarıdır. Bu elementler alaşımların çözülebilirliğini arttırmak için kullanılır. Aşılama zamanla etkisini kaybeder. O nedenle aşılama mümkün olduğunca hemen döküm işleminden önce yapılmalıdır. En yüksek verim almak için döküm sıvısına ilave edilmelidir. Ayrıca kaliteli döküm için aşılama özellikleri ve miktarları kontrol altında tutulmalıdır.

Yüksek kaliteli KGDD üretimi, dikkatli olarak kontrol edilmeye ihtiyaç duyan birçok diğer kademeleri de içerir. Küreleştirme işleminden önce aşırı ısıtma ve bekleme zamanı sınırlı olmalıdır. Magnezyum ekleme işlemi 1450-1510⁰C sıcaklıklarında yapılmalıdır. Önce kesitlerde ve döküm uçlarında karbür oluşumunu teşvik edebileceğinden dökümde aşırı sıcaklık gradyanları ve metalin soğuk dökülmesi istenmez. Bu durumdan, 25 mm kesitli dökümler için 1315⁰C’den az olmayan sıcaklıklarda ve 6 mm dökümler için 1425⁰C üzerinde dökülmesiyle, çıkıcılar ve yolluk uzantıları gibi özellikleri içeren yolluk sistemiyle kaçınılabılır[27].

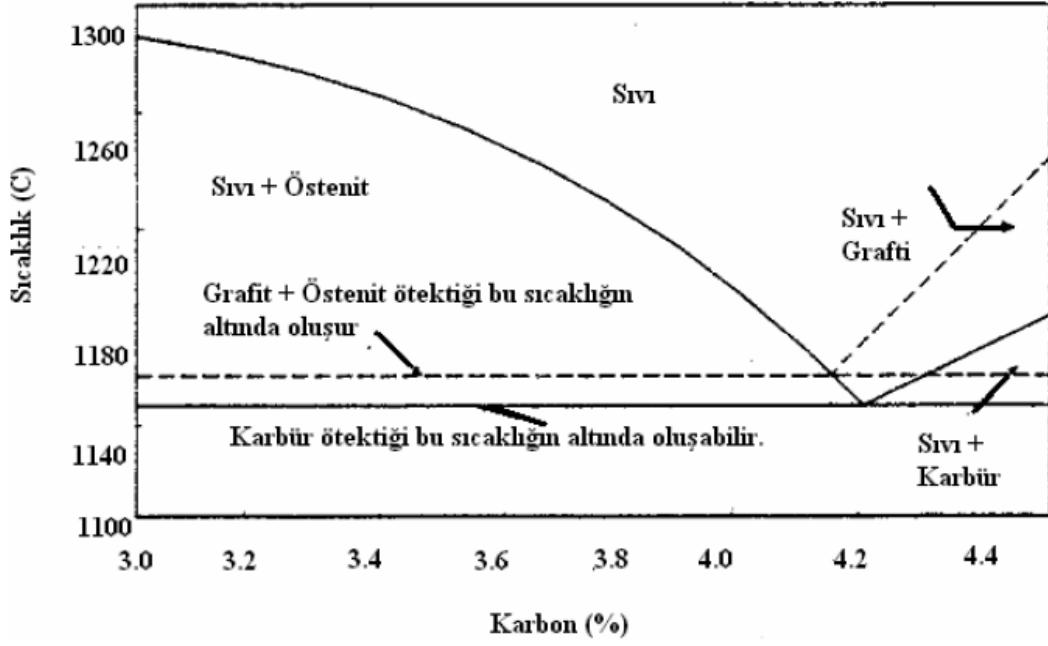
KGDD'in katılaşması, tamamı ile ötektik dönüşüm tarafından belirlenir. Bu olay sıcaklık ve karbon miktarının bir fonksiyonu olarak tanımlanmıştır. Dökümcüyü ilgilendirmeyen dönüşümler bu tanımda ihmal edilmiştir.

Şekil 5.4'de aynı zamanda, ötektik altı bir analizde katılaşma sıcaklığının karbon miktarı ile düştüğünü ve %4.3 miktarında 1150°C olduğunu göstermektedir. Bundan sonra karbon miktarı ile ergime sıcaklığı artmakta, ötektik katılaşma sıcaklığı ise %1.75 karbon miktarının üzerinde değişmemektedir[26].



Şekil 5.4 Fe-C-Si denge diyagramı % 2.5 seviyesindeki yüksek sıcaklık bölgesi.

Pratik uygulama açısından ise, Şekil 5.5'deki en önemli noktayı, ergime ve ötektik katılaşma sıcaklıklarının %4.3 karbon miktarında çakışmaları oluşturur. Bu noktaya ötektik adı verilir. Ötektik karbon miktarının altındaki alaşımlar alt ötektik, üstündeki alaşımlar üst ötektik olarak tanımlanırlar[26].

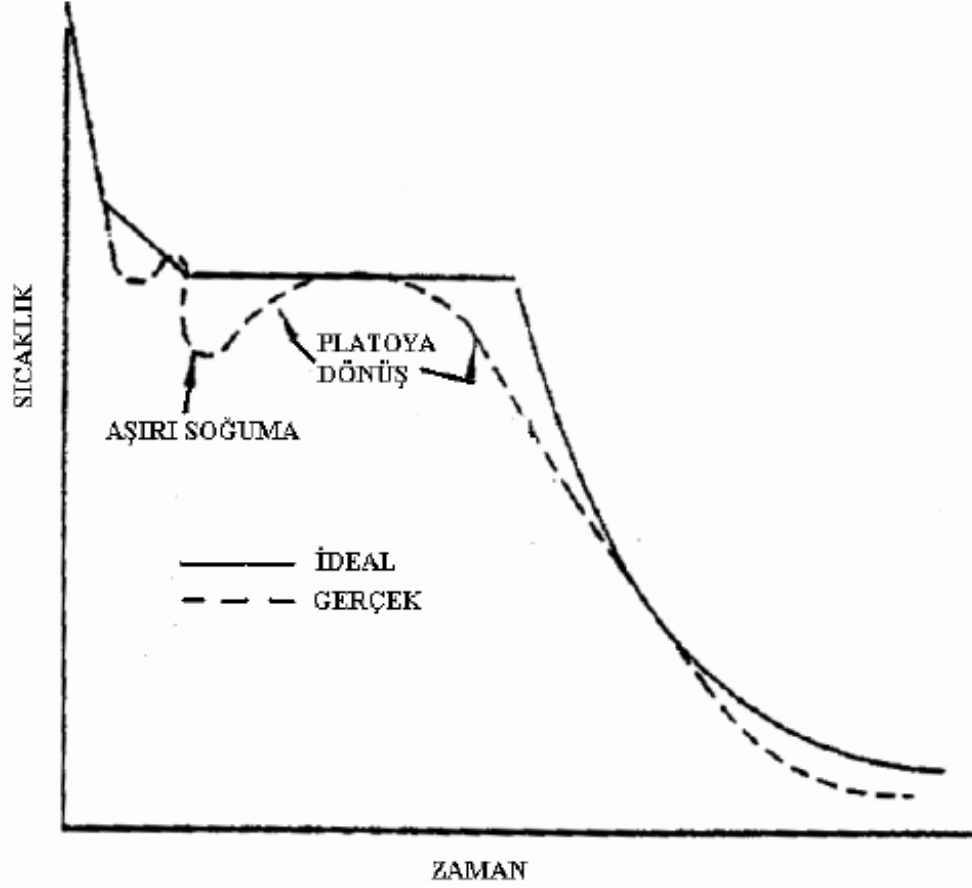


Şekil 5.5 Fe-C denge diyagramı (Kesik Çizgiler Demir-Grafit Sistemi)

KGDD’de ötektik yapıya etkisi en fazla olan element silisyumdur. Silisyum ötektik yapıyı daha düşük karbon miktarlarına kaydırmakta ve eşdeğer miktarın belirlenmesinde alaşımın karbon miktarı ile toplanır. Bu iki değer toplamına karbon eşdeğeri veya ekuvalenti denir. Yapılan incelemeler %1 silisyumun ötektik yapıyı %0.31 azalttığını ortaya koymuştur.

CE değerinin tam olarak 4.3 olması, yani alaşımın ötektik olması çok nadir sağlanan bir olaydır. Çok az miktarda da olsa kaçınılmaz olan bir aşırı soğuma, katılaşmanın ötektik altı veya ötektik üstü olarak başlamasına sebebiyet verir.

Ötektik katılaşma veya ötektik katılaşmadan farklılıklar zamana bağlı olarak sıcaklığın ölçülmesi ile belirlenir. Ötektik altı KGDD’in tipik ideal ve gerçek soğuma eğrileri, Şekil 5.6’da gösterilmiştir[26].



Şekil 5.6 Ötektik altı KGDD'in tipik ideal ve gerçek soğuma eğrileri

Fe ve C olmak üzere iki bileşenden oluşan bir sistemin soğuma hızı, homojen bir faz mevcut olduğu sürece, sistemin içinde bulunduğu ortamın ve alasımın termik özelliklerine bağlıdır. Eriyikten, 1'inci faz; katı durumda demir, grafit veya demir karbür ayrışmaya başladığında, soğuma hızı azalır. Daha sonra 2'inci faz oluştuğunda ısı durumu, kayıpları dengeleyeceğinden bir duraklama meydana gelir.

Soğuma eriyik fazın tamamı ile katılaşmasından sonra tekrar devam eder. Soğuma eğrisinin ideal durumdan sapmasının izlenmesi bize KGDD'in katılaşması hakkında önemli bilgiler verir. Soğuma eğrisindeki ilk duraklama, eriyikten primer fazın, yani katı fazın, katılaşma başlangıcını gösterir. Ötektik altı gri dökümde bu faz östenitten ibarettir. Bu anda katılaşma hızı yüksektir ve denge durumu sıcaklığına erişildiğinde yavaşlayacaktır. Bundan sonraki soğuma eriyiğin ötektik sıcaklığına erişmesini sağlar ve 2. faz gecikmeli olarak katılaşmaya başlar[26].

Soğuma noktasının oluşumunun nedeni budur. Sıcaklığın tekrar yükselmesi, demir ve grafitin beraberce katılaştığını gösterir. Bu kuvvetli sıcaklık artışı rekalesens veya platoya dönüş olarak adlandırılır.

Rekalesens katılan iki fazın ısı durumları ve soğuma hızına bağlı olarak ötektik sıcaklığa erişebilir veya onun altında kalabilir. Soğuma hızı katılma ısılarının üzerinde olduğunda, ne rekalesens ne de duraklama sıcaklığı veya noktası görülebilir. Soğuma eğrisinin, katılma sonuna doğru eğimi, katı fazlardan birinin tümü ile eriyikte kaybolduğunu gösterir. İhtilafı olmasına rağmen bu fazın, KGDD’de grafit olduğu üzerinedir ve ikincil çekinti olayının nedenini teşkil eder.

KGDD’in ötektik katılması iki kısımda incelenmiştir[28].

KGDD’lerde ötektik altı alaşımların katılması genellikle dentritler şeklinde primer bir fazda başlar. Bu sürecin devamında soğuma olur ve eriyik ötektik sıcaklığa erişir. Bu sıcaklıkta grafit ve östenit beraberce katılmaya başlarlar ve platoya dönüş ile sıcaklık yükselerek ötektik sıcaklığa çıkar. Ötektik katılması kısmen östenit dentritlerinin sürekli büyümeleri, kısmen de hem östenit hem de grafitin eşli büyümesiyle karakterize edilir ve östenit kabukları grafiti tamamıyla sarar[26].

Grafit-östenit taneleri birbirleri ile ve östenit dentritleri ile temas halindedir. Bu kürecikler rastgele bir şekilde bağımsız gruplar oluştururlar. Bu gruplar ötektik hücre olarak adlandırılır. Katılmanın ileri bir safhasında sıvı, karbonca fakirleşir ve hücre sınırları grafitten tamamen arınır. Böylece döküm parçaların orta kısımlarındaki bölgelerde karbürler mevcut olabilir. Katılmanın bu özelliği soğuma eğrisindeki kavisin nedeni olmaktadır. Bu sınırlar mikroskop altında koyu olarak görülür[27].

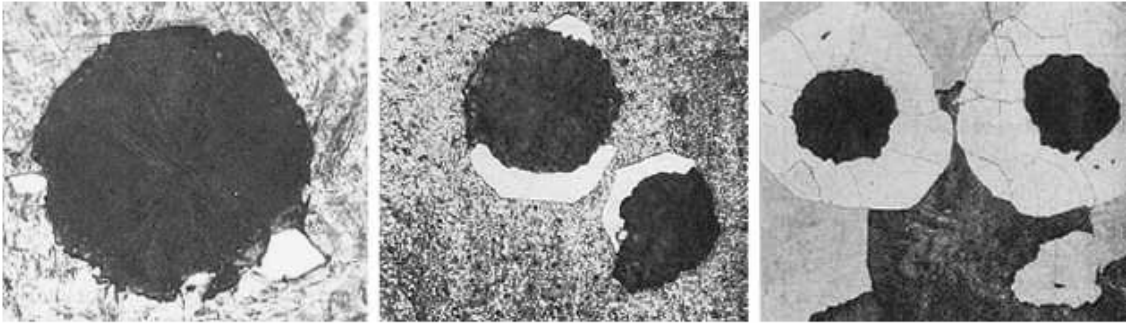
Ötektik üstü katılma, ötektik altı katılmaya benzer bir mekanizmaya sahiptir. Yalnız primer olarak küreler halinde çökelen faz grafitir. Başlangıçta sıvı, ötektik sıcaklığın altına soğutulur. Takiben hem demir hem de grafit ötektik altı KGDD’in katılmasına benzer şekilde oluşmaya başlar. İşlem, yine kısmen grafitten serbest östenitin çökmesi, kısmen de küreciklerin çökmesiyle devam eder.

Grafitin küresi ötektik ortağı olan östenitle çevrenmeye başlar. Grafit östenit yapısı katmerli bir şekilde oluşur. Oluşan tabaka ısı çıkışına dik yöndedir. Bu olay ötektik altı

alaşımlarda gözlenmez. Çünkü başlangıçta katılaşılan faz östenittir. Bunun sonucu olarak küre dağılımı sıvıdaki karbon konsantrasyonuna bağlı olarak üniform hale gelir.

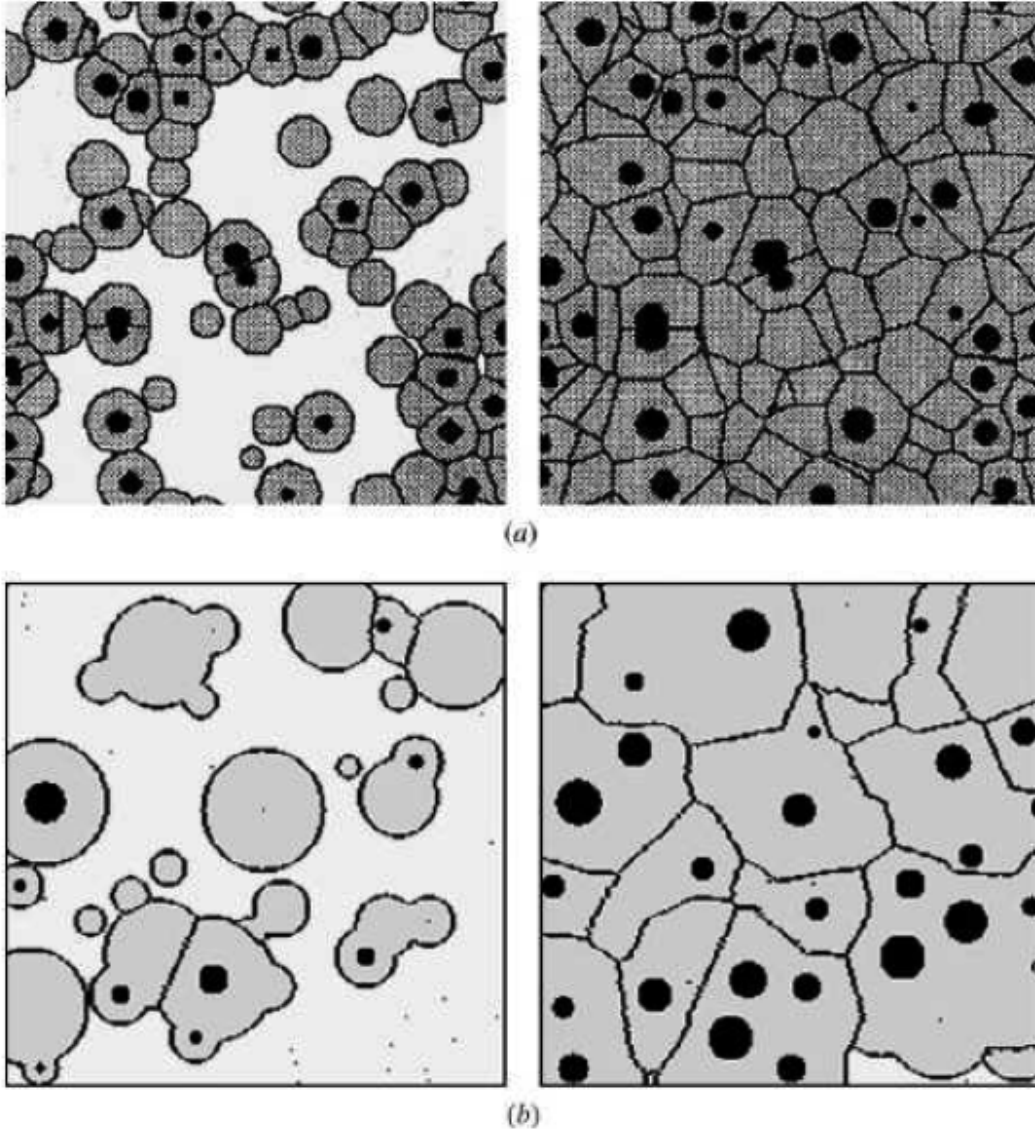
Kürecik tabakası oluşur oluşmaz sıvı, küreciğe yakın yerlerde karbonca fakirleşir ve grafitten serbest östenit tabakası oluşur. İşlem devam ederken katmer şekilli yapı grafitten serbest fazın dendrit olmasına yol açar. Ancak, yapı tam anlamıyla dendritik değildir. Bunun sebebi de, dendrite benzer bileşenin ısı çıkış yönüne paralelden ziyade dik olmasıdır. Çünkü metalik olmayan inklüzyonlar, muhtemelen karbürler gibi segregasyon olayları bu alanda gözlenir[28].

Dökme demirlerin mikro yapı katılaşmasına katkı sağlayan parametreler, mikro yapı içerisindeki katılaşma dönüşüm fonksiyonunun en önemli ve en başta gelen problemi, mikro yapı boşluklarının oluşturduğu kısıtlamalardır. Aşağıdaki şekilde, küresel grafitli dökme demirlerde ferrit gelişiminin üç kademesi gösterilmiştir[15,16].



Şekil 5.7 Küresel grafitli dökme demirler ferrit gelişim kademeleri.

Küresel grafitli dökme demirlerde mikro yapı katılaşmasının sanal görünümü ise Şekil 5,8’de gösterilmektedir.



Şekil 5.8 (a) Küresel grafitli dökme demirlerde mikro yapı katılaşma başlangıcı
(b) Küresel grafitli dökme demirlerde mikro yapı katılaşmasının tamamlanması

5.3.1 Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Sınıflandırılması

KGDD'ler çeşitli normlara göre sınıflandırılabilir. TS 526'ya göre Çizelge 3'de ve Alman DIN 1693 standardına göre Çizelge 4'de KGDD'lerin sınıflandırılması görülmektedir.

KGDD'ler sınıflandırılırken TS 526'ya göre çekme mukavemeti $600-700 \text{ N/mm}^2$ 'nin üzerindeki KGDD'ler demir esaslı mühendislik malzemeleri içerisinde önemli bir yere sahiptir. Yüksek mukavemet ve iyi dökülebilirlik yanında, küresel şekilli grafitler, yapıda yağlayıcı görevi görmektedir.[29]

Çizelge 3 TS 526 göre Küresel Dökme Demirlerin sınıflandırılması

KGDD'lerin Kısa Gösterilişi	İç Yapısı	Çekme Dayanımı En Az (N/mm2)	0.2 Akma Dayanımı En Az (N/mm2)	Kopma Uzaması En Az (%)	Brinell Sertlik Değeri (BSD)
DDK-40	Daha çok ferritik	420	280	12	140-201
DDK-50	Ferritik-Perlitik	500	360	7	170-241
DDK-60	Perlitik-Ferritik	600	400	3	192-269
DDK-70	Daha çok perlitik	700	450	2	229-302
DDK-80	Perlitik	800	500	2	248-352
DDK-35.3 ~	Ferritik	350	220	22	-
DDK-40.3 ~	Ferritik	400	250	18	-

~ Bu malzemeler darbeli çalışma için öngörülen tiplerdir ve standartta çentik vurma dayanımı ile ilgili koşullar verilmiştir.

Çizelge 4 DIN 1693'e göre Küresel Dökme Demirlerin sınıflandırılması

Kısa gösterilişi	Çekme dayanımı (N/mm2)	0.2 Akma dayanımı (N/mm2)	Uzama (%)	Doku
GGG-40	400	250	15	Genellikle ferritik
GGG-50	500	320	7	Ferritik-perlitik
GGG-60	600	380	3	Perlitik-ferritik
GGG-70	700	440	4	Genellikle ferritik
GGG-80	800	500	2	Perlitik

Bir başka sınıflandırmada KGDD'ler, herhangi bir ilave ısıtılma işlemi gerek duyulmaksızın genel olarak üç şekilde sınıflandırılırlar.

5.3.1.1 Ferritik KGDD

Küresel grafitler ferrit ana yapısındadır. Yüksek darbe direnci, göreceli iyi termal iletkenlik, yüksek magnetik geçirgenlik, düşük histerisis kayıpları, iyi işlenebilirlik ve bazı ortamlardaki iyi korozyon direnci belirgin özellikleri arasında sayılabilir.

5.3.1.2 Ferritik – Perlitik KGDD

Ferrit ve perlit karışımı, ana fazında küresel grafitler bulunduran ve en yaygın olarak kullanılan bir türdür. En ucuz tip olup belirgin özellikleri arasında iyi işlenebilirlik gelse de diğer özellikleri ile tam Perlitik ve tam Ferritik KGDD’ler arasında bulunur.

5.3.1.3 Perlitik KGDD

Perlit ana fazındaki küresel grafit metalografik yapısını belirler. Yüksek mukavemet, iyi aşınma direnci, düşük magnetik geçirgenlik, yüksek histerisis kaybı, iyi işlenebilirlik, orta darbe direnci ve süneklik belirgin özellikleri arasında sayılabilir.

Dökme demirler içinde özel yeri olan KGDD ailesini bu üç grup içinde sınırlamak mümkün değildir. Özel durumlarda mühendislik ihtiyaçlarına cevap veren diğer KGDD çeşitleri de vardır. Martenzitik, östenitik ve östemperli KGDD’ler bunlar arasında sayılabilir ancak pahalı türlerdir.[28,29]

Demir esaslı malzemelerin hiçbirinde KGDD’in sahip olduğu mekanik özellikleri ve dökülebilirlik özelliği bir arada bulunamamaktadır. KGDD’in işlenebilirliği eşdeğer sertlikteki gri dökme demirden ve eşdeğer mukavemete sahip olan çelikten daha iyidir. Aynı zamanda korozyon ortamlarda korozyona karşı direnci gri dökme demirinkine eşit ve karbon çeliğinkinden daha iyidir.

Kullanma süresinde gösterdiği performans, KGDD’den yapılmış krank şaftlarının, kalıpların, merdanelerin ve dişlilerin aşınmaya karşı göstermiş olduğu dirençlerin en iyi kalitedeki gri dökme demirinkine eşit ve karbon çeliğinkinden yüksek olduğunu göstermiştir. Ani sıcaklık değişimlerine karşı KGDD’lerin gösterdiği direnç, gri dökme demirden ve çoğu çelikten daha iyidir. Örneğin 7600C’den soğuk suya daldırılan ince çelik parça muhtemelen çarpılacak, gri dökme demir ise çatlayacaktır. Oysa aynı kesite sahip KGDD parça, sıcaklık değişimini bozulmadan karşılayabilmektedir.

Ferritik ana dokulu KGDD'ler yüksek süneklik ve çentik darbe dayanımının yanında ideal işlenebilme özelliklerine sahiptir. Perlit miktarı arttıkça sertlik artmakta ve çekme dayanımı değerleri de yükselmektedir. Bir çekme deneyi özelliği olan kesit daralması KGDD'ler için genellikle kullanılan bir özellik değildir. Ancak bir fikir vermek için, kesit daralma yüzdesi yaklaşık olarak uzama yüzdesine eşit veya biraz fazla olduğu söylenebilir.

KGDD'lerde kesit kalınlığı, katılaşma esnasındaki soğuma hızını etkilediğinden, bileşime bağlı olarak, ferrit ve perlitin sertliği ve yapıdaki perlit oranı ve tane büyüklüğü değişmektedir. Yüksek mukavemet ve sertlik, dolayısıyla düşük süneklik, ince perlitik yapı ile elde edilir[28].

5.4 Mekanik Özellikler

Küresel Grafitli Dökme Demir genellikle döküm halleri ile kullanılırlar ve bunlar çoğunlukla perlitik-ferritik yapıdadır. Ferritik matris şarj malzemesi olarak pik dökme demir kullanıldığında döküm şartlarına bağlı olarak elde edilir. Genellikle ferritik matris ısıtma işlemi ile üretilmektedir. Isıtma işlemleriyle yüksek mukavemetli matrisler elde edileceği gibi, sünekliğin ve dayanımın artırılması da mümkündür. Küresel grafitli dökme demirin işlenebilirliği, eşdeğer sertlikteki gri dökme demirden ve eşdeğer mukavemete sahip çelikten daha iyidir.

Ayrıca korozyon ortamlarında aşınma direnci gri dökme demire eş ve genellikle çelikten daha iyidir. Küresel grafitli dökme demirde kesit boyutu, katılaşmada soğuma hızını etkilemesi sonucu bileşime de bağlı olarak, ferrit ve perlitin sertliği ve yapıdaki perlitin oranı ve tane büyüklüğü ile değişmektedir. Yüksek mukavemet, sertlik ve düşük süneklik ince perlitik veya beyritik matris ile elde edilir. Buna karşılık mukavemet ve sertlikteki azalma ile beraber yüksek süneklik, matrisin tamamen ferritik olması ile mümkündür. Çizelge 2.1. de ferritik ve perlitik mikro yapıya sahip küresel grafitli dökme demirlerin genel mekanik özellikleri verilmiştir.[30]

Çizelge 5 Küresel grafitli dökme demirin mekanik özellikleri

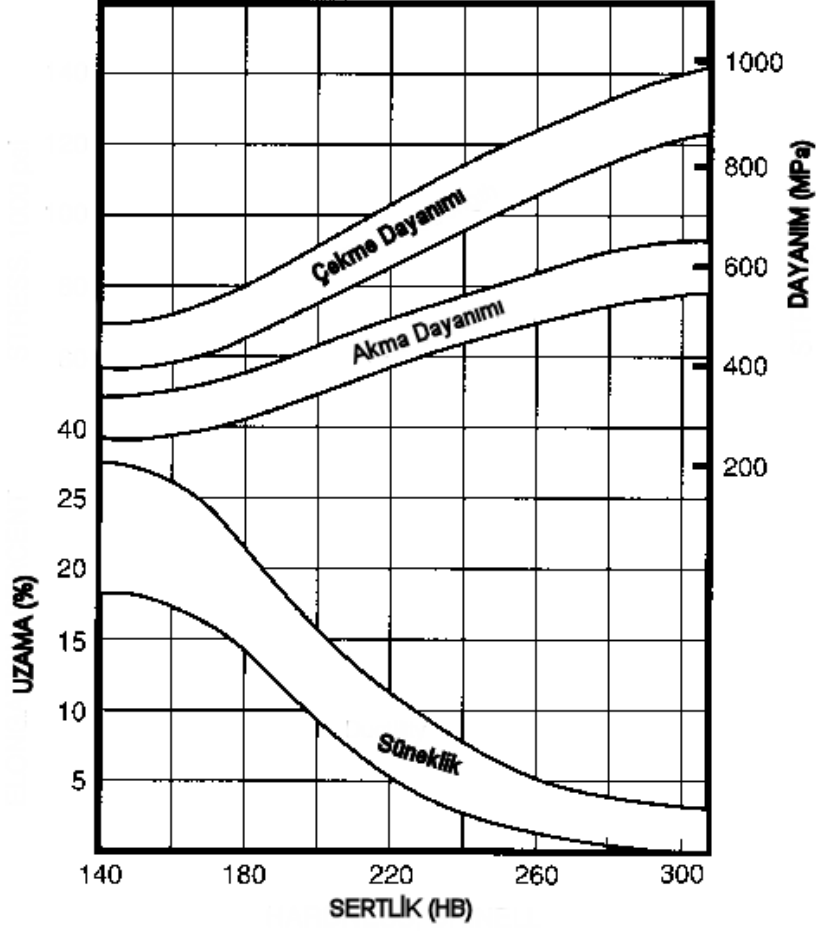
Mikroyapı	Ferritik	Perlitik
Çekme Mukavemeti (MPa)	370-550	650-750
Akma Mukavemeti (MPa)	221-350	360-410
Sertlik (BSD)	120-170	240-255
Kopma Uzaması (%)	12-30	1-8

5.4.1 Aşınma direnci

Küresel grafitli dökme demirlerde en önemli özelliklerinden biri aşınma dirençlerinin iyi olmasıdır. Birçok endüstriyel uygulamalar, bu malzemenin aşınma direncinin gri dökme demirinkine eşit olduğunu göstermiştir. Bu özelliğinden dolayı, küresel grafitli dökme demirin endüstriyel uygulamaları, krank milleri, hadde merdaneleri, delgi kalıpları, dişliler, kesici takımlar olarak sayılabilir. Çelik ile kıyaslandığında, küresel grafitli dökme demirin aşınma direnci, aynı sertlik değeri için, çeliğe göre önemli derece üstün gelmektedir. Grafitin yağlama özelliği sayesinde yetersiz yağlama şartlarında bile olumlu sonuçlar vermektedir[30].

5.4.2 Mukavemet

Küresel grafitli dökme demirin mukavemeti grafit dışındaki matris yapısına bağlıdır. Farklı cins küresel grafitli dökme demirler, normal gri dökme demirlere kıyasla 3-5 kat daha fazla dayanıma sahiptir. Bununla ilgili endüstriyel uygulama olarak kamyon kampanaları verilebilir. Ferritik küresel grafitli dökme demir, ferritik temper dökme ile kıyaslandığında(eşdeğer süneklik ve darbe dayanımı için) küresel grafitli dökme demir %50 oranında daha yüksek mukavemete sahiptir. Aynı kıyaslama perlitik temper dökme demir için de geçerlidir. Bu kıyaslama çelik için yapıldığında, aynı sertlik değeri için çeliğin maksimum çekme dayanımı %15 daha fazla bulunurken, küresel grafitli dökme demirin akma dayanımı bir miktar fazla olduğu tespit edilmiştir[30].



Şekil 5.9 KGDD'lerde sertlik ve dayanım arasındaki ilişki

5.4.3 Süneklik

Süneklik genellikle test numunelerinin gerilim altında uzatılması ve boyun oluşturacak şekilde koparılması ile yapılmaktadır. Grafitik demirler boyun oluşturarak kopmadıklarından, uzama ve kesit daralması kısmen çeliğinkinden düşük olmaktadır.

Lamel garfitli dökme demirde süneklilik yoktur. Matrisin sünekliliği bulunmasına rağmen, grafit lamelleri bu sünek matrisin devamlılığını bozmaktadır.

Temper dökme demirler yaklaşık %18'e kadar uzama gösterebilirler, perlitik temper dökme ise bu değer %6-8 arasındadır. Küresel grafitli dökme demir, temper dökme demire göre daha iyi süneklilik ve dayanım kombinasyonuna sahip olduğundan, daha tok bir malzemedir[30].

5.4.4 Dökülebilirlik

Düşük döküm sıcaklığı ve yüksek derecede akıcılığın bir arada bulunması, çok karmaşık parçaların dökülebilmesine imkan vermektedir. Küresel grafitli dökme demir, yüksek karbonlu gri dökme demire kıyasla yüksek döküm kalitesine sahiptir. Birçok döküm parça çelik döküm için dökülemeyecek kadar karmaşık ve gri dökme demirden daha üstün özelliklerin aranması durumunda, küresel grafitli dökme demirin kesit hassasiyeti kısmen düşük olup, ince ve kalın kesitler arasındaki yapısal farklılıklar aşırı derecede olmamaktadır[30].

5.4.5 Darbe direnci

Küresel grafitli dökme demirde maksimum darbe direnci, tamamen ferritik cins ile elde edilmektedir. Çentik darbe deneyinde yaklaşık 20 Joule değeri bulunabilmektedir. Bu da % 0.4 karbonlu normalleştirilmiş, temperlenmiş çeliğe ve eşdeğer dökme demire karşı mukayese edilebilir niteliktedir.

Küresel grafitli dökme demir, titreşim söndürme özelliğinin arandığı, aşırı derecede düşük sıcaklıkların önemli olduğu yerlerde birçok uygulama alanları bulmuştur[30].

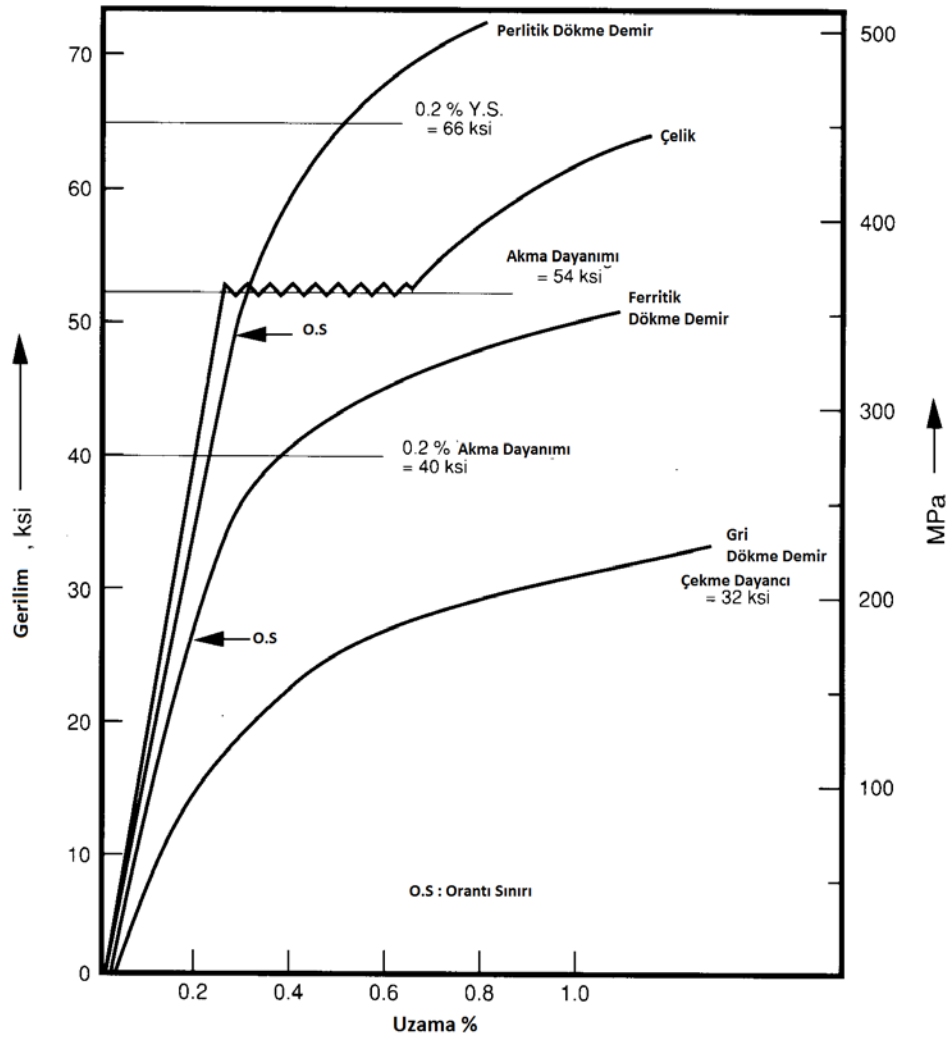
5.4.6 Basınca dayanım

Basınç dayanımının önemli olduğu yerlerde küresel grafitli dökme demirler çoğunlukla ideal bir malzeme olmaktadır. Yüksek mukavemet ve dökülebilirlik özelliği ile birlikte, basınç dayanım özelliği birçok alanda kullanımının artmasına neden olmuştur.

Bunların dışında çeliğe göre üstün özellikleri arasında kolay işlenebilirlik ve daha yüksek ısı iletkenliği de sayılabilir[30].

5.4.7 Çekme Dayanımı

KGDD'in çekme özellikleri, bilhassa süneklik, akma ve çekme dayanımları mekanik davranış üzerinde en çok etkili olan belirleyicilerdir. Sertlik değerleri genellikle ek bilgi olarak sunulmakta ve darbe özellikleri ise sadece belirli ferritik türlerde önem kazanmaktadır. Ayrıca KGDD'in elastisite modülü ve orantı sınırı da önemli tasarım kriterlerindendir. Şekil 5.9'de çelik, gri dökme demir, ferritik ve perlitik küresel grafitli dökme demirler için çekme (gerilme-uzama) diyagramı verilmiştir.[19,31]



Şekil 5.10 Ferritik ve Perlitik KGDD ile Gri DD ve çeliğin elastik ve akma davranışı

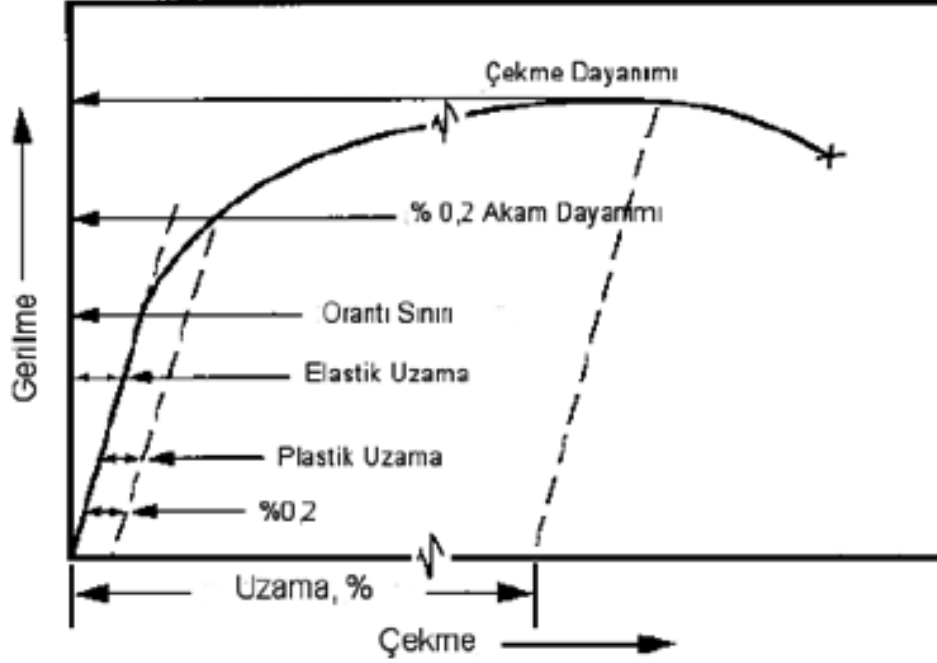
Mekanik özelliklerin belirlenmesinde çekme ve akma dayanımıyla birlikte sertlik ve uzama önemli bir rol oynar.

Çekme dayanımı malzemenin kopmadan öne dayanabileceği maksimum gerilme değerine karşılık gelmektedir. Çekme testi sırasında uygulanan maksimum kuvvetin numune kesit alanına bölümü yolu ile hesaplanır. Küresel grafitli dökme demirlerde çekme dayanımı değeri ferritik yapılar için 414 MPa, martenzitik yapılar için 1380 MPa'ın üzerindedir.

Çekme deneylerinden elde edilen enine elastik deformasyonun boyuna elastik deformasyona oranı olarak bilinen Poisson oranı KGDD'lerde küçük bir değişim gösterir. Genel olarak KGDD için kabul edilen poisson oranı 0,275'tir.[19]

5.4.8 Elastisite Modülü

Şekil 5.11’da görülebileceği gibi düşük çekme gerilmelerinde gerilme ve uzama arasında doğrusal bir ilişki vardır. Bu ilişki Hooke kanunu olarak bilinir ve bu doğrunun eğimi elastisite modülü olarak adlandırılır.



Şekil 5.11 Sünek malzemeler için tipik uzama- gerilme eğrisi

Şekil 5.11’da görüldüğü üzere küresel grafitli dökme demirin uzama – gerilme özelliği benzer çelik ve gri dökme demir arasında kalmaktadır[31]. Küresel grafitli dökme demir çeliğine benzer bir orantılılık veya elastik gerilme - uzama özelliği gösterir fakat plastik deformasyonun başlama seviyesi çeliğinkinden farklıdır. KGDD’in çekme esnasında ölçülen elastisite modülü $1,62 - 1,7 \times 10^5$ MPa arasında değişir.

Küresel grafitli dökme demirlerde çekme özellikleri üzerinde grafit morfolojisinin ve matris yapısının etkisi önemli boyutlarda olması bu özellikler arasında bir ilişki kurulmasını sağlar. Siefer ve Orth (1970) küresel grafitli dökme demirlerin mekanik özellikleri üzerine yaptığı istatistiksel çalışmada çekme dayanımı ile uzaman arasında

$$(\text{Çekme dayanımı}[\text{ksi}])^2 * \text{uzama} [\%] / 1000 = Q \quad (5.1)$$

şeklinde bir ilişki olduğunu bulmuşlardır. Burada Q bir sabit olup büyük Q değerleri yüksek dayanım ve uzamanın birleştiği daha iyi mekanik performansı göstermektedir.

Crews (1974) bu Q değerini küresel grafitli dökme demir için kalite endeksi olarak QI tanımlamıştır. Gerek QI gerekse bunun altında yatan dayanım ve uzama arasındaki ilişki farklı dökümlerin kalitesi hakkında ve çeşitli özelliklere sahip döküm elde etme konusunda önemli bilgiler sunmaktadır. Büyük QI değerleri, yüksek küresellik (fazla sayıdaki küresel ya da küresele yakın grafit sayısı), bölgeler arası grafit varlığı, yüksek kürecik sayısı, düşük karbür hacimsel kesri, düşük fosfor miktarı(< %0,03) ve iç gözeneklerin oluşmaması ile sağlanabilmektedir.[19]

RÜZGAR TÜRBİNİ DÖKÜMLERİNDE HASSAS METALÜRJİK DEĞİŞKENLER

Rüzgar türbininde en hayati parça hiç şüphesiz ki rüzgar türbini pervane göbeğidir. Bu hayati parçanın üretimi hem boyutları sebebiyle zor, hem de maliyeti yüksektir. Bu nedenle günümüzde rüzgar türbini pervane göbeği üretimi alanında bir çok çalışma yapılmıştır. Yapılan çalışmaların büyük bir kısmı matematiksel statik hesapları ile ilgilidir. Özellikle son 5 yıl içerisinde ki çalışmalar incelendiğinde geometrik olarak dökümün yapılabilişliği üzerinde durulmuş ve bu hipotezler savunulmuştur. Bu çalışmanın özgünlüğü 2 MW'lık bir rüzgar türbini pervane göbeğinin dökümünün gerçekleştirilmesi adına metalürjik bir inceleme sayısının yok denecek kadar az olmasından kaynaklanmaktadır.

2 MW'lık rüzgar türbini pervane göbeği en ekonomik ve en yüksek malzeme ömrünü sağlayabilecek şekilde üretilmelidir. Bunun için öncelikle bu büyüklükteki bir parçanın homojen özellik göstermesi gerekmektedir. Bu da bizi kum kalıba ve tek parça şeklinde döküme yönlendirmektedir. Bu büyüklükteki bir parça üretimi yapılsa da daha sonrasında homojen hale getirmek için ekstra bir ısıtma işlemi bizi sevk edebilir. Bu da ekstra maliyet demektir. Rüzgar türbininin ilk yatırım maliyetinin yüksek olması zaten en büyük problemdir. Bu nedenle biz bu parçayı tek bir parça halinde üretilip, işlenilmesinin ardından kullanıma hazır hale gelmesini sağlamalıyız.

Üretim için öncelikli olarak seçilen malzememiz daha önceki bölümde bahsedilen küresel grafitli dökme demirdir. Diğer malzemelere üstünlüklerinden önceki bölümlerde bahsedilmiştir. Bilindiği gibi KGDD'ler tek çeşit değildir. Burada dökümü yapılacak olan rüzgar türbini pervane göbeğinden beklenen en önemli özellik yüksek yorulma dayanımıdır. Bu özellik burada ancak yüksek süneklik özelliği ile sağlanabilir. KGDD çeşitleri içerisinde en sünek olanı ise ferritik küresel grafitli dökme demirdir. Malzemeden beklenen özellikler incelendiğinde rüzgar türbini dökümlerinde kullanılan malzemenin standardı EN-GJS-400-18LT'dir. Bu malzemeyi tek başına seçmek yeterli

değildir, Çizelge 6’da görüldüğü gibi malzemenin kesit kalınlığı değiştikçe mekanik özelliklerde değişmektedir.

Çizelge 6 Rüzgar Türbinlerinde uygulamalarında kullanılan ferritik dökme demirin mekanik özellikleri

Tanım	Numara	Kesit Kalınlığı mm(inc)	Min. Çekme Dayanımı N/mm(ksi)	Min. Uzama %	Min. Çentik Dayanımı (-20°C) J(ft-lb)
EN-GJS-400-18LT	EN-JS1049	t < 30 (0.49)	t < 30 (0.49)	18	12 (16.2)
		30 < t < 60 (1.2 < t < 2.4)	390 (57)	15	12 (16.2)
		60 < t < 200 (2.4 < t < 7.9)	370 (54)	12	10 (13.5)

6.1 Ferritik Küresel Grafitli Dökme Demir Standartları

Ferritik dokuya sahip dökme demir tercih edilmesinin en önemli nedenlerinden birisi, düşük sıcaklıkta yüksek tokluk ve dayanç beklentisinin karşılanmasıdır. Bu nedenle buradaki özellikleri karşılayabilecek standartlarda malzeme olarak EN-GJS-400-18U-LT ve EN-GJS-350-22-LT en çok tercih edilen ferritik dokuya sahip döküm malzemeleridir. Bu nedenle üretimi gerçekleştirilecek olan 2 MW’lık rüzgar türbini pervane göbeğinin boyutsal olarak incelendiğinde, döküm parçasının 10 tonun üzerinde bir ağırlığa sahip olması sebebiyle kontrol edilecek parametreler oldukça fazladır. Bu nedenle standartlara uygun malzeme üretimi oldukça zodur. Kesit büyüklüğünün yanında parametrelerin oldukça fazla olması üretimi zorlaştırmaktadır.

Bu nedenle, önemli olan standartlara uygun üretim yapabilmektir. Tezimizin amacı; bu standartları bu gibi yüksek boyutlarda bile yakalayabilmektir. Referans standardımız TS-526 ‘dır. Çizelge 7’de TS-526 standardına göre dökme demirlerin dokusal ve mekanik özellikleri verilmektedir.

Çizelge 7 Çeşitli Küresel Grafitli Dökme Demirlerin dokusal ve mekanik özellikleri

TS-526	Çekme Dayanımı Kgf/mm ² min.	Akma Sınırı Kgf/mm ² min.	Kopma Uzama % min.	Sertlik HB	Çentik Dayanımı min. kgf/cm ² (20 C)		Doku
					3.deney ortalaması	Bir deney	
DDK-40	42	28	12	140-201	-	-	Daha çok ferritik
DDK-50	50	35	7	170-241	-	-	Ferritik / Perlitik
DDK-60	60	40	3	192-269	-	-	Perlitik / Ferritik
DDK-70	70	45	2	229-302	-	-	Daha çok Perlitik
DDK-80	80	50	2	248-352	-	-	Perlitik
DDK-35.3	35	22	22	-	1.9	1.7	Ferritik
DDK-40.3	40	25	18	-	1.6	1.4	

Çizelge 8 Çeşitli Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Uluslararası eşdeğer standartları

EŞDEĞER STANDARTLAR						
EN 1563	Almanya DIN 1693	Fransa NF	İngiltere BS	Hollanda NEN	İsveç MNC	ABD ASTM A536
EN-GJS-400-18-LT	GGG-40.3	-	-	-	-	60-40-18
EN-GJS-400-15	GGG-40	FGS 400-12	420/12	GN 42	0717-02	60-40-18
EN-GJS-450-10	-	-	420/12	-	-	65-45-12
EN-GJS-500-7	GGG-50	FGS 500-7	500/7	GN 50	0727-02	65-45-12/80-55-06
EN-GJS-600-3	GGG-60	FGS 600-3	600/3	GN 60	0732-03	80-55-06
EN-GJS-700-2	GGG-70	FGS 700-2	700/2	GN 70	0737-01	100-70-03
EN-GJS-800-2	GGG-80	FGS 800-2	800/2	-	-	120-90-02

Çizelge 8'de ise TSE-526'ya göre uluslararası standartların karşı değeri verilmektedir[32].

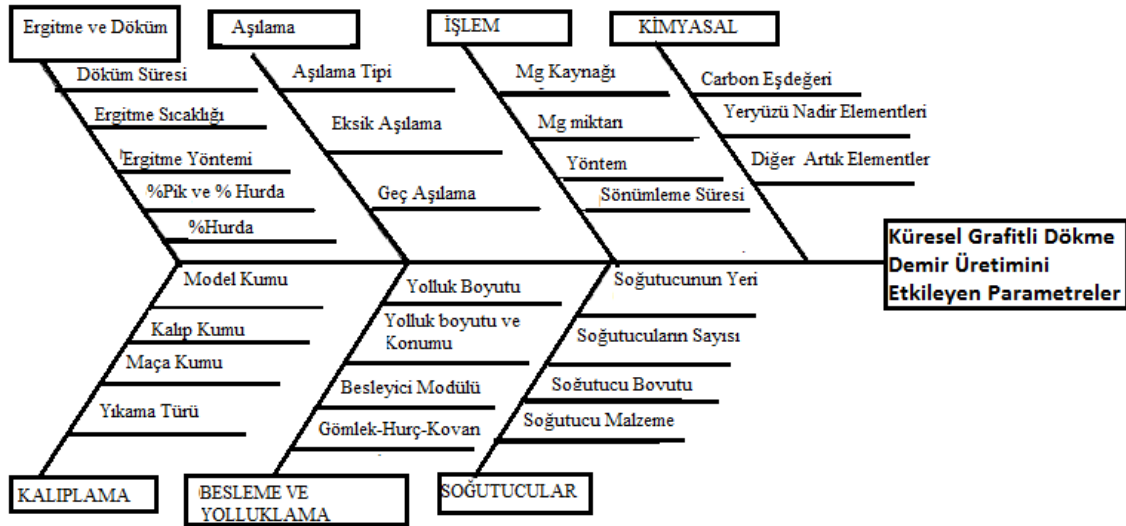
Rüzgar türbini dökümü için gerekli olan malzeme ferritik bir dokuya sahip olmalıdır. Türk standartlar ve diğer uluslararası kaynaklar incelendiğinde kimyasal bileşimin dokuyu belirlemede en etkin faktör olduğu belirlenmiştir. Ferritik dokulu küresel grafitli dökme demir malzemelere ait tipik bir kimyasal analizi Çizelge 9'da verilmiştir.[33]

Çizelge 9 Ferritik dokuya sahip dökme demirin kimyasal bileşimi.

Element	Min %	Max %
Toplam Karbon	3.0	3.7
Karbon Eşleniği	-	4.5
Si	1.2	2.3
P		
Mg	-	0.03
Mn	-	0.07
Cu	-	0.25
Ni	-	0.1
Cr	-	0.07

Rüzgar türbini pervane göbeği olarak dökümü yapılacak olan dökme demir çeşidini belirlemek için öncelikle beklenen standartlara uygun malzeme seçilmelidir. Rüzgar türbini için üretilecek malzemelerden beklenen en önemli özellikler uzun ömürlü olması ve ilk yatırım maliyetinin yüksek olması sebebi ile bakıma sıklıkla ihtiyaç duyulmamasıdır. Bu nedenle yorulma dayanımı yüksek olmalı, sünek fakat sertliği standartlara uygun olmalı ve beklenen mekanik özellikleri karşılayabilecek standartlarda olmalı. Yüksek süneklik beklendiği için yapı ferritik olmalıdır. Türk standartları TS-526 numaralı standart baz alındığında yada ASTM A 874/A 874M – 98 standartları incelendiğinde bunu sağlayacak malzemenin ferritik küresel grafitli dökme demir olması gerektiğine karar verilmiştir. Bu malzemenin üretimi ısıtma işlemi gerektirmeden yapmak ise oldukça zordur. Çünkü her ısıtma işlemi ekstra maliyet getirir. Aynı zamanda bu büyüklükteki bir malzemeyi ısıtma işlemine tabii tutmak oldukça zordur. Ferritik küresel grafitli dökme demiri ısıtma işlemine gerek duymadan dökümünü gerçekleştirmek ise bizim ana hedefimizdir.

Fakat dökme demir üretimi için çok fazla değişken bulunmaktadır. Bu değişkenlerin tamamını kontrol etmek imkansızdır. Bu sebeple üretimi etkileyen temel parametreler genel olarak şekil 6.1’de görülmektedir.



Şekil 6.1 Küresel grafitli dökme demir üretimine etki eden parametreler.

Şekil 6.1'deki parametrelerin sayısını arttırmak mümkündür. Fakat bu proseste, en belirleyici ve kontrol edilebilirliği mümkün olan parametreler tercih edilmiştir. Bu parametrelerin tercih edilmesinde belirgin rol oynayan özellikler; kontrol edilebilir olması, nihai ürüne etkisinin yüksek olması ve etki faktörünün kolaylıkla belirlenebilmesidir. Bu şekilde belirlenen parametreler şunlardır;

- Kimyasal bileşim
- Aşılama
- Uygulanan treatment
- Küreselleştirme
- Ergitme ve döküm
- Kesit kalınlığı(Soğuma hızı)

gibi ana başlıklar altında parametreler irdelenecektir.

6.2 Kimyasal Bileşim

Bileşiminde %3.2-3.8 C, %2.4-2.8 Si, %0.5'den az Mn bulunur. Hammaddeden gelen katışıklar belirli sınırları kesinlikle aşmamalıdır. Grafitin küreselleşmesi için eriyiğe yaklaşık %0.5 Ce veya Mg ile çekirdeklenmesini kolaylaştırmak üzere ferrosilisyum katılır. Mg yöntemi daha ucuz fakat Pb, Bi, Sb, Sn, Ti gibi küreselleşmeyi önleyici

elementlere daha duyarlıdır; ayrıca işlemin verimliliği kükürdün azlığına (<0.02) bağlıdır. Magnezyum, grafitin perlitik bir ana kütle içerisinde küresel olarak katılaşmasını sağlar.

KGDD'ler, kimyasal bileşim itibarıyla karbon, silisyum, mangan, fosfor, kükürt, nikel, bakır, molibden yüzdeleri içerir. Bunlardan en önemlileri karbon eşdeğeri ve kükürttür. Alaşım elementlerinin KGDD'lerin üzerine birçok etkileri vardır. Bu etkiler sonucunda, KGDD yapısında önemli değişiklikler meydana gelir. Bu elementlerin mikro yapı ve mekanik özelliklere etkileri aşağıda belirtilmiştir[26].

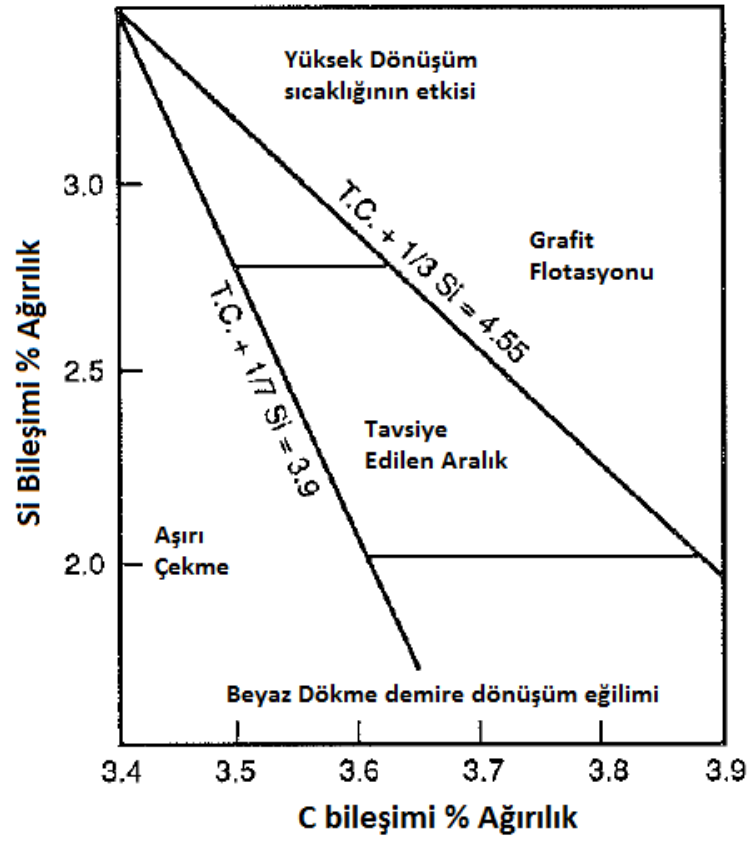
6.2.1.1 Karbon

Ticari KGDD'lerde karbon oranı %3-4 arasında değişir. Ancak arzu edilen karbon genellikle daha dar limitler içindedir. Grafit kürelerinin sayısı doğrudan karbon yüzdesine bağlıdır. Bir başka deyişle, karbon yüzdesi arttıkça grafit küre sayısı da artar. Karbon oranındaki artış ayrıca akışkanlık ve besleme özelliklerini de iyileştirerek dökülebilirlik kabiliyetini de artırır. Karbon eşdeğeri,

$CE = \%C - \%1/3Si = 4.3$ 'den büyük değerlerde grafit kürelerinin oluşumunu ve büyümesini teşvik eder. $CE = 4.6$ 'dan daha büyük olan bileşimlerde ve kalın kesitlerde grafit yüzmesine ve karbon segregasyonuna neden olur [26].

6.2.1.2 Silisyum

KGDD'lerde, silisyum miktarı normal olarak %1.80-2.80 arasındadır. Silisyum miktarı CE'yi etkilediği için grafitleşme ve karbon segregasyonu üzerinde de önemli rol oynar. Ayrıca mukavemet değerine ve süneklik özelliklerine önemli etkisi vardır. Silisyumun, perlit yerine ferrit oluşumunu hızlandırması yanında ferrit yapısını sertleştirme ve kırılma dayanıklılığı etkisi vardır. Silisyum, daha çok ferrosilisyum olarak, işlem sonunda sıvı metale ilave edildiğinde (aşılama) grafit küre sayısının kontrolü açısından daha etkin olur[26,34].



Şekil 6.2 Dökme demir üretimi için yaygın olarak kullanılan C-Si oranları.

6.2.1.3 Manganez

Önem sırasında karbon ve silisyumdan sonra yer alan elementtir. Döküm esnasında karbürlerin oluşmasını önlemek için mangan oranını kontrol altında tutmak gerekir. Mangan orta dereceli bir karbür oluşturmaya etkisi olduğundan, silisyum % Si ve kesit aralığına bağlı olan bir maksimum değerde sınırlanır. Kesit kalınlığı 25 mm veya biraz fazla olan ince dökümlerde, mangan karbür oluşumunu teşvik edici etkisi, artan silisyum miktarı ile karşılanmakta ve bu durum döküm inceldikçe devam etmektedir; 12 mm kesit kalınlığındaki bir döküm parçası için silisyum oranının %2,5 dan %3,0 'e artışı, mangan oranının %0,25 den %~0,35'e artmasına imkan verir. Kalın kesitli döküm parçalarında segregasyon nedeniyle bu tür mangan artışı söz konusu olmaktadır.

Mangan tercihli olarak sıvıölçerinde segrege olur. Soğutma ne kadar yavaş olursa bu segregasyon daha çok olacaktır. Ortalama %0,4 Mn içeren alaşımda son katılacak sıvıdaki Mg oranının %2,5 veya daha fazla olabileceği kanıtlanmıştır. Özellikle, nispeten

kalın kesitlerde bu segregasyon silisyum tarafından engellenemez, zira silisyum segregasyonu tam tersinedir. Yani ilk katılaşmada zenginleşir. (41,42)

6.2.1.4 Kükürt

KGDD'deki grafitleri küreselleştirme amacı için, ilave edilmesi gereken Mg miktarını arttırmak gerekmektedir. Magnezyum ilavesinden sonra kalıntı kükürt miktarı yaklaşık %0.015 civarında olmalıdır. Magnezyum katılaşmasının esas amacı kükürdün giderilmesidir.

6.2.1.5 Fosfor

KGDD'de steadit olarak bilinen çok kırılgan bir bileşiğin oluşmasına yol açar, malzemenin tokluk ve sünekliğini olumsuz yönde etkiler. Bunun için malzemede mümkün olduğu kadar az bulunmalıdır. Genellikle içerisinde maksimum mekanizma ile lamel grafit oluşumunu engelleyerek, grafit seklinin küre olmasını sağlamaktadır.

6.2.1.6 Bakır

Perlit oluşumunu hızlandıran en önemli elementlerden biridir, fakat sementit oluşumuna etki etmez. Yüksek oranlarda ilave edildiğinde çözünmemiş küçük bakır inklüzyonlar oluşturur. Çoğu dökümhanelerde KGDD üretimi için bakır magnezyum alaşımı kullanılmaktadır. Bu durum magnezyum verimini arttırdığı için, grafitin küre sekline dönüşmesine etki etmektedir. Perlit miktarı, %(0.1-1) arasında değişen bakır oranına bağlı olarak artış göstermektedir.[16,17]

6.2.1.7 Magnezyum

Hipo ve hiper ötektik bileşimleri için küresel grafitler elde edilmesinde en çok kullanılan yöntem Magnezyum ilavesidir. Mg 'dan başka elementler aynı amaçla denenmişse de bunlardan hiç biri yeter derecede uygun olmamıştır. Bu elementler arasında seryum, kalsiyum ve yitriyum sayılabilir.

Magnezyum ayrıca ergimiş metal için bir oksijen ve kükürt muhtevası çok yüksek ise önemli miktarda Magnezyum, magnezyum oksit ve sülfürlerin oluşumunda harcanmaktadır. Henüz kesin açıklanamayan bir mekanizma ile magnezyum lamel grafit oluşumunu önleyip, grafit şeklinin küre olmasını sağlamaktadır.

Genel olarak küreleşmenin sağlanması için bileşiminde %0.05 oranında artık magnezyum gerekir. Magnezyum ile muamele esnasında hem asit hem bazik usulle ergitme için, dökme demir sıcaklığı(1538-1566°C) civarında olup, magnezyumun buharlaşma sıcaklığının oldukça üzerindedir. Dolayısıyla sıvı metal ile temas eden magnezyum aniden buharlaşır. Ve uygun şekilde yapılmadığı takdirde reaksiyon çok şiddetli olabilir.

Magnezyumun verimi hava ile temas etmeden önce magnezyum buharın içinden geçerek yükseldiği sıvı demir derinliğine bağlıdır. Dolayısıyla sıvı metalin magnezyum buharı ile yıkandığı süre ve yıkanan derinlik magnezyum verimi açısından önemli olmaktadır.

Gerek reaksiyon şiddetini azaltmak gerekse optimum metalürjik şartları (örneğin döküm halinde karbürsüz yapı) sağlamak için, genellikle magnezyum başka elementlerle alaşımlandırılır.

Küreselleştirme işlemi ergitmeyi, yapılıyorsa kükürt gidermeyi, takip eder. Bazı uygulamalarda sıvı metal bir “ön hazırlama” işlemine tabi tutulur. Bu işlemde çeşitli ilaveler kullanılırsa da SiC (silisyum karbür) ilavesi ile ön hazırlama, küreselleştirme işleminin başarısını arttırmakla, ayrıca döküm yapısında karbür oluşumu meylini de azaltmaktadır. Sıvı metale ilave edilecek magnezyum miktarı ile ilgili birçok formül geliştirilmiştir. Bunlar arsında en basit ve kullanımı en kolay olanı aşağıda verilmiştir.

$$\%Mg \text{ (ilave edilen)} = \frac{\text{İstenen Mg \% si}}{\text{Mg verimi (\%) *0.01}} + \text{Bileşimdeki S(\%)}$$

Bu bağlantıda seçilmesi en zor olan şartlara bağlı oran, magnezyum verimine ait olandır. Bu oran %10-%90 arasında değiştirebileceğinden her uygulayıcı kendi şartlarına ve önceki tecrübelerinin sonuçlarına göre bu oranı saptamak durumundadır.

Aşırı magnezyum kullanmanın ekonomik sakıncası yanında, çekilme boşluğunun oluşumuna meyli arttırmak için ve döküm yapısında karbürleri meydana getirmek gibi önemli sakıncaları vardır. Dolayısıyla bileşimde kalması istenen magnezyum oranı ± 0.015 mertebesinde kontrol edilmelidir ki buda bilinen küreselleştirme yöntemleri ile mümkündür (Çavuşoğlu 1991).

6.2.1.8 Eser Elementlerin Dökme Demire Etkisi

Dökme demirde birçok element küçük miktarlarda bulunabilir ve bu elementler dökümün yapı ve özelliklerine önemli derecede etki ederler. Bazıları bilinçli yapılan ilavelerden gelirken bazılarının kaynağı eser empüriteler içeren şarj hammaddeleridir. Bu elementlerden birkaçının özellikle pik dökümde yararlı etkileri görülürken, diğerlerinin zararlı etkileri vardır ve mümkün olduğunca uzaklaştırılmaları gerekir. Çizelge 10'da bu elementlerin yaygın kaynakları, ne oranda bulundukları ve önemli etkileri gösterilmektedir. Ana alaşım elementi olan (krom gibi) elementler Çizelge 10'da yer almamaktadır[35].

Çizelge 10 Eser elementlerinin (RE) dökme demire olan etkileri

Element	Temel Kaynağı	Normal Oranı (%)	Dökme Demirde Etkisi
Alüminyum Al	Al içeren çelik hurda, aşılایıcılar, ferro alaşımlar, hafif alaşım elementleri, alüminyum ilavesi	0.03 'e kadar	İnce kesitlerde %0.005 Al üzeri hidrojen bazlı karınca boşluklarına neden olur. Azotu bağlar. Yaklaşık %0.08 üzeri Al küresel grafitte zararlıdır. Seryum ile nötralize edilebilir. Güçlü grafit sabitleştirici etkisi vardır.
Antimuan Sb	Çelik hurda, camsı emayeli hurda, belirlenen ilaveler	0.02 'ye kadar	Güçlü perlit ve karbür oluşturur. Nadir toprak metallerinin yokluğunda küreselleşmeyi engeller.
Arsenik As	Pik demir, çelik hurda	0.05 'e kadar	Güçlü perlit ve karbür oluşturur. Küresel grafit oluşumunu iyileştirir.
Baryum Ba	Baryum içeren aşılایıcılar	0.003 'e kadar	Grafit çekirdeklenmesini iyileştirir ve aşılama ve tretman etkisinin azalmasını önler. Çilleşme eğilimini düşürürken lamel grafit oluşturur.
Bizmut Bi	Belirlenen ilaveler, Bi içeren kalıp kaplamaları	Nadiren 0.01 üstü	İstenilmeyen grafit şekilleri ve çil oluşturur. Sfero dökümde nadir toprak metalleri (seryum) bulunması halinde küresel nodül sayısını artırır. Temper dökümde melez yapı önlenebilir.
Boron B	Camsı emaye hurda, FeB şeklinde yapılan ilavelerle	0.01 'e kadar	Özellikle sfero dökümde %0.001'in üzerinde karbür oluşturur. Temper dökümde %0.002 B tavlanma kabiliyetini artırır.
Kalsiyum Ca	Ferroalaşımlar, küreselleştiriciler, aşılایıcılar	0.01 'e kadar	Grafit taneciklerinin küreselleşmesini artırır. Grafit çekirdeklenmesini artırır. Çil eğilimini azaltır ve lamel grafit oluşumunu destekler.
Seryum Ce	Birçok magnezyum alaşımı, mish metal olarak sıvı metale ilave ile, diğer nadir toprak metali kaynaklarından	0.02 'ye kadar	Pik dökümde kullanılmaz. Sfero dökümde zararlı elementleri yok eder. Grafitin küreselleşmesini artırır. Segregasyona bağlı olarak karbürleri stabil hale getirir.
Krom Cr	Alaşımlı çelik, krom levha, bazı pik demirler, ferrokrom	0.3 'e kadar	Çil ve perlit oluşturur. Mukavemeti artırır. Sfero dökümde % 0.05'in üzerinde karbür oluşturur.
Kobalt Co	Takım çelikleri	0.02 'ye kadar	Dökme demirlerde kayda değer etkisi yoktur.
Bakır Cu	Bakır tel, bakır bazlı alaşımlar, çelik hurda, belirli ilaveler	0.5 'e kadar	Perlit oluşumunu destekler. Mukavemeti artırır. Sfero dökümde ferritik yapıyı bozar. Zararlı etkisi yoktur.
Hidrojen H	Islak refrakterler, kalıp malzemeleri, ıslak katkı maddeleri.		Yüzey altında karınca boşluklarına (pinhole) neden olur. Zayıf bir çil etkisi vardır. Kükürdü bağlayacak yeterli mangan bulunmadığı zaman içsementit oluşturur.

Element	Temel Kaynağı	Normal Oranı (%)	Dökme Demirde Etkisi
Kurşun Pb	Boyali hurda, bazı camısı emayeler, çelik levha, lehim, motor, petrol tortuları	0.005 'e kadar	Pik dökümde keskin ve istenmeyen grafit yapıları oluşturur ve % 0.004'ün üzerinde mukavemeti ciddi şekilde azaltır. Perlit ve karbür oluşturur. Grafitlerin küreselleşmesini engeller. Sfero dökümde nadir toprak metalleri (seryum) tarafından bağlanarak grafit üzerindeki etkileri azaltır.
Magnezyum Mg	Magnezyum alaşımlarının (küreselleştiricilerin) ilavesi	0.03 - 0.08	Sfero dökümde küresel grafit oluşumunu sağlar. Karbür sabitleyici etkisi vardır. Pik dökümde kullanılmaz.
Mangan Mn	Birçok pik demir, çelik hurda, ferromangan parça ya da briketlerin ilavesi	0.2 - 1.0	MnS oluşturarak kükürdü bağlar. Perlit oluşumunu destekler. Sfero dökümde karbür oluşturur. Bileşimde yüksek nikel ve kükürdün bulunması durumunda gaz boşluklarının oluşmasına sebebiyet verir.
Molibden Mo	Rafine pik demirler, alaşım çelikleri, ferromolibden ilavesi	0.1 'e kadar	Perlit oluşumuna zayıf bir etkisi vardır. Mukavemeti artırır. Gaz boşlukları ve karbür oluşumuna sebebiyet verir.
Nikel Ni	Nikel teneke, çelik hurda, rafine demir, NiMg alaşımı	0.5 'e kadar	Düşük seviyelerde önemli etkisi yoktur. Daha yüksek seviyelerde ise grafitleştirici etkisi görülür.
Azot N	Kok, karbon vericiler, maça bağlayıcılar, çelik hurda, azotlu ferromangan ilavesi	0.015 'e kadar	Grafit taneciklerini bir araya getirir. Perlit oluşturur. Mukavemeti artırır. Eğer yüksek miktarda bulunursa kalın kesitlerde çatlak meydana getirir. Al, Ti ve Zr ile bağlanabilir. Sfero dökümde çok etkisi yoktur.
Fosfor P	Fosforik pik demir ve hurda, FeP ilavesi	0.1 'e kadar	CE'nini artırır. Akışkanlığı yükseltir. Sfero dökümde %0.05'den fazlası zararlıdır. %0.04'ün altındaki seviyelerde metal penetrasyonuna sebep olabilir.
Silisyum Si	Ferrosilis alaşımları, çelik hurda, pik demir	0.8 - 4.0	Grafitleşmeyi destekler, çil oluşumunu azaltır, ferriti stabilize eder ve sıvı demirin akışkanlık kabiliyetini artırır.
Kükürt S	Kok, karbon vericiler, pik demir, demir hurda, demirsülfür ilavesi	0.15 'e kadar (pik dökümde)	Mangan ile dengelenmediği sürece yapı ve özelliklere çok zararlı etkileri vardır. Pik dökümde birçok aşıl原因ının etkisini artırır. Sfero dökümde Mg ihtiyacını artırır. Sfero dökümde %0.03'ün altında olmalıdır.
Stronsiyum Sr	Stronsiyum içeren aşıl原因ıcılar	0.003 'e kadar	Pik ve sfero dökümde grafit çekirdeklenmesini artırır. Pik dökümde çil oluşturma eğilimini önemli miktarda azaltır.
Tellür Te	Bakır hurda, kalıp kaplamaları, termik analiz propları	0.003 'e kadar	Karbür oluşumunu önemli derecede destekler. İstenmeyen birçok grafit şekli oluşmasına neden olur. %0.0003'ün altında bile etkileri görülür. Sfero dökümde etkileri Mg ve Ce ile birleştirilerek azaltılır.
Kalay Sn	Lehimli hurda, kalay kaplı çelik hurda, bronz bileşenleri, kalay ilaveleri	0.15 'e kadar	Güçlü bir şekilde perlit oluşumunu destekler. Mukavemeti artırır. %0.08'den fazla olursa sfero dökümde kırılabilirliğe neden olur. Başka zararlı etkisi yoktur.
Titanyum Ti	Bazı pik demirler, bazı boyalı hurdalar ve camısı emayeler, CG- döndü malzemesi, titanyum ya da ferrotitanyum ilavesi	0.10 'a kadar	Pik dökümde azotu bağlar. Alüminyum bağlı oluşan hidrojen karınca boşluklarını (pinhole) artırır. Pik dökümde aşırı soğumuş grafit oluşturur. Sfero dökümde küreselleşmeyi bozar.
Tungsten T	Takım çelikleri	0.05 'e kadar	Nadiren önemli miktarlarda bulunur. Zayıf perlit oluşturuucu etkisi vardır.
Vanadyum V	Çelik hurda, takım çelikleri, bazı pik demirler,	0.10 'a kadar	Çil oluşumunu destekler. Lamel grafiti rafine eder. Mukavemeti önemli derecede artırır.

Çizelge 11’de ise ISO standardında dökme demir dökümü için tavsiye edilen analiz değerleri gösterilmektedir. Karbon, silis ve mangan için tavsiye edilen analiz sınır değerleri Çizelge 11’de verilmektedir. Ayrıca, katkı elementlerine ait maksimum üst sınırlar da dip not olarak belirtilmiştir[36].

Çizelge 11 Dökme demir dökümleri için ISO standart sınıflarına göre tavsiye edilen hedef analizi

Ortalama Döküm Kesiti [mm]	ISO sınıfları											
	800/2, 700/2, 600/3			500/7			450/10, 400/15, 400/18			350/22		
	%C	%Si	%Mn	%C	%Si	%Mn	%C	%Si	%Mn	%C	%Si ¹⁾	%Mn
13	3.6-3.8	2.6-2.8	<0.5	3.6-3.8	2.6-2.8	<0.3	3.6-3.8	2.6-2.8	<0.2	3.6-3.8	2.0-2.5	<0.1
13-25	3.5-3.6	2.2-2.5	<0.6	3.5-3.6	2.2-2.5	<0.35	3.5-3.6	2.2-2.5	<0.25	3.5-3.6	2.0-2.5	<0.15
25-50	3.5-3.6	2.1-2.3	<0.7	3.5-3.6	2.2-2.4	<0.4	3.5-3.6	2.2-2.4	<0.3	3.5-3.6	2.0-2.4	<0.15
50-100	3.4-3.5	1.9-2.1	<0.8	3.4-3.5	2.0-2.2	<0.5	3.4-3.5	2.0-2.2	<0.35	3.4-3.5	1.8-2.0	<0.2
100	3.4-3.5	1.8-2.0	<0.8	3.4-3.5	1.8-2.0	<0.6	3.4-3.5	1.8-2.0	<0.4	3.4-3.5	1.8-2.0	<0.25

1) Çarpma özelliklerinin istendiği durumlarda maksimum Si değeri % 2.5’dir.

Önemli Bazı Noktalar;

- ✓ 800/2, 700/2 ve 600/3 sınıfları için %0.5 Cu ya da %0.1 Sn ilavesi yapılabilir.
- ✓ Sıvı metaldeki kükürt oranı %0.020’yi aşmamalıdır.
- ✓ Nihai üründeki kükürt oranı %0.015’i aşmamalıdır
- ✓ Fosfor, tüm küresel grafitli dökme demir dökümlerde %0.03’ün altında olmalıdır.
- ✓ Krom oranı %0.05’in altında olmalıdır.
- ✓ Kalıcı magnezyum seviyesi %0.03 ile %0.06 arasında olmalıdır

Yukarıda verilen tavsiye edilen analiz değerleri ISO sınıfı özellikler elde etmek için iyi bir temel oluşturur. Ancak, istenen özellikler diğer önemli parametreler doğru seçilmediği sürece garanti edilemez. Bu parametreler;

- ✓ Aşılmalı malzemenin doğru seçilmesi ve ilave prosesi
- ✓ Aşırı ısınma ve uzun bekleme sürelerinden kaçınılması
- ✓ Mekanik özellikleri olumsuz etkileyecek, şarj ve aşılama malzemelerinden gelen zararlı elementlerden korunmak amacıyla dikkatli hammadde ve aşı seçimi
- ✓ Belirlenen amaç ve şartlara ulaşılabilmesi için magnezyum tretman metodu ve küreselleştirici maddenin doğru seçimi

✓İnklüzyon kusurlarından etkilenmemek için hassas cüruf alma

✓Kalıp kumunun soğuma hızına ve dolayısıyla katılaşma yapısına etkisinin göz önünde bulundurulması.

Özel amaçlı küresel grafitli dökme demir döküm için ise bazı durumlarda spesifik özellikleri geliştirebilmek açısından verilen analiz değerlerinden sapmak gerekli olabilir (örneğin daha iyi mukavemet ya da genleşme, daha düşük grafit yüzmesi, özel alaşım sınıfları..gibi)[36].

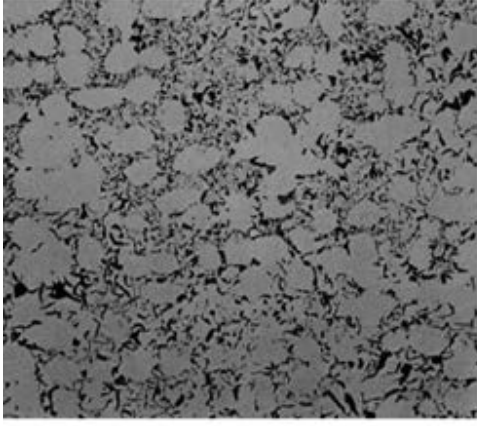
6.3 Aşılama

Aşılama kelime anlamıyla, küresel grafitli dökme demirde, dökümde grafit nodüllerin pik dökümde ise grafit parçacıklarının çekirdeklenen kısımlarının sayısının artırılması yoluyla dökme demirin yapı ve özelliklerini kontrol edebilmektir. Bu durum ötektik katılaşma esnasında aşırı soğumayı düşürür ki böylece özellikle ince kesitlerde sert demir karbürler ya da çil oluşma riski azalır.

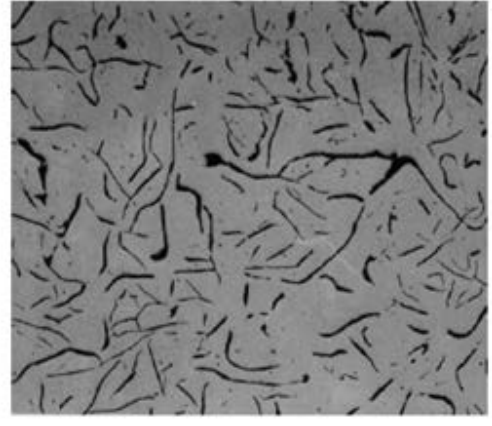
Aşılama, sıvı demire dökümden hemen önce eklenen, grafit çekirdeklenmesi için uygun bölgeler sağlayan bir malzemedir. En etkili aşılama elementleri düşük miktarlarda Ca, Ba, Sr, Zr ve/veya Ce elementlerinden bir ya da daha fazlasını içeren ferrosilis alaşımlarıdır.

Aşağıdaki mikroyapı görüntüleri ve Çizelge, küresel grafitli dökme demir ve pik dökümde aşılama kullanılarak veya kullanılmayan durumlarda yapı ve özelliklerin nasıl değişebileceğini göstermektedir. Şekil 6.3’de görüleceği gibi aşılama yapılmayan dökümler çok miktarda sert, kırılma demir karbürler (sementit, Fe_3C) ve çok kötü grafit yapısı içerir.

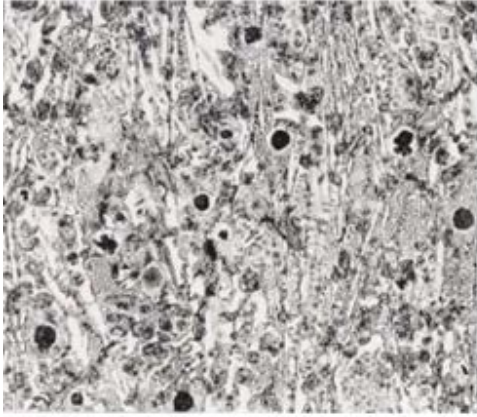
Aşılama yapılan durumlarda ise gri döküm küçük ve rastgele yönelmiş lamellerden oluşan üniform bir yapıya sahipken küresel grafitli dökme demir döküm ferrit/perlit matrisinde yüksek miktarda küçük grafit küreler içerir[37].



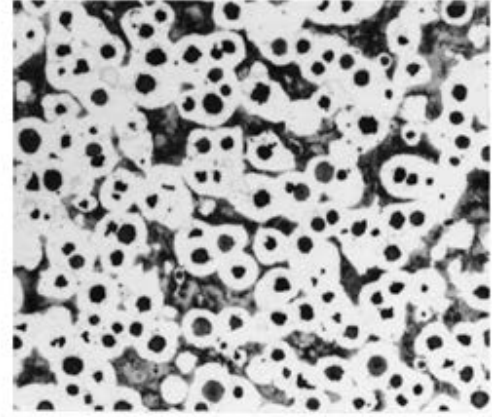
a



b



c



d

Şekil 6.3 Mikro yapı görüntüleri (100X) (a) Aşılanmamış gri dökme demirin grafit yapısı (b) Aşılanmamış gri dökme demirin grafit katılaşması (c) Aşılanmamış dökme demir dökümünün mikroyapısı (d) Aşılanmış dökme demir dökümünün mikroyapısı

Çizelge 12 Aşılama ilavesi yapılmış ve yapılmamış dökme demir dökümlerinde tipik özelliklerin karşılaştırılması

Özellik		Aşılama ilavesi Yapılmadan	Aşılama ilavesi Yapılarak
Uzama Dayanımı	$R_{p0.2}$	Bulunamadı	200 - 400 MPa
Çekme Dayanımı	R_m	< 300 MPa	350 - 800 MPa
Uzama	A_5	Bulunamadı	% 3 - 30
Brinell Sertlik	HB	> 600	140 - 300
Nodül Sayısı	10 mm kesit	< 50 her mm ²	> 150 her mm ²
Mikroyapı	ASTM Klasifikasyonu	Sementit	Feritik ve/veya perlitik

6.3.1.1 Aşılamanın Önemli Faydaları

- Yapıda çil olarak adlandırılan sert, kırılgan demir karbürlerin (sementit) oluşumunu engeller ve ötektik katılaşma sırasında grafit oluşumunu artırır.
- İşlenebilirlik ve mekanik özellikleri geliştirir ve kesit değişimlerindeki dalgalanmaları azaltır.
- Küresel grafitli dökme demir dökümde grafit çekirdeklerin sayısını artırır. Böylece tüm kesit kalınlıklarında daha üniform mikro yapı elde edilir. Bu tip yapılar daha iyi mekanik özellikler gösterir, bazı alaşım ya da demirdeki diğer eser elementlerin segregasyon eğilimini azaltır ve işlenebilirliği artırır.
- Sıvı metalin kükürt oranı (pik döküm), sıcaklık ve toplam bekleme süresi uygun aşı malzemesi seçimi için en öncelikli parametrelerdir[37].

6.3.1.2 Aşı Alaşım Bileşimi

Aşı malzemesi olarak kullanılan ferrosilisyum alaşımları düşük miktarda bir ya da daha fazla diğer elementlerden de içermelidir ki nihai üründe arzu edilen özellikler sağlanabilsin. Genellikle aşılama ilavesi kontrollü miktarlarda çeşitli elementler içerir ki bu

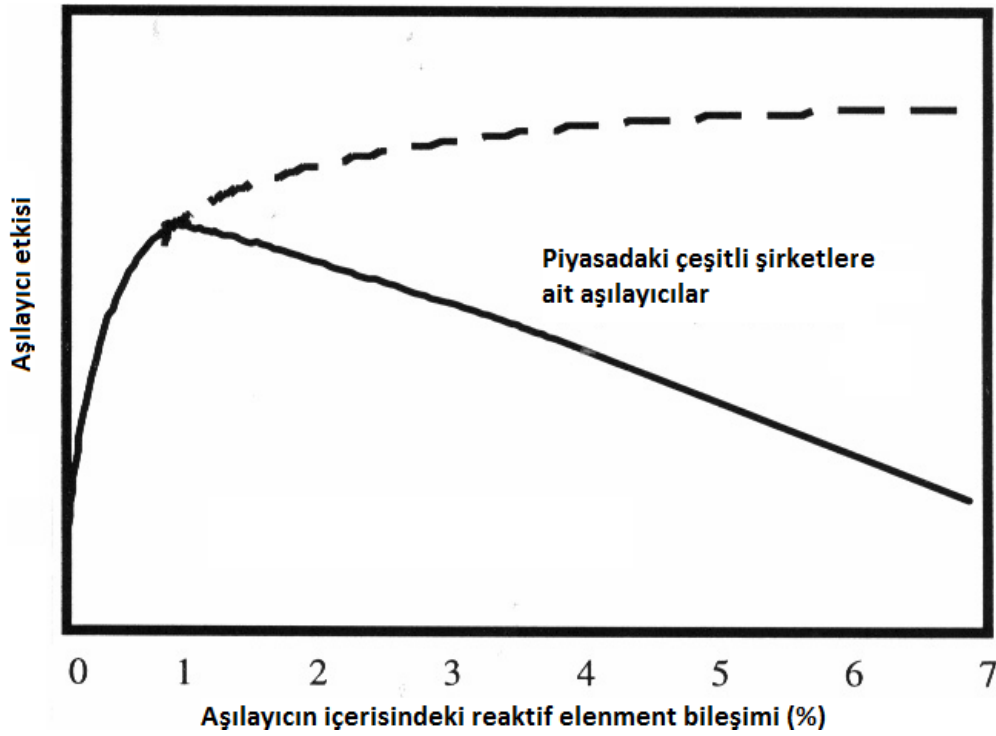
sayede daha yüksek verim elde edilir. Ticari aşılayıcılarda kullanılan en önemli elementler aşağıda verilmiştir:

Çizelge 13 Ticari aşılayıcılarda kullanılan en önemli elementler

Temel elementler	Yararlı elementler
Kalsiyum	Zirkonyum
Baryum	Seryum (RE)
Stronsyum	Alüminyum
	Kükürt
	Oksijen

Burada stronsyum sadece kalsiyum ve alüminyumun yokluğunda tam anlamıyla efektif olduğu için bu anlamda diğer elementlerden farklıdır. Diğer alaşımların kombinasyonu da fayda sağlayabilir[37].

Hiçbir FeSi-bazlı aşılayıcı yukarıdaki elementlerden bir ya da birkaçı olmadan yararlı olamaz. Aşağıdaki şekilde aşılayıcıdaki reaktif element (örneğin Ca, Ba, Sr vb.) miktarlarının aşı verimine etkisi gösterilmektedir ve optimum verimin %0.5'in üzerindeki konsantrasyonlarda elde edildiği görülmektedir.



Şekil 6.4 Ferrosilisyum bazlı aşılایıcının reaktif element miktarının malzemenin verimine etkisi (örneğin nodül sayısı ya da çil oluşumunun azaltılması)

Aşı Bileşimi ile İlgili Önemli Faktörler;

- Birçok dökümhane şartı altında, stronsyum, kalsiyum ve baryum miktarlarının %0.6 ile 1.5 arasında olması normalde dökme demirde istenilen aşılama verimini sağlamaktadır.
- Stronsyum içeriği veya kalsiyum ve baryum miktarının toplamı %0.5'in altına düştüğünde aşı verimi önemli ölçüde azalacak ve karbür ya da çil oluşabilecektir.
- %1.5 'in üzerindeki alaşım miktarları bazı şartlarda daha iyi aşılama verimi sağlayabilir ancak cüruf ya da dros oluşturma eğilimini de arttırabilir.
- %0.05'in altında kükürt içeren gri dökümde sadece bazı belirli aşılar (örneğin stronsyum artı zirkonyum içerenler) etkili olabilir.
- Stronsyum içeren aşılایıcılar birçok gri dökümde son derece etkilidir, ancak küresel grafitli dökme demir dökümde ürün küreselleştirme tretmanının bir parçası olan yüksek miktarda RE (nadir toprak metalleri) içerdiğinden aynı sonucu vermeyebilir[37].

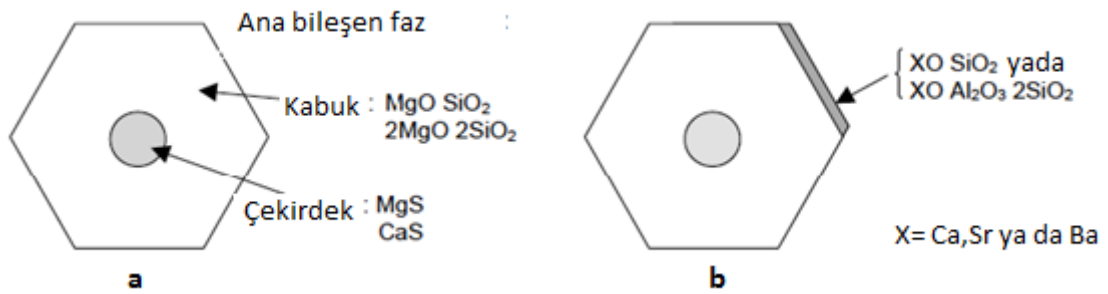
6.3.1.3 Aşılama Mekanizmaları

Geçmişte dökme demirin katılaşması esnasında grafit çekirdeklenme mekanizmalarını açıklayan birçok teori geliştirilmiştir. Bu teorilerden birçoğunda grafitin katılaşma esnasında metal dışı elementlerden heterojen çekirdeklenmenin bir sonucu olarak oluştuğu ve Ca, Ba ve Sr gibi minör elementlerin çekirdeklenme prosesinde önemli rol oynadığı kabul edilmiştir.

Magnezyum tretmanı görmüş dökme demirlerde mikro inklüzyonlar tretmandan sonra temel olarak magnezyum, kalsiyum, kükürt, silisyum ve oksijen içerir. Bunlar magnezyum tretmanının ilk reaksiyon ürünleridir. Inklüzyonlar, sülfür çekirdek ve dış

silikat kabuktan oluşur. Sülfür çekirdek hem MgS hem de CaS içerirken, dış kabuk kompleks magnezyum silikatlardan oluşur (örneğin MgSiO_3 , Mg_2SiO_4). Bu fazlar katılaşma esnasında grafit için güçlü çekirdeklenme bölgeleri oluşturmaz çünkü ortamda büyük bir çekirdek/grafit arayüzey enerji engeli mevcuttur[38].

Ca içeren bir ferrosilisyum ile aşılama sonrası, küreselleşme esnasında oluşmuş sülfür/oksit inklüzyonlarının mevcut olduğu yüzeyde CaSiO_3 ve $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ 'in hegzagonal silikat fazları meydana gelir. Bu kalsiyum silikatlar, grafit kristal kafesine iyi uyum sağlayan (örneğin düşük enerji arayüzeyi gibi) hegzagonal yapılarından dolayı katılaşma esnasında grafit çekirdeklenmesi için tercih edilen bölgelerdir. Aşağıdaki şekilde solda küresel grafitli dökme demir dökümde küreselleşmeden sonra oluşan tipik mikro inklüzyonlar, sağda ise Ca, Ba ya da Sr içeren bir ferrosilisyum aşı ile aşılama sonrasında inklüzyon bileşimi şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 6.5 (a) Sfero dökümde sülfür/oksit mikro inklüzyonu (b) X-içeren ferrosilisyum aşı ile aşılama sonrası bir inklüzyonun şematik gösterimi (X=Ca, Sr ya da Ba)

Yüzey kabuğu aşı ilavesi esnasında oluşan hegzagonal kalsiyum silikatlardan meydana gelirken, yığın partikül küreselleştirme tretmanının bir ürünüdür. Bu nedenle aşılama eriyikteki çekirdek partiküllerinin sayısını arttırmaz ancak tretmanda oluşan mevcut küreleri iyileştirir.

Bu durum magnezyum tretmanı ve aşılama arasındaki önemli ilişkiyi açıklar ve küresel grafitli dökme demir dökümde etkili bir aşılamanın temeli küreselleşme esnasında yapılmasında yatar. Sonuçta elde edilen küre sayısı yoğunluğu inklüzyon yüzey modifikasyonuna bağlı olarak önemli ölçüde farklılık gösterebilir.

Aşılama stronsyum veya baryum içeren ferrosilisyum bir aşıyla yapıldığında kalsiyum silikatlara eşdeğer hegzagonal silikatlar oluşur (örneğin SrSiO_3 , $\text{SrAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$, BaSiO_3 , $\text{BaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$)[38].

Bazı önemli notlar

- ✓ Saf ferrosilisyumun hiçbir şekilde aşılama özelliği yoktur.
- ✓ Küresel grafitli dökme demir dökümde aşılama potansiyel çekirdekleşme bölgelerinin sayısını arttırmaz, ancak mevcut bölgeleri iyileştirir.
- ✓ Etkili bir aşılama için küresel grafitli dökme demir dökümde magnezyum tretmanı esnasında oluşan metal dışı mikro partiküllerin (sülfid ve oksitler) sayısının yüksek olması ve gri dökümde de yüksek miktarda mangan sülfid partiküllerinin oluşması büyük önem taşır.
- ✓ Ca, Ba, Sr gibi minör elementlerle birlikte silisyum miktarı güçlü etki açısından aşılama ajanlarında önemli kritik rol oynar.
- ✓ Ana metalin oksijen içeriği de grafit çekirdeklenmesinde etkili oksitleri oluşturması açısından önemlidir[38].

6.3.1.4 Aşılama Uygulamaları

Döküm işlemi esnasında aşılama ajanları demire genellikle aşağıdaki üç aşamadan bir ya da birkaçında eklenir:

1. Doldurma esnasında döküm potasına.
2. Metal kalıba girerken metal akışına.
3. Kalıp yolluk sistemine dikkatlice yerleştirilen bir tablet kullanarak.

Aşılama yöntemi seçimini etkileyen faktörler:

1. Potanın doldurulmasından son dökümün alınması arasında geçen süre, bozulma süresi olarak bilinir (kalın kesitli parçalarda metalin katılaşmasına kadar).
2. Metal sıcaklığı.
3. Prosesin herhangi bir aşamasında aşının belli bir noktaya eklenebilmesi,

4.Döküm sisteminin geç akışa verme prosesine uygunluğu[39].

6.3.1.4.1 Potada Aşılama

Bekleme potalarında kaçınılmaz süre uzamalarından dolayı etki kayıplarını dengelemek için oldukça fazla miktarda aşılavesi yapmak gereklidir. İlave oranı gri dökümde çoğunlukla %2'den başlarken küresel grafitli dökme demir dökümde kritik parçalarda %0.75'den başlar. Aşıl malzemesi pota boyutuna göre seçilmeli ve oksidasyona ve termal hava akımlarına bağlı kayıplardan kaçınacak şekilde tozsuz olmalıdır. Genellikle 300 kg'a kadar olan potalarda tane boyutunun 0.5-3 mm, daha büyük potalarda ise 1-6 mm olarak seçilmesi tavsiye edilir.

Aşılavıcıdan maksimum verimi alabilmek için aşağıdaki basit ilave kuralları takip edilmelidir:

- ✓Aşılı metal potaya girerken akışa verin, önceden pota tabanına atmayın.
- ✓İdeal aşılavesi potanın %25 - %75 sıvı metalle dolum aralığında elde edilir.
Böylece iyi karışım ve çözünme sağlanmış olur.
- ✓Ocaktan sıvı metal almadan önce yüzeydeki cüruf çok iyi temizlenmelidir. Aksi takdirde aşıl malzemesi cürufa karışacak ve boşa gidecektir.
- ✓Potalar arasında birden fazla transfer yapılıyorsa etki kaybını minimuma indirebilmek için aşılı dökümden önce son transfer esnasında ekleyin.
- ✓Aşıl, özellikle pota çok sıcakken ya da bir önceki dökümden az miktarda da olsa metal kaldıysa dökümden önce asla potanın tabanına ilave edilmemelidir.

Küresel grafitli dökme demir dökümde aşıl malzemesinin magnezyum reaksiyonu sona erdikten sonra ilave edilmesi gereklidir. Aşılın küreselleştirici ile birlikte ya da reaksiyon esnasında ilave edilmesi verimini önemli ölçüde düşürecek ve dökümde artan karbür (sementit) miktarına sebep olabilecektir. Küreselleştirici ve aşılın aynı potaya ilave edilmesi gereken durumlarda ise, işleme sıvı metalin yaklaşık 2/3'ünün küreselleştiricinin üstüne dökülene kadar ara verilmelidir. Daha sonra reaksiyon bitinceye kadar beklenmeli ve bundan sonra aşıl yukarıda belirtilen şekilde kalan metalin akışına ilave edilmelidir[39].

6.3.1.4.2 Döküm akışında aşılama

Geç akışa verme prosesinde, metal kalıba girerken aşı akışa ilave edildiğinden aşı etkisinin kaybı hemen hemen minimum seviyededir. Bu sayede, ilave oranları ticari pota prosesiyle kıyaslandığında oldukça düşük seviyededir; gri dökümde %0.02-0.05 ve küresel grafitli dökme demir dökümde %0.05-0.2. Aşının sıvı metal içinde hızlı çözünmesini sağlamak ve aşılama sisteminde iyi derecede akışkanlık elde edebilmek için aşı tane boyutu 0.2-0.7 mm olmalıdır. Özel aşılama sistemleri ticari olarak mevcuttur, ancak birçok dökümhane döküm sırasında istikrarlı ilave oranları elde edebilmek için helezonlu besleme mekanizmaları dizayn etmiş ve kurmuştur.

Geç akışa verme prosesi sabit döküm istasyonlarına veya pota taşıyıcılarına kolaylıkla uygulanabilir, ancak hareket eden bir potada tatmin edici sonuçlar elde edilememiştir[39].

6.3.1.4.3 Kalıpta aşılama

Preslenmiş veya dökülmüş aşı malzemesinden üretilen tabletlerin kullanımı en garantili yöntem olarak kabul edilir. Sıvı metalin bu tür bir tretmanla muamelesi nadiren tek başına aşılama olarak uygulanır. Değişik boyut ve bileşimlerde tabletler ticari olarak mevcuttur ve tablet kullanımı besleme süresinin uzun olduğu durumlarda ikincil bir aşı olarak görev yaptığından ya da geç akışa vermenin mümkün olmadığı hallerde gittikçe önem kazanmaktadır. Tablet kalıba yerleştirilirken personel hatalarından kaynaklanabilecek olası sorunları önlemek için özellikle tabletlerin tek aşı olarak kullanıldığı durumlarda denetim mutlaka gereklidir.

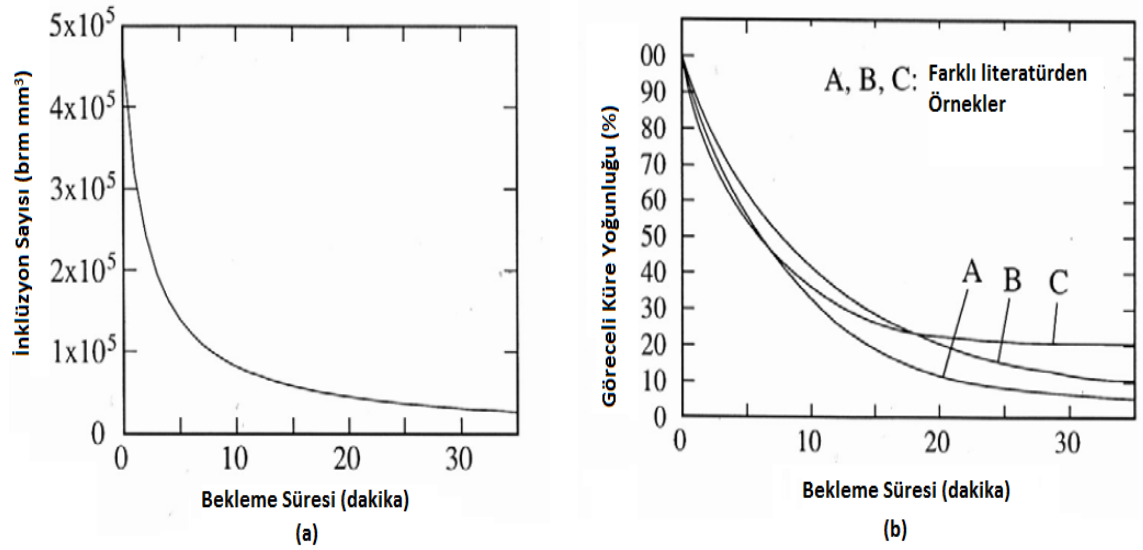
6.3.1.5 Aşı Etkisinin Azalması

Aşılایıcılar, ötektik katılaşma sırasında grafit büyümesine uygun bir çok çekirdeklenme bölgesi oluştururlar. Bu durum gri dökümde ötektik hücre sayısında, küresel grafitli dökme demir dökümde ise grafit nodül sayısında artışa sebep olur. Sonuçta aşırı soğuma engelleneceğinden özellikle ince, hemen soğuyan kesitlerde karbür ve çil oluşma riski azalır.

Aşılmalı eklenir eklenmez etki gösterir ancak zamanla etkisini yitirmeye başlar. Aşı etkisinin azalma hızı aşağıdaki etkenlere bağlıdır:

- ✓ Aşı bileşimi;
- ✓ Aşı malzemesinin eklendiği sıvı metalin kimyasal kompozisyonu;
- ✓ Sıcaklık;
- ✓ Yüzey enerjileri;
- ✓ Difüzyon hızları.

Etki kaybı aşılardan sonraki ilk dakikalarda çok fazladır. Etki kaybı, potansiyel çekirdeklenme bölgelerinin sayısını azaltan çekirdeklerin birbiriyle bütünleşmesi ve tekrar çözünmesi olarak açıklanabilir (örneğin çekirdek partiküllerinin Ostwald Ripening olarak adlandırılan etkiye göre büyümesi ya da kalınlaşması). Bu davranış aşağıdaki diyagramlarda gösterilen deney sonuçlarıyla da teyit edilmektedir[40].



Şekil 6.6 (a) Çekirdek sayısında (mikroinklüzyonlar) zamanla azalma (b) Aşı etkisi kaybının karakteristik özellikleri.

Etki Kaybının Başlıca Sonuçları:

1. Ötektik katılma esnasında daha fazla aşırı soğumaya sebebiyet verir ki bu durum gri ve küresel grafitli dökme demir dökümde özellikle ince kesitlerde çil oluşturma eğilimini artırır.
2. Yapıdaki ötektik hücre ya da grafit nodül sayısını azaltır ve grafit oluşumunu olumsuz etkiler. Aşı etkisinin önemli ölçüde azalması, nihai ürünün özelliklerini

olumsuz etkileyecek şekilde gri dökümde ferrit ile birleşmiş aşırı soğumuş grafit, küresel grafitli dökme demir dökümde ise önemli miktarlarda küresel olmayan grafitler elde edilmesine sebep olur.

Etki Kaybıyla İlgili Bazı Temel Noktalar;

- ✓Tüm aşılایıcılar zamana bağılı etkisini yitirir.
- ✓Aşılایmadan sonra sıfır etki kaybının meydana geldiğı bir nokta mevcut değildir. Maksimum verim için metal aşılایmadan sonra mümkün olan en kısa zamanda dökülmelidir, akışa aşı bilinen en iyi yöntemdir.
- ✓Kimyasal bileşimine ve uygulama koşullarına bağılı olarak aşı malzemelerinde farklı etkileşimler gözlemlenir.
- ✓Yüksek ötektik hücre sayısı veren bir aşılایıcının çil oluşumunu azaltmada da en etkili olması gerekmez. Gri dökümde Stronsyum bazlı aşılایıcıların sert hücre yapısı, düşük çekinti eğilimi ve çok düşük çil seviyesi sağladığı bilinmektedir.
- ✓Hangi şartlar altında olursa olsun bir aşının etki kaybı karakteristikleri sadece bileşiminden anlaşılamaz. Bu nedenle dökümhaneler hangi aşının kendi arzu ve beklentilerini karşılayacağını yapacakları denemelerle tespit etmelidir. Bu denemeler, metal sıcaklığı, aşının ne şekilde depolandığı gibi faktörlerin etkilerinden kaçınmak için titizlikle gerçekleştirilmelidir.

6.3.1.6 Küresel grafitli dökme demir Dökümde Aşılایıcı Seçimi

Şarj malzemeleri ve küreselleştiriciler mükemmel seçilmiş olsa da aşılایıcı seçimi yanlışsa istenen sonuç elde edilemez. Bu ana nokta göz önünde tutularak aşağıdaki faktörler hesaba katılmalıdır;

- ✓Hangi tip küreselleştirici kullanıldığı, saf Mg prosesleri, daldırma yöntemi gibi tel besleme veya konvertör metodları demirde kendi çekirdek yoğunluğunu düşürerek aşılایmayı zorlaştırır. MgFeSi proseslerinin ise demire çekirdek artırıcı kesin bir etkisi vardır. Tipik olarak saf Mg prosesleri uygulandığında yüksek miktarda aşılایıcı ilavesi gerekir.
- ✓Tretmandan son kalıbın dökülmesine (büyük döküm parçalarında katılışmanın sonuna kadar) geçen döküm süresi.

✓Küreselleştiricideki seryum mish metal miktarı (veya ilave edilen seryum mish metal).

Seryum mish metali, ocak şarjına eklenen çelik hurdadan gelen zararlı elementlerin etkilerini nötralize eder, fakat aynı zamanda seryum mish metali aşısı etkisi yapan elementleri de nötralize edebilir

Özellikle küreselleştirici olarak kullanılan magnezyumun karbür oluşumuna sebebiyet vermesinden dolayı küresel grafitli dökme demir dökümdeki aşılama miktarı gri döküme nazaran daha fazladır. Gri dökümün özellikleri grafit lamelleri tarafından belirlenirken, küresel grafitli dökme demir dökümde küresel grafitlerin matriksi belirleyen etkisi mevcuttur. Bu yüzden en iyi özellikleri elde edebilmek için yuvarlak nodül oluşumu gerekli ve önemlidir[40].

Esas olarak tümü ferrosilis ve dökülen parçanın özelliklerine iyi yönde katkıda bulunan elementlerden oluşan dört ana grup aşılama malzemeleri mevcuttur.

Çizelge 14 Pota ve akışa vererek ilave edilen aşılama malzemeleri

Element	Etkileri
Kalsiyum Ca	Dökümhane sınıfı ferrosilisyumlar dengeli miktarlarda kalsiyum ve alüminyum içerir. Malzemelerin çoğu dökümde pinhole problemlerine yol açan yüksek Al (>%3) içeren kaynaklardan elde edildiğinden malzeme seçimi dikkatli yapılmalıdır. Kaliteli FeSi aşılama malzemeleri orta kesitli parçalarda yeterli küre sayısı ve demire istenen özellikleri vermesi bakımından tatmin edicidir.
Baryum Ba	Baryum içeren aşılama malzemeleri özellikle besleme süresinin uzun ya da dökümün katılaşmasının yavaş (örneğin ağır parçalar) olduğu durumlarda yararlıdır. Toplam Ba içeriği %3'ün üzerinde olan aşılama malzemeleri gereksiz olduğu gibi sadece cüruf oluşumuna sebebiyet verir.
Stronsiyum Sr	Sfero dökümde stronsiyum içeren aşılama malzemeleri belli şartlar altında kullanılabilir. Stronsiyum, sementitin kesin olarak oluşmamasını sağlar ve sıvı metalin saf Mg, seryum mish metalsiz proseslerinde veya %1'in altında seryum mish metali ticari FeSiMg malzemelerinin kullanılmasında istenilen küre sayısının elde edilmesine olanak verir. Yüksek seryum mish metal stronsiyumun etkilerini yok edebilir.
Zirkonyum Zr	Zirkonyum orta etkide iyi bir aşılama malzemesi olup tretman etkisinin azalmasını geciktiren bir elementtir. Ayrıca zirkonyumun yoğun maçalı dökümlerde veya shell kalıp sistemden gelen azotu ZrN ₂ şeklinde bağlayarak ilave bir pozitif etkisi vardır.

Seryum mish metali, bizmut ve mangan diğer ticari aşılama malzemeleri arasında yer alır ve bu aşılama malzemelerinin özellikleri hakkında detaylı bilgi üreticilerinden temin edilebilir[40].

6.3.1.7 Kalın Kesitlerin Aşılması

Aşılamanın en önemli faydaları yapıda sert, kırılğan demir karbürlerin (sementit) oluşmasını engellemek ve ötektik katılaşma esnasında grafit oluşumunu desteklemektir. Gri dökümde bu avantajlara işlenebilme kabiliyeti ve mekanik

özelliklerin gelişmesi ve ayrıca farklı döküm kesitlerinden kaynaklanan özelliklerin daha az sapmaları da eklenmelidir.

Küresel grafitli dökme demir dökümde ise, grafit nodüllerin sayısındaki artış farklı kesit kalınlıklarında daha düzgün homojen mikro yapıların oluşmasını sağlar. Böyle mikro yapılar ile daha iyi mekanik (mukavemet) özellikler, demirde yer alan alaşım ya da eser elementlerin segregasyon eğiliminin azalması ve daha iyi işlenebilirlik elde edilir[41].

Aşılama malzemeleri genellikle döküm işlemi esnasındaki üç aşamanın en az ikisinde sıvı metale ilave edilmelidir:

Ergitme veya bekletme ocağından döküm potasına doldurulurken (pota aşısı)

Metalin kalıba akışına (ağız aşısı) Kalıp yolluk sisteminde en uygun bölgeye dikkatlice yerleştirilmiş aşılama tablet kullanılarak yapılan aşılama.

İki aşamalı bir aşılama önemli faydalar göstermiştir.

Kalın kesitli ağır parçaların dökümünde akışta aşılama zor olabileceğinden, aşılama sistemindeki ikinci adım kalıba yerleştirilecek doğru boyutlarda seçilmiş tabletler ile değiştirilmelidir. [41].

6.3.1.7.1 Pota Aşısı

Bekletme potalarında kaçınılmaz uzayan sürelerle ilgili olarak oluşabilecek çekinti kayıplarını dengelemek için, oldukça yüksek miktarlarda aşılama kullanmak gerekir. Katkı oranları gri dökümde çoğunlukla %0.2 en kritik küresel grafitli dökme demir parçalarda %0.75'e kadar değişir. Aşılama miktarının tane boyutu pota ölçülerine göre belirlenmelidir.

Aşılama miktarından beklenen maksimum verimi alabilmek için basit ilave kuralları takip edilmelidir:

- ✓ Aşılama miktarını potaya giren metal akışına veriniz.

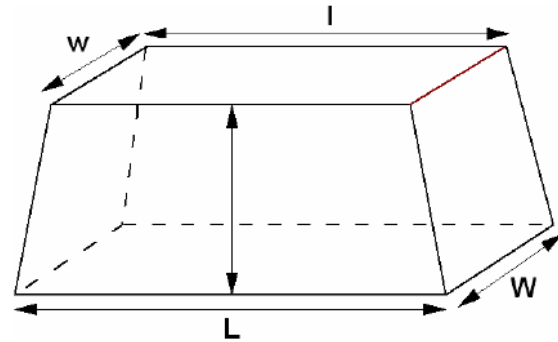
- ✓ Pota dolum seviyesi %25 ile %75 arasındayken aşılایıcıyı metal akışına veriniz.
- ✓ Sıvı metalin potaya alınmadan önce cüruftan arındırıldığından emin olun.
- ✓ Metalin birçok potaya transferinin gerekli olduğu durumlarda, aşılایıcı çekintiyi minimum seviyede tutmak için dökümden önce son transfer esnasında verilmelidir[41].

6.3.1.7.2 Kalıpta aşılama

Eğer sıvı metal akışına geç aşılama yapmak mümkün değil ise, mümkün olan maksimum aşılama etkisini elde etmek için dökülmüş aşılایıcıdan bir tablet kalıba / döküm sistemine ikinci aşılایıcı olarak ilave edilmelidir.

Tabletler belirlenmiş boyut ve şekilde dökülmüş aşılایıcı parçaları olup kalıp yolluk sistemine ya da bazı durumlarda bütünleştirici bir parça olarak döküm yolluğu havuzuna yerleştirilir. Optimum performans ağırlık olarak % 0.05 ile 0.15 ilave oranlarında elde edilir.

Tablet	L	W	H	I	w
D2kg	164	74	76	134	42
D5kg	222	100	110	172	52
D10kg	266	130	132	220	80
D20kg	312	170	166	260	116

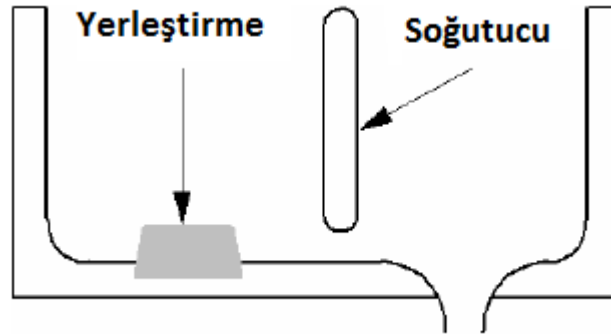


Şekil 6.7 Kalıp içerisindeki aşılamada kullanılan tabletin şekli ve boyutları

Döküm yolluk girişine yerleştirilen tabletler

Orta ve büyük boyutlardaki parçalar Elcast tabletler ile döküm yolluğu havuzunda aşılır. Yolluk havuzu gerekli sıvı metalin en az %20 kapasitesine sahip olmalı ve hızlı döküm esnasında türbülans ya da sıçramalardan kaçınmak için her zaman dolu tutulmalıdır. Başarılı bir kalıpta aşılama için yolluk havuzunun büyüklüğü de oldukça

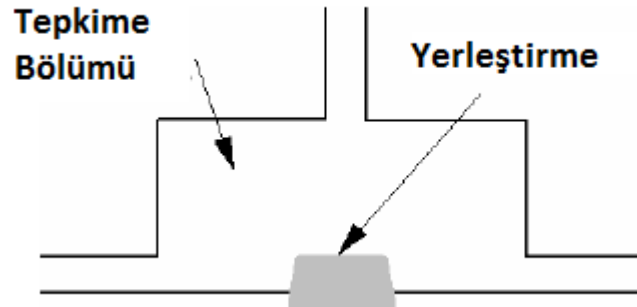
önemlidir. Daha büyük parçaların dökümünde ise değişik tabletlerden oluşan bir kombinasyon seçimi yapılabilir[41].



Şekil 6.8 Döküm yolluk girişine yerleştirilen tablet

Yolluk sistemine yerleştirilen tabletler

Orta büyüklükteki döküm parçaları için tabletler yolluk sistemine yerleştirilir. Tabletler yolluğun altındaki reaksiyon odacığına yerleştirilir. Döküm deliği dikdörtgen şeklinde olmasına karşın döküm oluğu yamuk prizma şeklindedir. Reaksiyon odacığı ile birinci döküm deliği arası en az 120 mm olmalıdır. Reaksiyon odacığının boyutları tablet boyunun 1.5 katı ve diğer ölçülerinin 2 gibi bir faktörle çarpılmasıyla belirlenir.



Şekil 6.9 Yolluk sistemine yerleştirilen tabletler

Tabletlerin, döküm süresine ve sıvı metalin sıcaklığına bağlı olarak spesifik bir süre içinde eriyip çözülmesi istenir. Örnek olarak D2kg bir tablet için çözülme süresi $1370 \pm 40^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta 40 saniye olacaktır[41].

6.4 Magnezyum Tretman Prosesleri

Farklı proseslerin önemli karakteristik özellikleri Ni/Mg alaşımı, MgFeSi alaşımları, Mg metali ve Mg/Fe briketler gibi değişik tretman malzemeleri için aşağıda sıralanmıştır. Tanımlanan değişik prosesler overpour ya da sandwich, tundish cover, kalıpta, akışa verme, daldırma, konverter ve Mg teldir (cored wire).

Çizelge 15 Dökümhanelerin şartlarına en uygun tretman prosesleri.

	Overpour ya da Sandwich		Tundish Cover	Kalıpta	Akışa Verme	Daldırma		Kon-verter	Cored Wire
Prosesle uygun tretman alaşımı	Ni bazlı alaşım	MgFeSi alaşımı	MgFeSi alaşımı	MgFeSi alaşımı	MgFeSi alaşımı	MgFeSi veya Mg/Si	Mg/Fe briket	Mg	Mg/Si ya da Mg
Mg-oranı (%)	4 – 15	3 - 10	3 - 10	3 - 10	3 - 5	10 - 45	15 +	100	20 - 100
Mg-verimi (%)	45 - 90	35 - 70	50 - 80	70 - 80	30 - 50	30 - 60	30 - 50	30 - 50	30 - 50
Yatırım maliyeti	Yok	Yok	Düşük	Yok ¹⁾	Düşük	Orta	Orta	Yüksek	Orta
Genel proses esnekliği (6=en yüksek)	6	6	5	2	3	3	2	1	2
Çıkan toz	Orta	Orta/yük.	Düşük	Yok	Orta	Yüksek	Yüksek	Yüksek	Yüksek
Toz tutma ihtiyacı	Evet	Evet	Hayır ²⁾	Hayır ²⁾	Hayır ³⁾	Evet	Evet	Evet	Evet
Ana metal kükürt limitleri (%)	0.04	0.03	0.03	0.01	0.03	0.04	0.1	No	No
Tretman yeri	Ocak	Ocak	Ocak	Kalip	Uygun yerde	Uygun yerde	Uygun yerde	Uygun yerde	Uygun yerde
Tretman ağırlık limitleri	Yok	Yok	Yok	< 500 kg	Yok	> 500 kg	> 500 kg	> 500 kg	> 500 kg
Tretmanda aşılama etkisi	Yok	Düş./orta	Orta/yük.	Çok yüksek	Orta/yük.	Düşük	Yok	Yok	Yok/düş.
Reaksiyon şiddeti	Düş./ort	Orta/yük.	Düş./orta	Çok düşük	Orta	Orta/yük.	Orta/yük.	Çok yüksek	Yüksek
Artık silisyum kalma riski	Hayır	Evet	Evet	Evet, ama muhtemelen değil	Evet	Evet	Hayır	Hayır	Hayır
Prosesle uygun üretim birim boyutu	Küçük (alaşım)	Küçükten büyüğe	Küçükten büyüğe	Ortadan büyüğe	Küçükten büyüğe	Ortadan büyüğe	Ortadan büyüğe	Büyük	Ortadan büyüğe
Lisans/ telif hakkı	Hayır	Hayır	Hayır	Hayır	Evet ⁴⁾	Hayır	Hayır	Evet	Hayır

¹⁾ Kalıp prosesinde her bir model için özel olarak dizayn edilmiş yolluk sistemleri gereklidir.

²⁾ Tundish cover ve kalıp prosesleri toz tutma sistemine en az ihtiyaç duyan proseslerdir.

³⁾ Tretman alanında genel bir toz tutma sistemi tavsiye edilir.

Çizelge 15’de, kendi şartlarına en uygun tretman yöntemi ve alaşımı seçebilmeleri için küresel grafitli dökme demir döküme yeni başlayacak dökümhaneler için hazırlanmıştır[42].

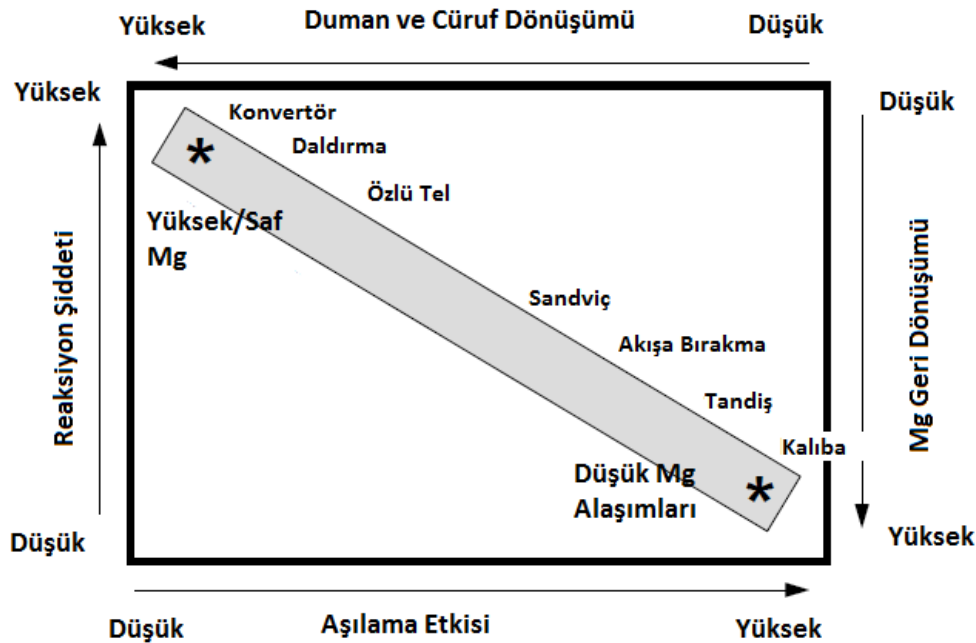
Birçok uygulamada tundish cover prosesi, kolaylığı, en iyi kararlılığı vermesi, düşük bakım ve operasyon maliyetleriyle birlikte yüksek magnezyum verimi sağlaması gibi avantajlarından dolayı birçok küçük ve büyük dökümhane için iyi bir seçimdir. Ancak,

özel üretim yapan bazı büyük tesisler için diğer prosesler daha uygun olabilir. Bu nedenle, her dökümhane güvenilirlik, ekonomiklik ve çevre kontrolü sağlayacak kendi prosesini belirlemelidir.

Şekil 6.10'da, reaksiyon şiddeti, magnezyum verimi, toz ve cüruf oluşumu ve aşılama etkisi gibi parametrelerin seçilen tretman prosesinden ne denli etkilendiği şematik olarak gösterilmektedir. Bu dört parametre arasında net bir ilişki mevcuttur ve tüm ticari tretman prosesleri şekildeki gölgelendirilmiş bölge boyunca yer alır.

Şeklin sol üst kısmında yüksek magnezyum içeren malzemelere uygulanan konverter ya da cored wire prosesleri yer alırken, sağ aşağı kısımda tundish cover ya da kalıpta uygulama gibi yüksek etkili prosesler bulunur.

Yüksek şiddette meydana gelen reaksiyonlar tipik olarak düşük magnezyum verimi, yüksek miktarda toz ve cüruf oluşumu ve aşılama zor metal oluşmasına neden olur. Reaksiyon şiddeti düşük olan prosesler ise aksine yüksek magnezyum verimi, düşük toz ve cüruf oluşumu ve iyi bir aşılama performansı sağlar. Diyagramın üst sağ ya da alt sol tarafına hiçbir proses yerleştirilemez[42].



Şekil 6.10 Ticari sfero döküm tretman prosesleri için “reaksiyon şiddeti”, “magnezyum verimi”, “toz ve cüruf oluşumu” ve “aşılama etkisi” parametreleri arasındaki ilişkinin şematik gösterimi.

6.4.1 Küresel Grafitli Dökme Demir Döküm Pota Tretman Proseslerinde Magnezyum İlavesi Ve Verimini Etkileyen Faktörler

Kalıcı magnezyum ve magnezyum verimi dökümcüler için her zaman bir tartışma konusu olmuştur. Bu sayfada küresel grafitli dökme demir dökümde magnezyum verimini etkileyen en önemli faktörler özetlenmiştir.

1) Sıvı metaldeki kükürt miktarı.

Sıvı metalin yüzey gerilimini arttırmak için kükürt mutlaka nötralize edilmelidir. Sıvı metaldeki yüksek kükürt oranı magnezyum ilavesinin artması gerektiği anlamına gelir.

2) Sıvı metaldeki oksijen miktarı.

Sıvı metalin yüzey gerilimini arttırmak için oksijen mutlaka nötralize edilmelidir. Kükürtte olduğu gibi sıvı metalde yüksek oksijen oranı mevcutsa magnezyum ilavesinin artması gerekir.

3) Ergitme ya da bekletme ocağından gelen cüruf.

Ocaktan gelen cüruf magnezyumla reaksiyona gireceğinden magnezyum verimini düşürecektir. Ocağın üzerindeki cürufun itina ile alınması gereklidir.

4) Tretman sıcaklığı.

Aşırı şiddetli reaksiyonlardan kaçınmak için tretman sıcaklığı mümkün olduğunca düşük tutulmalıdır. Sıcaklık ne kadar yüksek olursa magnezyum buharlaşması o ölçüde artacak ve dolayısıyla magnezyum verimi düşecektir.

5) Potaya MgFeSi ilavesi ve döküm işlemi arasında geçen süre.

Magnezyum ilavesi ile döküm arasında geçen süre ön ısıtma ve alaşımın oksitlenmesini önlemek için minimum tutulmalıdır. Aynı zamanda, potada hiçbir şekilde daha önceki tretmanlardan kalan sıvı metal bulunmamalıdır. Aksi halde bu sıvı metal alaşım ile reaksiyona girebilir.

6) Pota ve reaksiyon cebinde oluşan cüruf.

Pota ve reaksiyon cebinde oluşan cüruf, muhtemelen cüruf ve magnezyum arasında gerçekleşen reaksiyonlara bağlı olarak magnezyum verimini düşürür ve ayrıca cep derinliği azalacağından reaksiyon şartları değişir. Reaksiyon cebi cüruf ile dolduğu

takdirde alaşım dışarı dökölür. Cebin cürufıa tıkanmaması için pota boşken yan yatırılmalıdır.

7) Mg Alaşımının üzerini örten malzemeler.

İnce taneli FeSi ya da çelik talaş gibi potadaki alaşımın üzerini örten malzemeler reaksiyonun başlamasını geciktirecek ve magnezyumun sıvı metale daha iyi nüfuz etmesini sağlayacaktır.

8) Doldurma süresi.

Reaksiyon başlamadan potada yüksek ferrostatik basınç elde edebilmek için doldurma işleminin hızlı gerçekteştirilmelidir.

9) Etki kaybı/Döküm süresi.

Tretmandan sonra uzun süre bekletilmesi ve döküm işleminin uzun sürmesi durumunda etki kaybı görölmemesi için Magnezyum ilave oranı arttırılmalıdır. Bu tür sorunlar yaşamamak için döküm süresi minimumda tutulmalıdır.

10) Aşılama.

İyi bir aşılama sayesinde küreselleşme daha az magnezyum ile gerçekteştirilebilir. Bu tabii ki daha az alaşım ilavesi ve daha iyi magnezyum verimi anlamına gelmektedir.

11) Pota dizaynı.

İç yükseklik : Çap oranı en azından 2:1 olmalıdır ve reaksiyon cebi alaşım ilavesi ve örtü malzemesini alabilecek kadar geniş olmalıdır. Pota ayrıca ısı kayıplarını ve dolayısıyla istenilen tretman sıcaklığını minimuma indirmek için uygun şekilde izole edilmelidir. Alaşım ve sıcaklık verimi ağısından tundish pota önemle tavsiye edilmektedir. .

12) Küreselleştiricinin kimyasal kompozisyonu.

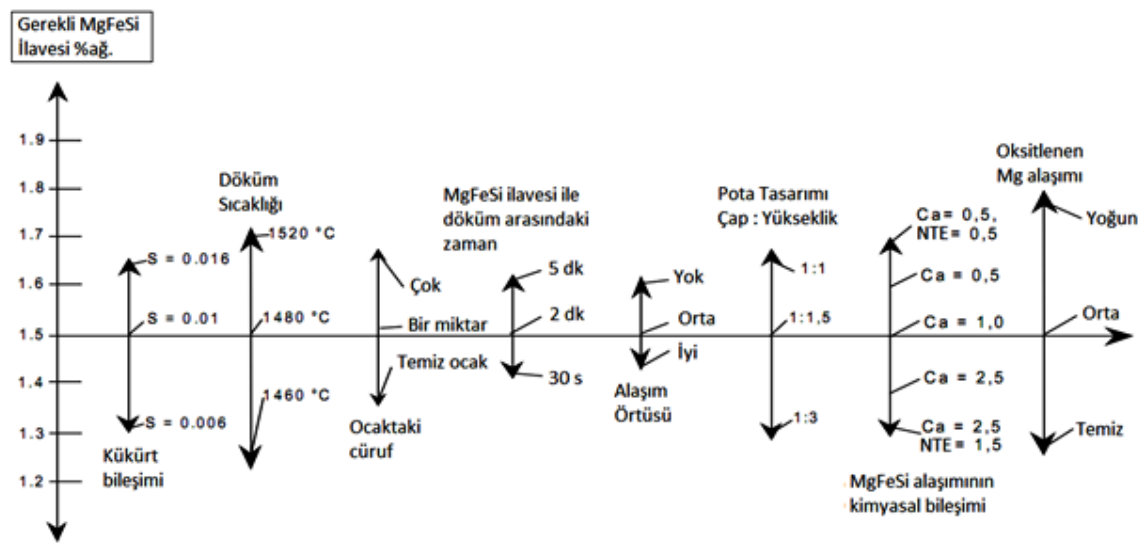
Alaşımda bulunan yüksek magnezyum şiddetli reaksiyona sebep olur ve verimi düşürür. Yüksek Ca ise reaktiviteyi düşürür ve verimi arttırır ancak cüruf eğilimini de arttırır. Nadir toprak metalleri (seryum), daha düşük magnezyumla çalışmaya ve metalde kalıcı magnezyumun daha düşük olmasına imkan sağlar.

13) Alaşım boyutu.

Geniş bir alaşım boyutu cepte ideal sıkışma sağlar. Bunun neticesinde alaşım ergimeye ve minimum kayıpla kontrollü olarak yavaş yavaş reaksiyona girmeye (çözünmeye) başlar. Yığınlar halinde yüzen parçacıklar ve yanma sonucu yüzeyde oluşan kısımlar kayıptır.

14) Döküm alaşımlarının depolanması.

Tüm döküm alaşımları neme maruz kaldığında oksitlenir. Oksitlenmiş malzemeler ile yeni malzemelere göre daha düşük verim elde edilir. Alaşım torbaları kuru yerlerde muhafaza edilmeli ve tretman istasyonunda ihtiyaç duyuluncaya kadar açılmamalıdır[43].



Şekil 6.11 Sfero döküm pota tretmanında MgFeSi ilavesini etkileyen faktörler.

6.4.2 Küresel grafitli dökme demir Dökümde Magnezyum Miktarı

Magnezyum sıvı dökme demire genellikle magnezyum ferrosilis alaşımı (MgFeSi ya da FeSiMg) olarak eklenir. Magnezyum katkısının ilk etkisi demirde bulunan kükürt ve oksijenle birleşerek sülfürler ve oksitler oluşturmaktır. Sıvı demirin bünyesindeki kükürt ve oksijen tamamen bağlanmadığı sürece yapıda küreler oluşturan serbest magnezyumun bulunması söz konusu değildir. Ana malzeme olan demirin içerdiği tüm kükürt ve oksijen miktarındaki dalgalanmaların üstesinden gelebilmek amacıyla gerekli olandan daha fazla miktarda magnezyum ilavesi yapılır. Bu fazla katkının tek amacı buharlaşan magnezyumu telafi edebilmektir. Sadece çok küçük bir miktar magnezyum, çekirdeklenme reaksiyonunun tamamlanmasından sonra demirin içinde çözünür.

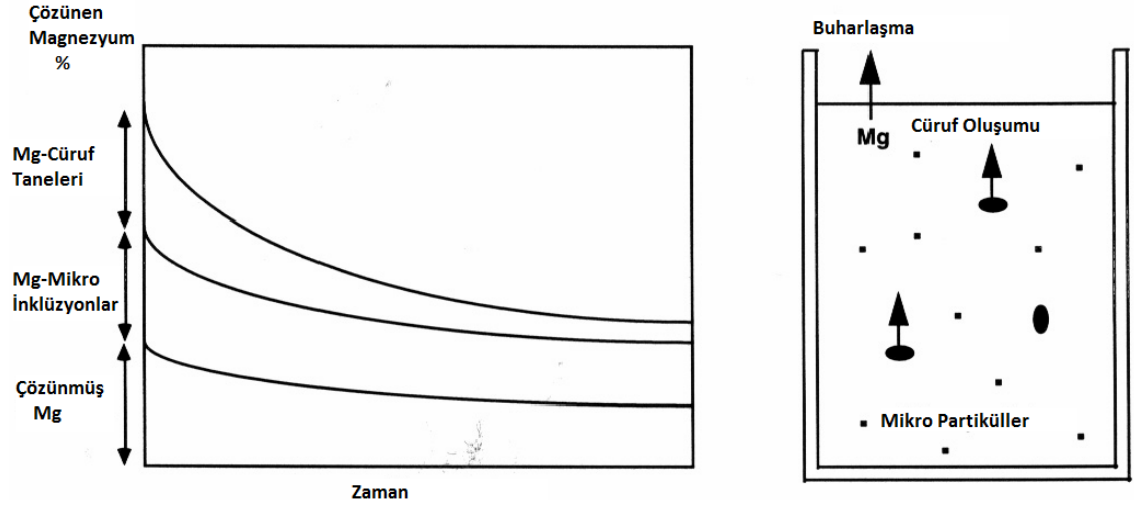
Sıvı demirin toplam analitik ve kalıcı magnezyum içeriği tretmandan sonra sadece;

Çözünen magnezyum,

Magnezyum bileşiklerinin mikro inklüzyonları (oksit ve sülfidler) halinde ve

Magnezyum içeren büyük cüruf parçalarından oluşur.

Metalde ki toplam magnezyum değişik yollardan bekletme süresi içinde reaksiyona girer. Aşağıdaki şekilde besleme özelliklerinin bekletme sırasında magnezyum miktarıyla olan ilişkisi şematik olarak gösterilmiştir. Sadece demirdeki toplam magnezyum miktarının belirlenebildiği geleneksel analiz teknikleriyle bu üç durumdan her birinin miktarını hesaplamak mümkün değildir[44].



Şekil 6.12 Tretman görmüş sfero dökümde Magnezyumun uzun bekleme esnasındaki azalması (sol), tretman potasında magnezyum kayıplarının şematik gösterimi (sağ).

Magnezyum Oranının Analitik Tespiti ve Bekleme Süresi içinde Azalmasına ilişkin Önemli Noktalar:

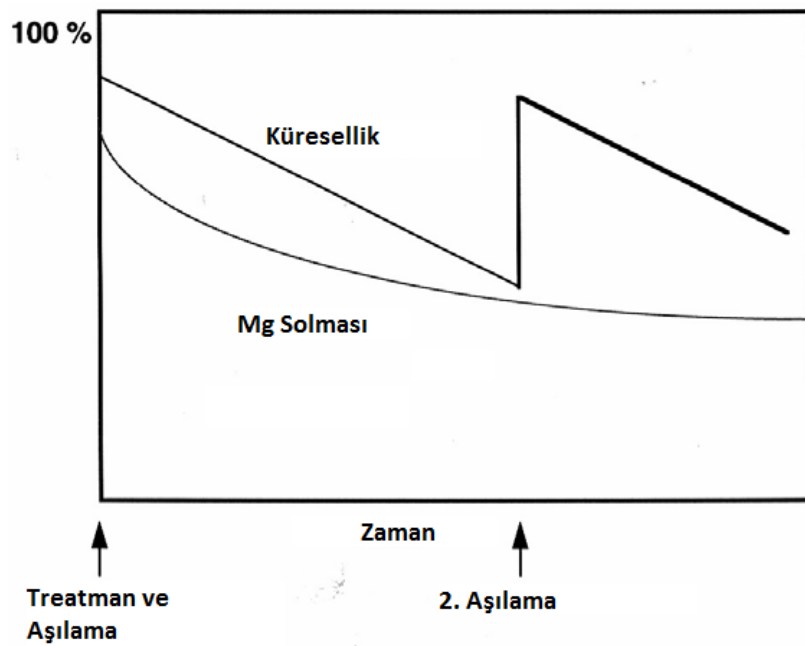
Küresel grafitli dökme demir dökümde analitik olarak tespit edilen kalıcı magnezyum miktarı çözünen magnezyum miktarıyla aynı değildir.

Bekletme sırasında magnezyum miktarının azalması cüruf oluşumu, inklüzyon yüzmesi ve çözünen magnezyumun buharlaşarak kaybolması olarak izah edilir. Bazı durumlarda magnezyum miktarındaki azalma sıvı demirin temizlenmesi ve cüruf hatalarının oluşmasının önlenmesini pozitif yönde etkiler. Çünkü istenmeyen cüruf partikülleri

bekleme süresinde sıvı metal yüzeyine doğru çıkar ve böylece sıvı metalden uzaklaştırılabilir.

Bir numunedeki toplam magnezyum miktarı (cürufklar, mikro partiküller ve çözünmüş Mg) konvensiyonel analiz metotlarıyla tespit edilebilir.

Bekletme sırasında çözünmüş magnezyum kayıplarının küçük oluşu ve magnezyum ilavesine bağlı küresel grafit yapının bozulması genellikle aşılama ile beslemenin bir sonucudur. Tamamen küresel grafit yapılar az miktarda geç aşılama ilavesiyle tekrar kazanılabilir[44].



Şekil 6.13 Bekletme esnasında nodül sayısındaki azalmanın şematik gösterimi. İkinci bir aşılama ilavesi, magnezyum içeriğinin devamlı düşmesine rağmen tamamen küresel grafit yapıların tekrar kazanılmasını sağlar.

6.5 Küreselleştirme

Grafitin küre şeklini almasını sağlayan elementler sayıca çok fazla olmasına rağmen, pratik uygulamalarda genellikle, az miktarda Ca, Ce ve diğer toprak alkali metallerle birlikte Mg kullanılır. Sanayide genellikle küresel yapının eldesi için küreselleştirici etkisi olan Mg kullanılır.

Mg hem ergime sıcaklığının düşüklüğü sebebiyle hem de kükürtle birleşmesi sebebiyle ancak özel işlemler sayesinde küresel grafitli dökme demirlerin dökümünde kullanılabilir. Küreselleştirici özelliğinden faydalanmak istenilen Mg' un kükürtle

birleşmesi istenmez. Bu sebeple sıvı dökme demirde kükürt miktarının % 0,02' den az olması gerekir. Bu durumda sıvı dökme demirde eğer kükürt miktarı bu aradan fazlaysa kükürt giderme işlemi yapmak gerekir[25,45].

Bunlar;

- Soda ile kükürt giderme
- Kireçtaşı ile kükürt giderme
- Kalsiyum karbür ile kükürt gidermedir.

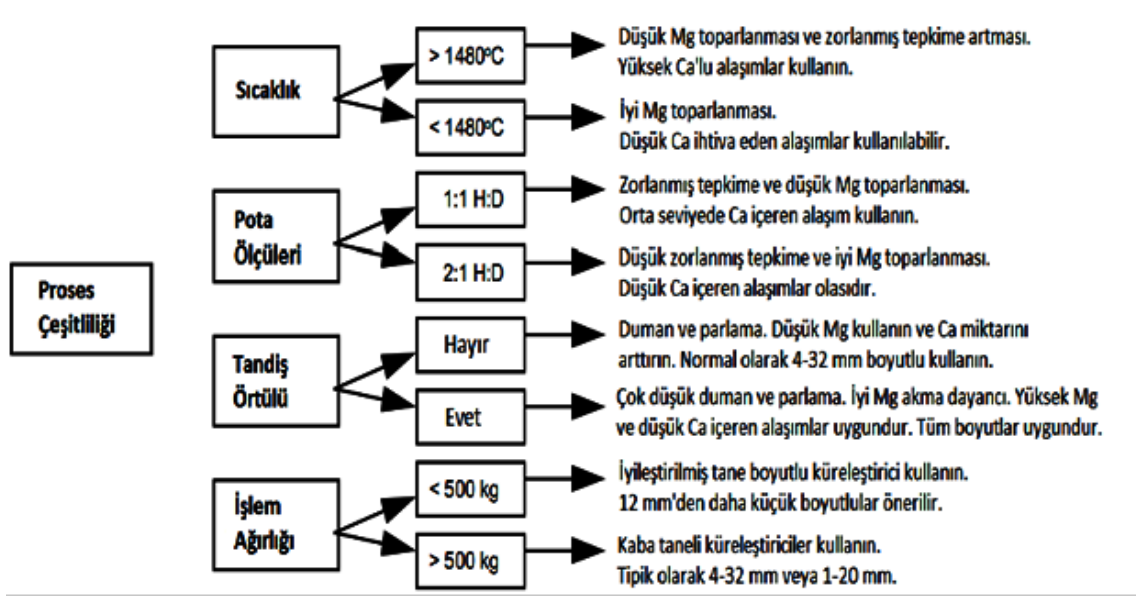
Uygun koşullar elde edildikten sonra küreselleştirme için Mg ilavesi işlemine geçilir.

Magnezyum, bir atmosfer basınçta 650 °C' de ergir ve 1120 °C' de buharlaşır. Sıvı demir sıcaklıklarında magnezyumun buhar basıncı, normal atmosfer basıncından 10 misli daha büyüktür. Buna ilaveten sıvı demir yüzeyi havaya açık olduğu zaman magnezyum yanarak kaybolur. Yüksek sıcaklıklarda (1450 °C' nin üzerinde) ilave magnezyum da kayıp çok olduğundan, sıvı demir sıcaklığının 1350 °C – 1450 °C arasında tutulması uygun olur.

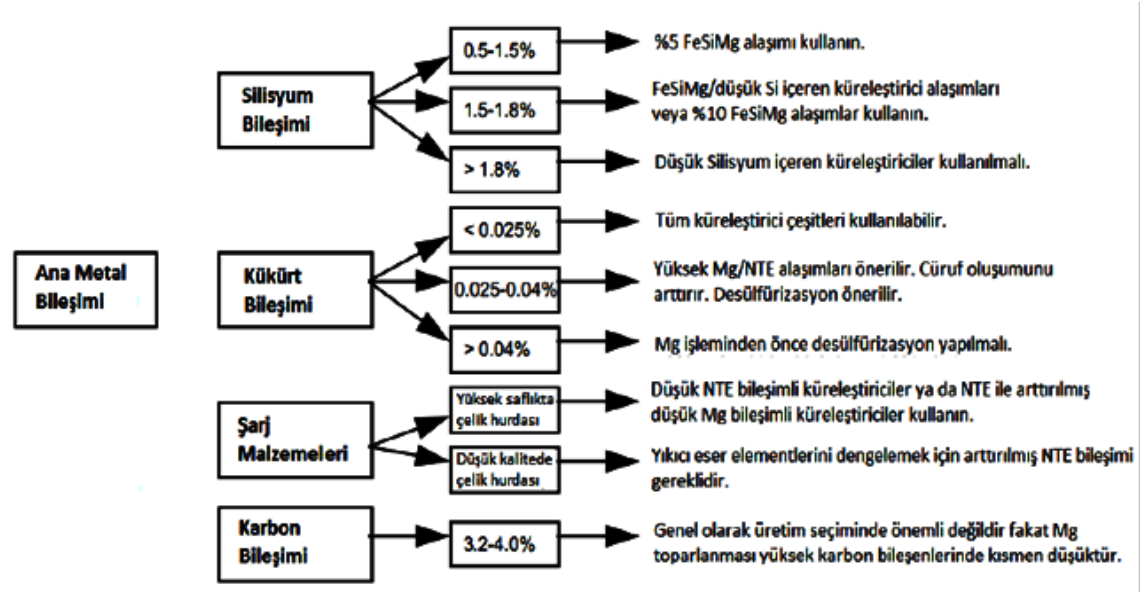
Bu şartlar altında, ilave magnezyumun az bir miktarının sıvı demir içerisine ilave edilmesi bir hayli zor olur. Geçmişte ekonomik ve emniyetli olduğu iddia edilen sayısız magnezyum ilave metotları oluşturulmuştur[25,45].

6.5.1 Küreselleştirici Seçimi

Dökümhaneler arasında kendi özel prosesleri için küreselleştirici seçimi konusunda yıllardır süregelen görüş ayrılıkları mevcuttur. Aşağıdaki iki diyagramda magnezyum ferrosilisyum alaşımı seçimini etkileyen önemli değişkenler verilmektedir. Diyagramlar sayesinde verilen proses ve ekipmanlar için doğru alaşım bileşimini belirleyebilirsiniz. Bir sonraki sayfada da kalıpta, akışa ve sandviç cep prosesleri gibi özel tretmanlarda kullanılacak alaşımlara ait öneriler yer almaktadır[46].



Şekil 6.14 Magnezyum Ferrosilisyum alaşımı seçimini etkileyen proses değişkenleri



Şekil 6.15 Sürekli Tretman için Küreselleştiriciler

Çizelge 16'da değişik tretman prosesleri için tipik MgFeSi alaşım spesifikasyonları yer almaktadır.

Çizelge 16 Değişik tretman prosesleri için tipik MgFeSi alaşım spesifikasyonları

Spesifikasyon	Treatman prosesi		
	Kalıpta	Akışa	
Silisyum	44-48%	44-48%	44-48%
Magnezyum	5.0-6.0%	2.8-3.5%	3.5-4.0%
Kalsiyum	0.4-0.6%	1.1-1.6%	1.3-1.8%
Alüminyum	0.8-1.2%	0.5-1.0%	0.5-1.0%
Lantan	0.25-0.40%		
RE		1.1-1.4%	1.1-1.4%
Tane Boyutu	1-4 mm	2-12 mm	2-12 mm

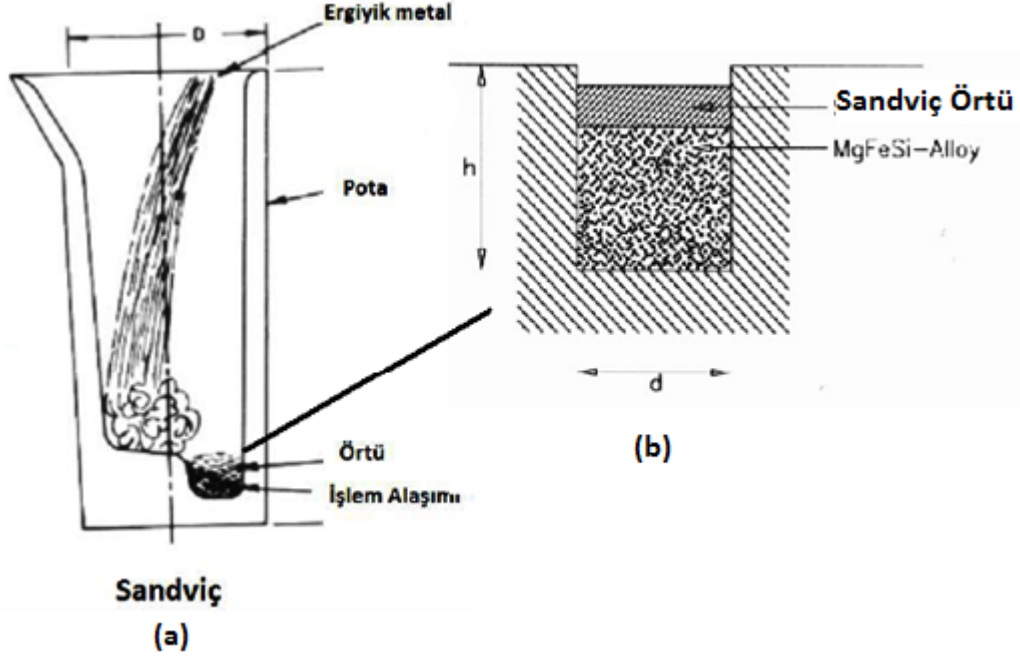
- ✓ Kalsiyum reaktiviteyi düşürmek ve optimum Mg verimi vermek için dahil edilmiştir.
- ✓ Düşük alüminyum seviyesi ile cürufa bağlı hataların oluşma eğilimi azalmaktadır.
- ✓ Verilenler tipik analizlerdir ve özel taleplere göre diğer alaşım bileşimleri de mevcuttur[46].

Küreleştirmede en yaygın olarak kullanılan yöntemler aşağıda kısaca belirtilmiştir:

6.5.1.1 Sandwich Pocket Prosesi

Küresel grafitli dökme demir dökümde oldukça sık kullanılan "Sandwich" prosesinde tretman boyutuna göre sınıfı dikkatlice seçilmiş magnezyum ferrosilisyum kullanılmalıdır. Buna rağmen bile magnezyum alanında, reaksiyon odacığında doldurma sürecinin başında ani gelişen patlamalardan dolayı değişimler gözlenebilir ki bu değişimleri tolere edebilmek için ciddi miktarlarda alaşım ilavesine ihtiyaç duyulur.

Elkem tarafından geliştirilen "Sandwich Pocket" prosesi, birçok dökümhane tarafından denenmiş ve normal "sandwich" prosesinde karşılaşılan birçok problemin minimum seviyeye indiği tespit edilmiştir. Aynı zamanda tretman boyutundaki geniş aralıklarda kullanılan ince taneli magnezyum ferrosilisyum alaşımının düşük miktarlarda kullanılmasıyla ekonomik avantajlar da elde edilmiştir[47].



Şekil 6.16 Alaşım ve kaplama malzemesiyle Sandviç prosesi.

Magnezyum alaşımı ve kaplama malzemesinin yerleştirildiği özel olarak dizayn edilmiş silindirik cep ile proses avantajları önemli şekilde artış göstermektedir. Cep Şekil 6.16 (a)'da gösterildiği gibi potanın tabanında oluşturulabilir ya da daha sık rastlanan haliyle Şekil 6.16(b)'de verildiği gibi taban çevresine kurulabilir. Bu son uygulama şeklinin tundish cover ile birlikte uygulanması özel dikkat gerektirir[47,48].

Silindirik pota yüksekliğinin çapına oranı en az 1:1 olmalıdır ve cep magnezyum alaşımı ve kaplama malzemesini alacak kadar geniş dizayn edilmelidir. Yüklemeden sonra pota taban seviyesinin üzerinde hiçbir şekilde malzeme bulunmamalıdır. Şekil 6.16 (a)'da alaşımın pota tabanına dökülmesini engelleyecek şekilde cebin çelik bir tüple (huni) doldurulma yöntemi gösterilmektedir. Cep, pota dolduruldukça tabanından ısı penetrasyonunu önlemek için kalın tabakalı refrakter ile çevrenmiştir. Cep Mg-alaşımını ve örtü malzemesini tamamen içine alacak büyüklükte olmalıdır.

İnce taneli alaşım kullanmanın tek özelliği cepte yüksek sıkıştırma yoğunluğuna sahip olmasıdır. Metalden gelen güçlü ısı cebin üzerinde kaplamaya sızacağından alaşım bir brikete doğru sinterlenme eğilimindedir ki böylece reaksiyon başladığında sinterlenmiş alaşıma doğru yavaşça ilerler. Bu sayede özellikle tundish cover ile birlikte

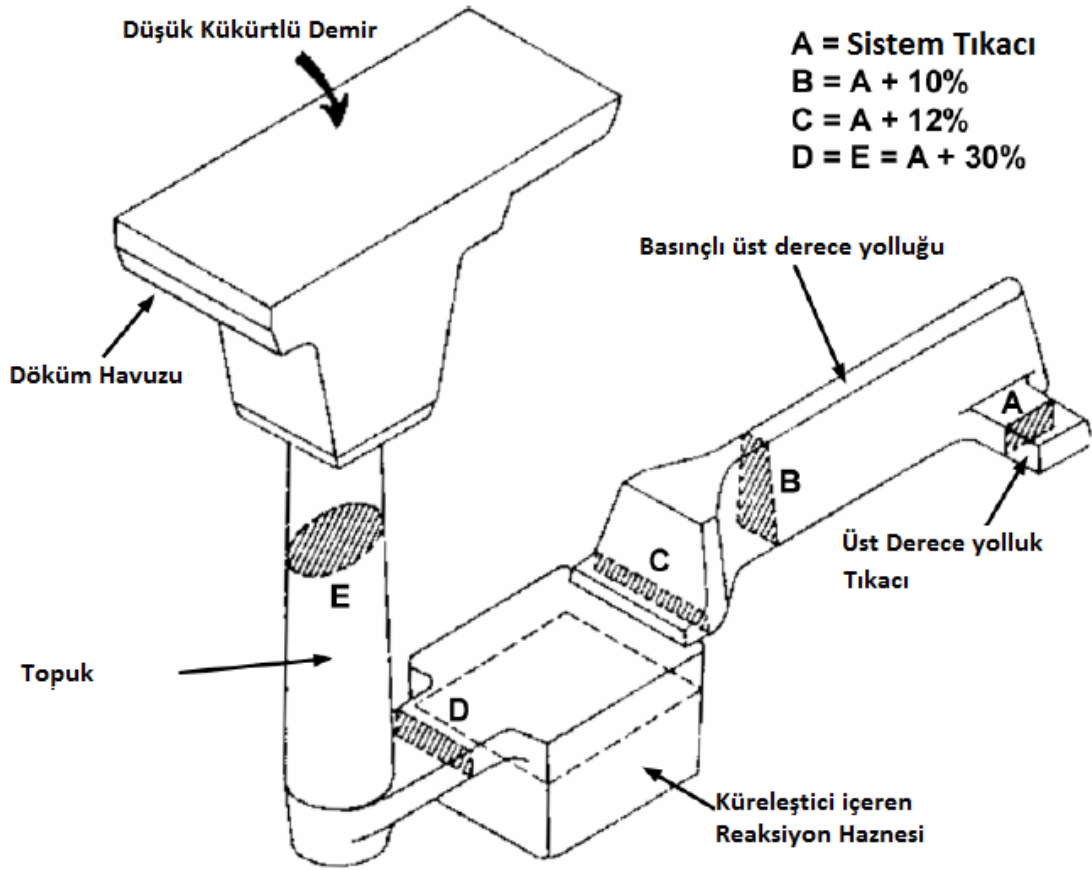
kullanıldığında proses kararlılığı, yüksek magnezyum verimi ve minimum duman ve toz emüsyonu elde edilir[47].

6.5.1.2 Kalıpta Küreselleştirme

Kalıpta küreselleştirme prosesinin amacı tretman görmemiş sıvı metali kalıba dökmek ve küresel grafitli dökme demirleştirme işlemini kalıbın içinde yapmaktır, böylece tek basamaklı bir işlemle küresel grafitli dökme demir döküm gerçekleştirilebilmektedir. Kalıbın içerisindeki yolluk sisteminde küreselleştirici MgFeSi alaşımı koymak için bir reaksiyon cebi oluşturulur. Tretman, model boşluğuna girmeden önce sıvı metalin reaksiyon cebi boyunca akmasıyla sürekli olarak devam eder. [48]

Çizelge 17 Sfero döküm kalıpta treatment prosesinin bazı avantaj ve dezavantajları.

Proses Avantajları	Proses Dezavantajları
• Daha az üretim evresi. • Düşük sermaye yatırımı. • Düşük maliyet. • Daha az sıcaklık kaybı. • Yüksek Mg verimi ile daha az küreselleştirici ilavesi. • Küreselleştirici etkisinin kaybı söz konusu değildir. • İlave aşılama gereksinimi yoktur. • Geç tretman aşırı soğuma ve karbür oluşumunu engeller. • Otomatik döküm işlemleri ile mükemmel kombinasyon. • Tretman görmüş sıvı metalin bekletilmesi gerekmediğinden, bekletme ve döküm ocaklarında cüruf problemleri azalır. • Duruşlardan sonra kısa sürede tekrar çalışılabilmesi. • Minimum çevre etkisi. • Cürufun uzaklaştırılması için herhangi bir işleme gerek yoktur...	• Numunede daha az alan. • Model plakası üzerinde döküm parçası için daha az yer. • Kalıpta potansiyel dros oluşumu. • Sürekli sabit döküm hızı gerekli. • Düşük sıvı metal kükürt oranı gerekli, max.% 0.015 • Dökümün farklı parçalarında yapılan magnezyum analizlerinde olası değişiklikler. • % 100 kalite denetimi genelde gerekli.



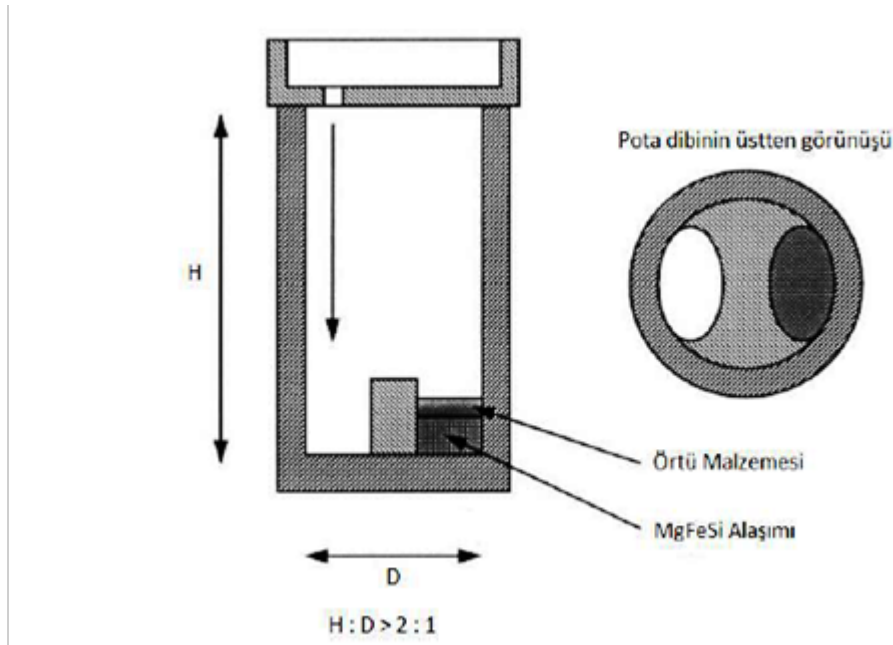
Şekil 6.17 Kalıpta magnezyum tretman proses çiziminin tipik örneği. Genel dizayn kuralları: A = sistem tıkacı, B = A+10%, C = A+12%, D = E = A+30%.

Şekil 6.17’de kalıp içerisinde uygulanan Mg treatmen prosesine ait genel bir örnek verilmiştir[48]. Döküm havuzuna gelen sıcak metal topukdan sonra küreselleştirici içeren hazneye gelerek kalıp katılaşmadan hemen önce küreseltirci ile işlem yapılarak yüksek küre sayısı eldesi hedeflenmektedir.

6.5.1.3 Tundish Potada Küreselleştirme

Küresel grafitli dökme demir dökümün çekirdeklenmesi için yapılan magnezyum tretmanı değişik yöntemlerle yapılabilir. Tundish pota prosesi ekseriyetle tüm koşullarda ekonomiklikle birlikte tatmin edici, verimli ve güvenlidir. Geniş çaplı işlem boyutlarında proses, istenen yoğunluğu ve yüksek verim sağlar. Diğer tüm ticari yöntemlerde operasyon ve bakım masraflarıyla karşılaştırıldığında, doğru uygulanan bir tundish sistemi %60-80 magnezyum verimiyle çok daha ekonomiktir. Tundish pota işleminde ayrıca küçük patlamalar ya da metal sıçratma görülmezken karbon ve ısı

kaybı da minimumdur (Duman çıkışı %90 azdır). Aşağıdaki şekilde tundish potası görülmektedir.



Şekil 6.18 Tundish örtülü potanın şematik görünümü

Doldurma Deliğinin Hesaplanması

Doldurulacak tundish potasının çapı aşağıdaki formülle hesaplanabilir:

$$d = 38 \sqrt{\frac{W}{t \cdot \sqrt{h}}}$$

Burada d milimetre (mm) cinsinden sıvı metalin potaya akış delik çapı, W kilogram (kg) olarak sıvı demirin ağırlığı, t saniye (s) olarak döküm zamanı ve h tundish havuzda metalin milimetre (mm) cinsinden ferostatik yüksekliğidir. Önemli: h metalin pota içerisindeki yüksekliğidir, potanın kendi yüksekliği değildir.

Formül, temel bir yaklaşımla çıkarılmıştır ve çap konusunda düşük bir tahmin vermektedir. Tundish potanın dolum süresini ve nem yüksekliği ile viskozite etkilerini kompanse etmek için çapı h yüksekliğe göre %10 oranında genişletmek uygun olacaktır.

Sülfür içeriği

Tundish potasının maksimum oranda verimliliğini sağlamak için sıvı metalin sülfür içeriğinin tretman öncesi tercihen % 0,02'yi geçmemesinde fayda vardır. Sülfür seviyesinin daha yüksek olması durumunda, küreselleştirme öncesi kükürt giderme işleminin uygulanması tavsiye edilmektedir[49].

Magnezyum Alaşımı Seçimi ve İlavesi

Tundish pota prosesinde % 3 ile 12 arasında magnezyum içeren hemen hemen bütün magnezyum ferrosilis alaşımları kullanılabilir; ancak genellikle % 4 ile 6 Mg içeren alaşımlar kullanılır.

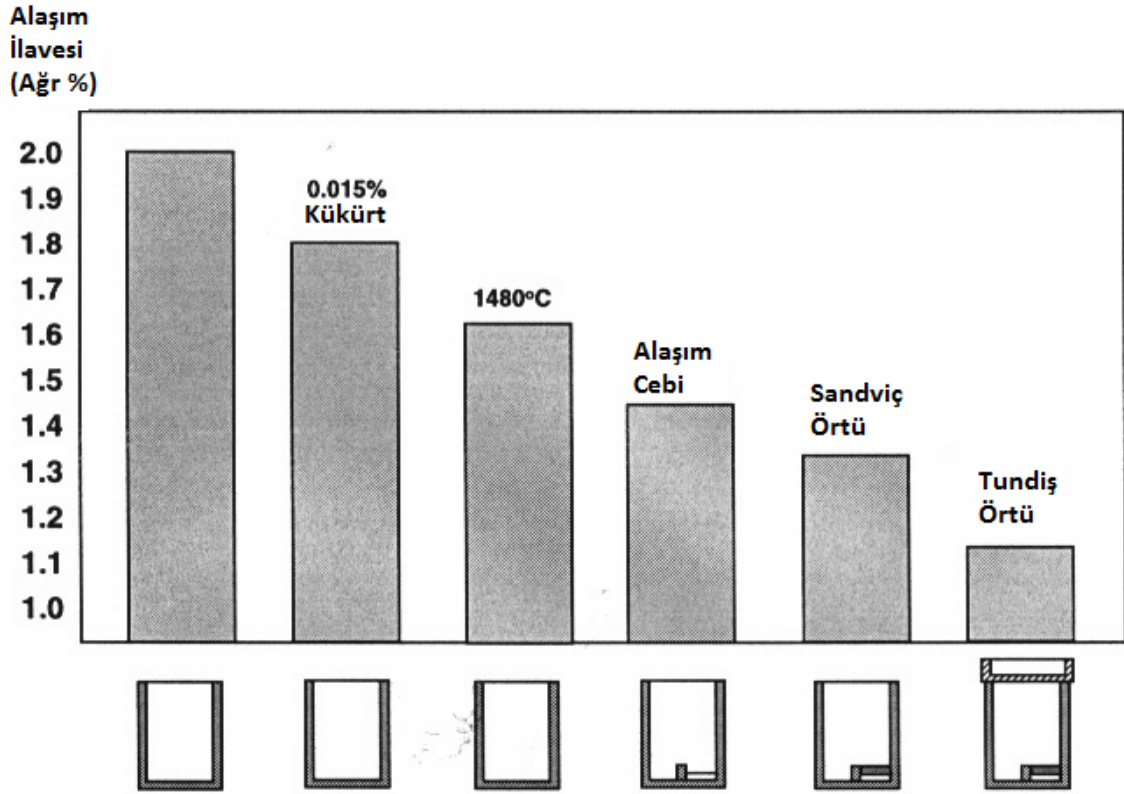
Element	Miktar
Si	45%
Mg	6%
Ca	1%
RE	1%
Al	max. 1%
Fe	Bakiye

Çizelgedeki gibi bir Mg-alaşımı çelik hurda, pik demir ve döndü içeren bir sıvı demirin tretmanı için kullanılabilir. Küçük muameleler için alaşım boyutu 1 ile 10 mm arasında uygunken, büyük muamelelerde 4 ile 35 mm'ye kadar olan alaşımlar tercih edilir.

Eklenecek alaşım miktarı, demirin kükürt içeriği, metal sıcaklığı, alaşımın magnezyum içeriği ve prosesin tekrarlanabilme sıklığına göre, ağırlık olarak %1.2 ile %1.8 arasında belirlenir[49].

Örtü Malzemesi Seçimi

Maksimum işlem verimi elde edebilmek için reaksiyon odacığında magnezyum alaşımının bir örtü malzemesi ile kapatılması önerilir. Örtü malzemesi, alaşımı reaksiyon başlamadan mümkün olduğu kadar uzun süre odacıkta sızdırmadan tutmalıdır. Örtü malzemesi genellikle temiz çelik levhalar ve ergitme şarjlarında kullanılanlara benzer kesme parçalarından oluşur. Dökme demir kapak levhaları dökümden arta kalan malzemeyle dökülmelidir. Bununla birlikte en iyi sonuçlar ferrosilis alaşımlarının örtü malzemesi olarak kullanıldığı durumlarda elde edilir[49].



Şekil 6.19 Sülfür içeriği, tretman sıcaklığı ve pota dizayn modifikasyonlarının bir fonksiyonu olarak verim artırmanın şematik sunumu.

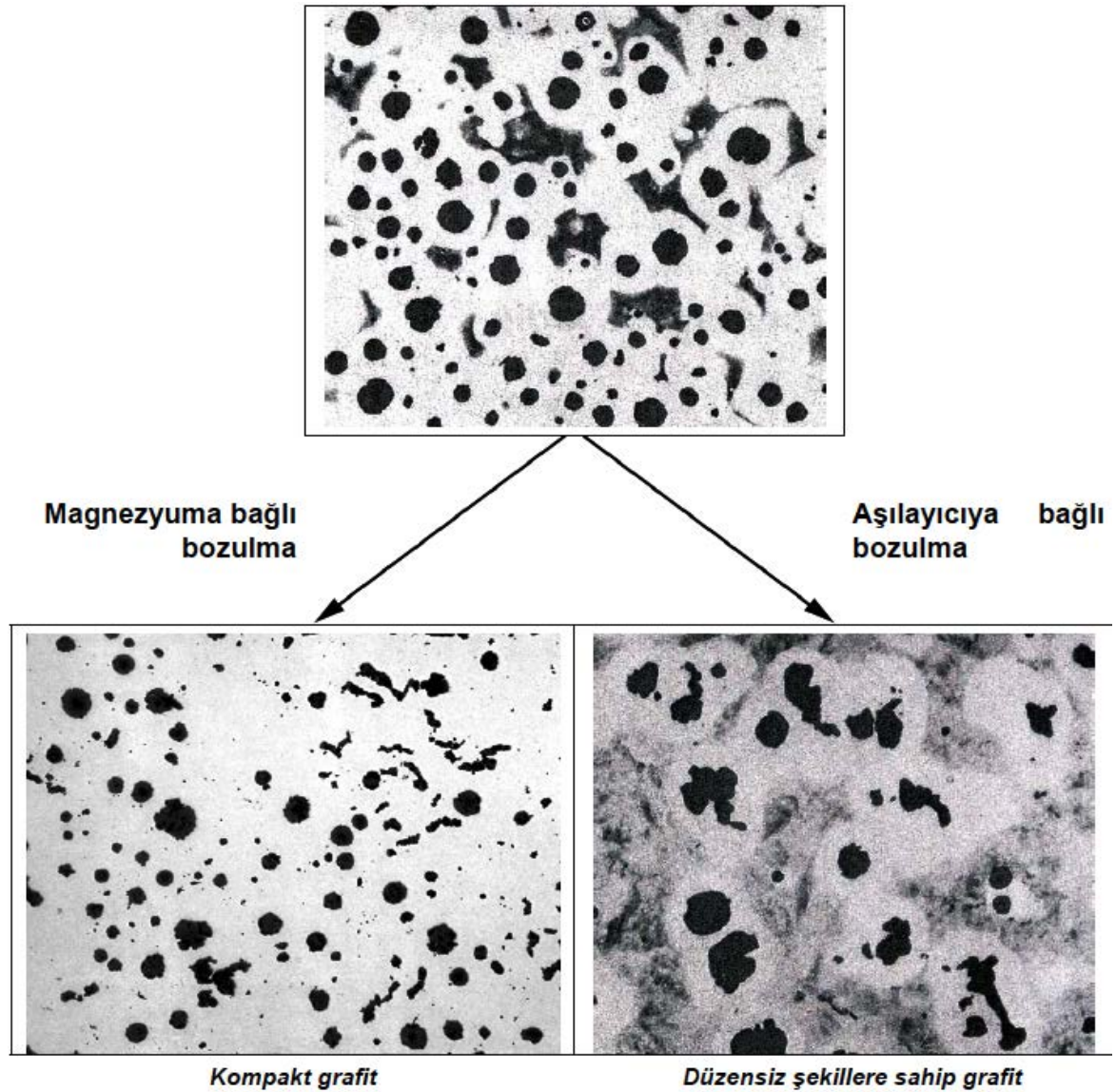
Verim Artırma Örneği:

Sülfür içeriği, tretman sıcaklığı ve pota dizayn modifikasyonlarının bir fonksiyonu olarak verim artırmanın şematik sunumu. Birinci örnekte yer alan % 2,0 aşılavıcı ilavesi oranı, % 0,03 S ve 1520°C tretman sıcaklığında uygulamayı temsil etmektedir[49].

6.5.2 Küreselleşmenin Bozulması

Küresel grafitli dökme demir dökümde uygun şekilde tretmana tabi tutulmuş ve aşılansmış parçalar uzun süre bekletilirse, grafitin nodül şeklinde bozulmalar görülmesi oldukça sık rastlanılan bir durumdur. Bu durum küreselleşmenin bozulması olarak adlandırılır. Bozulma nedeni iki olası sebebe dayanabilir: magnezyuma veya aşılamaya bağlı bozulma. Bu iki sebepten kaynaklanan küreselleşme bozulmalarına karşı alınabilecek tedbirler büyük farklılıklar gösterdiğinden, bozulmanın sebebini tam olarak belirlemek oldukça önemlidir. Aşağıdaki ilk metalografik resimde magnezyum tretmanı ve aşılamadan sonra iyi bir küresel grafitli dökme demir dökümde elde edilen parçanın

mikro yapısı gösterilmektedir. Diğer iki mikroyapı görüntüsünde ise bozulma mekanizmaları verilmektedir [50].



Şekil 6.20 KGDD’lerde Mg ve aşılama olarak mikro yapıdaki değişimler.

Şekil 6.20’de KGDD’de küreselleştirme ve aşılama sırasında yapılan hataların yol açtığı yapısal değişimler[50].

6.5.2.1 Magnezyum etkisinin azalması

Sıvı metalden magnezyumun çevreye (örneğin cüruf, refrakter, buharlaşma) verilerek kaybolmasıyla küreselleştirme etkisi azalır. Bu durum demirde tipik olarak kalıcı magnezyum miktarının kaybı ya da çevreden kükürt ya da oksijen alması durumunda

kalıcı magnezyumun aşamalı olarak tüketilmesi anlamına gelir. Yetersiz kalıcı magnezyum ile katılaşma kompakt ya da vermiküler grafit olarak adlandırılan zayıf kürelerin oluşmasına sebep olur. Bu durumun bir örneği soldaki mikro yapıda verilmiştir[50].

6.5.2.2 Aşılama etkisinin azalması

Aşı malzemesinin ilavesinden sonra sıvı metal uzun süre bekletilirse aşının etkisi hızlı bir şekilde azalmaya başlayacaktır. Aşı tipine ve ilave oranına bağlı olarak küresel grafitli dökme demir dökümde nodül sayısı hızlıca azalacak ve nodüller de küresel şeklini kaybedecektir. Sonuç olarak nodül sayısındaki düşüşle birlikte tipik düzensiz, başkalaşmış nodüller oluşacaktır. Sağdaki mikro yapıda bu durum gözlenmektedir.

Yetersiz ve kötü küreselleşme ortaya çıktığında hangi tip bozulma olduğunu net olarak belirlemek için dökümhane operatörünün eğitilmiş olması büyük önem taşır. Aşağıda her iki durum için belirtilen iyileştirmeler bazı hallerde birbirinin tam tersi olabilir.

Magnezyum etkisinin azalmasına karşı iyileştirmeler:

- ✓Daha fazla küreselleştirici ilavesiyle kalıcı magnezyum ve/veya RE miktarını arttırın.
- ✓Yüksek metal sıcaklıklarından ve uzun bekleme sürelerinden kaçının.
- ✓Daha saf şarj malzemeleri ve ilaveler kullanarak sıvı metalin kükürt seviyesini düşürün.
- ✓Demirin yeniden kükürdü bağlamasını önlemek için cüruf alma operasyonlarını iyileştirin.
- ✓Sıvı metalin havadan oksijen almasına engel olun.
- ✓Mg kayıplarını dengelemek için RE içeren bir geç aşılama uygulayın.

Aşılama etkisinin azalmasına karşı iyileştirmeler:

- ✓Daha etkili, daha uzun sürede etkisini yitiren bir aşı kullanın ya da daha fazla aşılama ilave edin.
- ✓Yüksek bekleme sıcaklıklarından ve uzun bekleme sürelerinden kaçının.
- ✓Güçlü, geç ilave edilen ikinci bir aşı kullanın.

Bazen düzensiz şekilli nodüller ve düşük nodül sayısı aşırı magnezyum veya kürselleştirici ilavesinin bir sonucu olabilir, örneğin daha düşük Mg ilave ederek kürselleşme iyileştirilebilir.

6.6 Ergitme ve Döküm

Ergitme ve döküm şartları çok sık değişim gösteren faktörlerin başında gelir. Tüm dökümhanelerdeki şartlar birbirinden farklıdır, bu nedenle hiçbir döküm aynı sonucu tekrar tekrar vermez. Dökümhanedeki tüm şartlar aynı olsa bile her dökümün sonucu benzerdir fakat aynı değildir.

Ergitme ve döküm içerisinde farklı parametreleri barındırmaktadır. Bunlar:

- ✓Ergitme yöntemi ve ocak seçimi
- ✓Hurda kalitesi
- ✓Hurda ve pik yüzdesi
- ✓Döküm süresi

Tüm bu parametrelerdeki en ufak bir değişim bile nihai ürünü önemli derecede etkilemeye yetecektir. Bu parametreleri özetleyecek olursak;

Hurda kalitesi, kaliteli bir ergiyik elde etmek için en önemli şarttır. Yüksek kalitede ergiyik döküm esnasında ve oluşan nihai üründe yüksek performans sağlar. Seçilen hurdaların özellikle içerisinde karbür oluşumunu arttıran elementleri içermemesine özen gösterilmelidir. Bunun dışında hurdaların kirli olmaması ve C ve Si içeriğinin istenen sınır değerlerine yakın olması gerekmektedir.

Ergitme yöntemi ve ocak seçimine gelince bunlar tamamen üreticinin kendi sorumluluğundadır. Bu nedenle bu konuya değinilmemiştir.

Hurda ve pik yüzdesi ise yaygın olarak %80-90 çelik hurdası kullanmaktadır ve kimyasal bileşimi ayarlamak için pik demir ilavesi yapılmaktadır. Bu işlemler sonrasında kimyasal analiz alınarak gerekli ilaveler belirlenmektedir.[51]

Döküm süresi ise tüm işlemlerin son basamağını oluşturmaktadır. Dökümün gerçekleştirilmesi için belirlenen maksimum süre 6 dakikadır. Bunun nedeni ise Mg

ilavesi ile başlayan kimyasal reaksiyonlar, çekirdeklerin ve kürelerin oluşumu için maksimum bekleme süresi 6 dakikadır. Bu aşamadan sonra hem Mg hızlı bir şekilde solmaya başlar hem de çekirdekler yüksek sıcaklıkta aşırı bekletilmesinden dolayı kaybolmaya başlar. Bu sürenin aşılması halinde dökme demirdeki mekanik özellikler beklenen ölçülerde çıkmaz. Dökümdeki küre sayısı standartların altında kalır ve çok düşük mekanik özelliklere sahiptir.

Tüm bu şartların kontrolü zordur fakat basit müdahalelerle düzeltilebilir. Tüm bu şartların nihai ürünü etkilediği düşünüldüğünde kontrolün hurda seçiminden itibaren başladığı görülmektedir.

6.7 Kesit Kalınlığı (Soğuma Hızı)

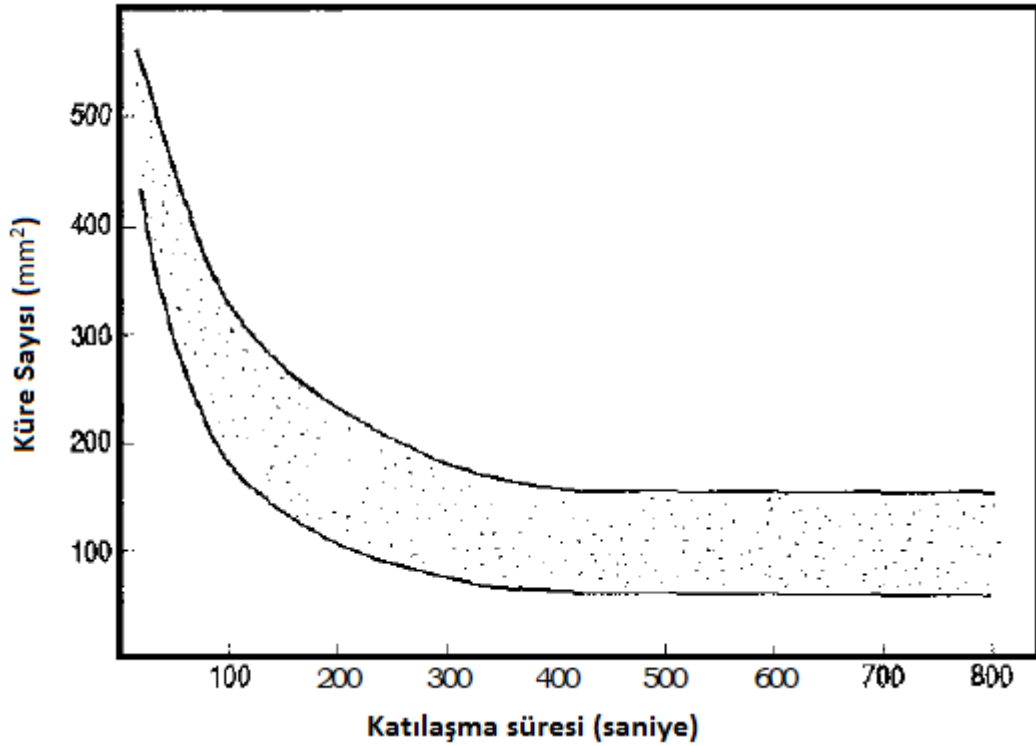
Dökme demirlerin mekanik özellikleri, dökülen parçanın kesit kalınlığından ve mikro yapısından etkilenir. Kesit kalınlığı temelde tamamen katılaşma hızını ve soğuma hızını etkilemektedir. Ağır kesitlerde, çok uzun katılaşma süreleri olduğu için Mg etkisinin yok olmasına sebep olabilir. Soğuma hızı ve katılaşma hızı, küre sayısını karbür oluşumunu ve ferrit ve perlit miktarını etkileyen en önemli parametredir. Geçmişte, mikro yapı ve mekanik özellikler üzerindeki etkisini doğrulamak ve değerlendirmek birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalar genellikle laboratuvarda gerçekleştirmiş ticari üretilen dökme demirlerde değildir. Buna rağmen biz incelemelerimizde mikro yapı dönüşümüne farklı kesit kalınlıklarındaki yakın soğuma hızlarının ve alaşım elementlerinin etkisinin genel manada ele alacağız[52].

Katılaşma süresi, katılaşan metalin termal özellikleri, döküm sıcaklığı, kalıp ısı tahliye hızı ve dökümün yüzey alanı ve hacminin bir fonksiyonudur. Katılaşma süresi hacim ve yüzey alanının oranına bağlıdır[52].

Katılaşma dış duvarlardan başlayarak merkeze doğru devam eder. İlk olarak dış köşeler hızlı bir şekilde katılaşır ve katılaşma kalıbın merkezine doğru ilerledikçe sıcaklığın kalıptan uzaklaştırılma hızı düşer ve sıcaklık orta seviyededir, bu da katılaşma hızının düşmesine sebep olur. Kalın kesitlerde kalıp yüksek sıcaklıklara ısıtılarak kalıbın merkezinden ısı transferi sağlanır, böylelikle katılaşma hızı düşürülür ve katılaşma esnasında ısı transferi sağlanır[52].

Küp ve küresel şekilli dökümler aynı hacim/yüzey alanı oranında düz ve silindirik şekillilerden daha hızlı katılaşır. Yüksek döküm sıcaklıklarında katılaşma uzun sürmektedir. Çünkü metal katılaşmaya başlamadan önce artık sıcaklığı düşürmek zorundadır. Kalıbın ortası yüksek sıcaklıktadır bu da sıcaklık transfer hızını düşürür.

Dökme demirlerin büyük kısmı ötektik katılaşmanın altına soğutulmadan önce, Soğuma hızı ile aşırı soğuma büyük bir miktarda artar, diğer tüm metalürjik faktörler sabit tutulur. Aşırı soğuma sıcaklığı ötetikten düşük olduğunda dökme demirde karbürlerde çil eğilimi olur. Geç aşılama bu çil formuna geçiş eğilimini azaltır. Çekirdeklenmenin artması ile aşırı soğumada artar buda eğer karbür oluşumunu engellerse küre sayısının artmasına neden olur. Şekil 6.21’de katılaşma hızıyla küre sayısı arasındaki ilişki gösterilmektedir[52].



Şekil 6.21 Katılaşma hızı(süresi) ile mm²'deki küre sayısının değişimi

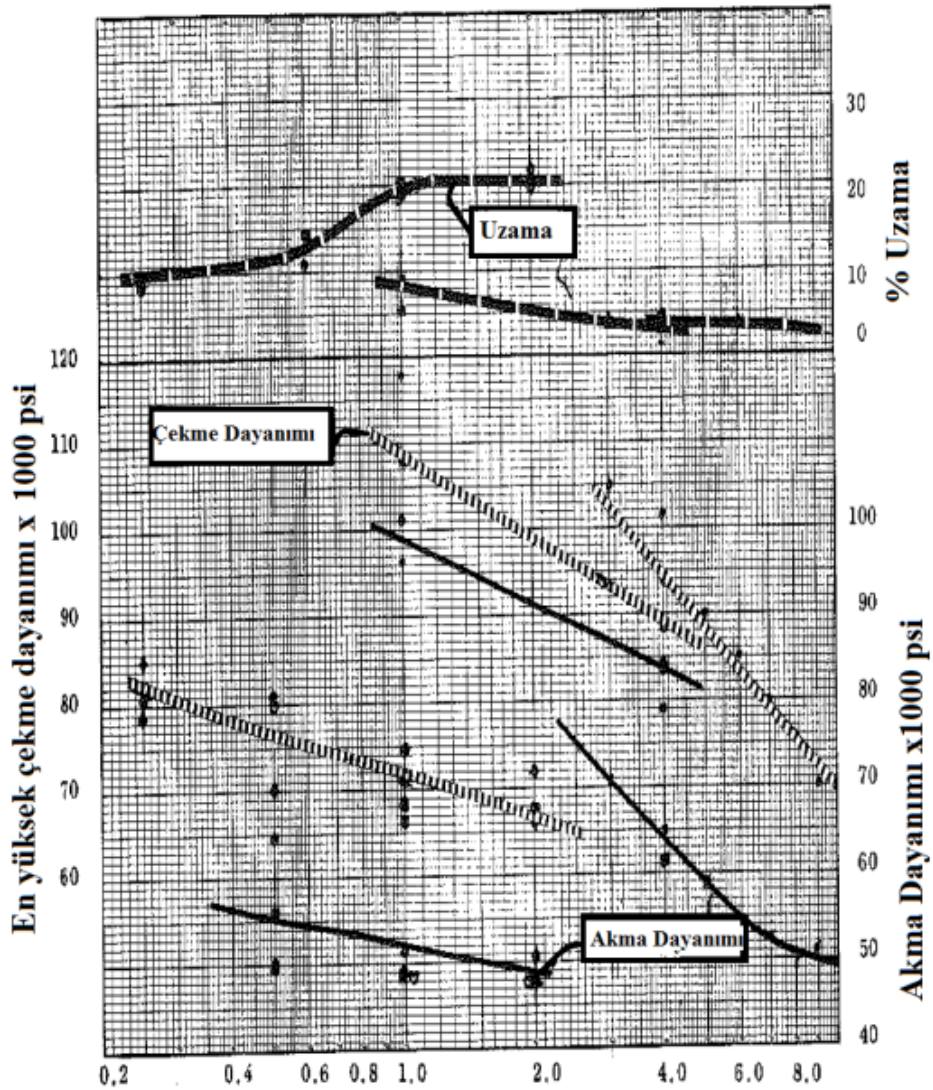
6.7.1.1 Kesit Kalınlığının Mekanik Özelliklere Etkisi

Mekanik özellikler, döküm kesitinin değişmesiyle birlikte mikro yapıya bağlı olarak değişir. İnce kesitlerde katılaşma hızlı olduğundan küre sayısı fazla olur. Aşırı soğuma

belirgin hale gelirse, kenarlarda çil karbür oluşur. Karbürlerin varlığı uzamayı düşürür ve sertliği artırır. Fakat geç aşılamanın etkisiyle ince kesitlerde bu minimize edilebilir.

Mekanik özellikler kesit kalınlığını da göz önüne alarak alaşım elementlerinden de etkilenir. Perlit artırıcı bir element küçük bir miktarda bulunduğunda, öncelikli olarak yapı ferritikdir. Yüksek Si seviyeleri ferrit dönüşümünü desteklemektedir. Cu, Mn Tin.. gibi elementler ise perlit arttırarak dökümün mukavemetini arttır

Kalın kesitli dökümlerde, Cu perlit ve sertliği attırmada yeterli değildir. Bakıra ek olarak yüksek oranda perlite ulaşmak için küçük miktarda Tin ilave edilebilir. Farklı kesitlerde dökümler arasında soğuma hızlarında büyük farklılıklar olduğunda Tin avantaj sağlayabilir. Buna rağmen (0.08%) üzerine çıkması tavsiye edilmez, çünkü patlak grafitlere neden olmaktadır[52].

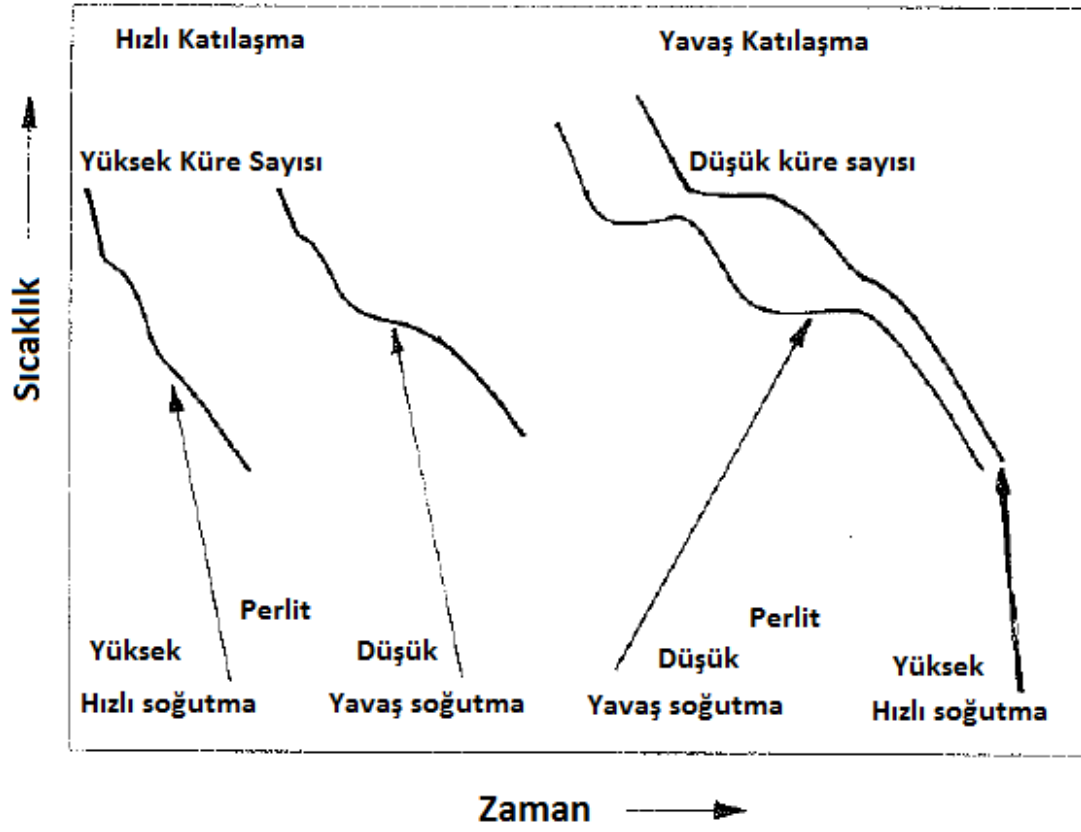


Şekil 6.22 Mekanik özelliklerle kesit kalınlığı arasındaki ilişki.

Şekil 6.22’de mekanik özelliklerle kesit kalınlığı arasındaki ilişki gösterilmektedir. Buradaki bilgiler farklı kaynaklardan alınarak hazırlandı. Şekilde görüldüğü gibi genellikle dökümlerde, çekme ve akma dayanımı artan kesit kalınlığı ile birlikte düşmektedir. Uzama kesit kalınlığının artmasıyla birlikte 2 inç kadar artmış ve daha sonra giderek azalmıştır[52].

Döküm şartlarında, artan kesit kalınlığıyla birlikte, düşen soğuma hızının bir sonucu olarak ferrit miktarı artmıştır. Buda özelliklerinde çeşitliği beraberinde getirir. Kalın kesitlerde, düşük soğuma hızı ferritik matriks, düşük mukavemet ve yüksek uzama sağlar. Segregasyon elementleri Mn,Cr,Mo gibi elementlerin varlığı, düşük katılma hızı segregasyon etkisini arttırdığından dolayı daha az tane sınırı ve hücre sınırlarında karbüre sebebiyet verir. Bu karbürler yapının büyük bir çoğunluğunun ferritik olmasına rağmen uzama miktarını düşürür. Malzemenin ömrü tane sınırlarında karbür olduğunda azalır. Bundan dolayı, Mn perlit oluşturuca olarak genellikle kullanılmaz. Artan küre sayısı ile birlikte (en az 100 küre/mm²) segregasyon etkisi minimize edilmiş olur.

Artan kesit kalınlığıyla birlikte feritik ve perlitik dökümlerde düşük mukavemet eğilimi vardır. Bu farklılıklar ferritikler dökümler için tavlama perlitik dökümler için normalizasyon ile minimize edilebilir. Şekil 6.23’de 0.8%Cu ve 1 %Ni içeren 6 inç kadar kesiti olan dökme demirin çeşitli özellikleri gösterilmektedir. Hatta önemli miktarda (Cu, Ni, Mo ve Mn kombinasyonları)alaşım elementleri ilave karşın tamamen perlitik bir yapı kalın kesitlerde elde edilememiştir[52].



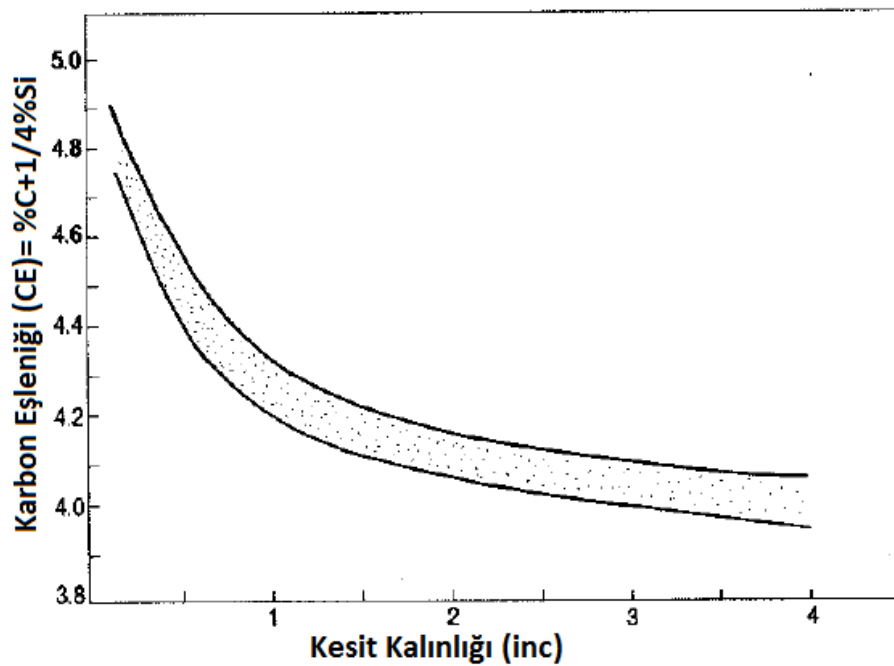
Şekil 6.23 Dökme demirin soğuma eğrisi sistematığı

Kesit kalınlığı arttıkça küre sayısı düşmekte, tane sınırlarında segregasyon artmasıyla yorulma dayanımı sınırların altına düşer. Yorulma özelliklerinde ki bu düşüş çekme özelliklerindekiinden daha belirgindir[52].

6.7.1.2 Kesit Kalınlığı İle Kimyasal Bileşimin Etkileşimleri

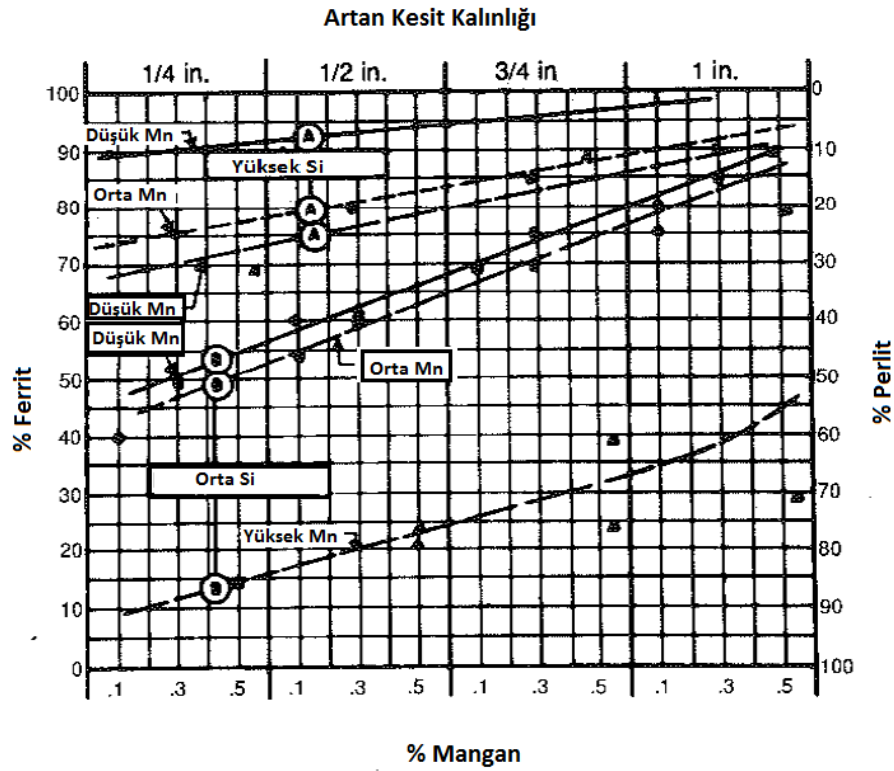
Kesit kalınlığı yapıyı etkileyen temel faktörlerin başında gelmektedir. Diğer parametrelerle birleştğinde bu etki değişim kaçınılmaz hale gelmektedir. Özellikle kimyasal bileşiminde etkisiyle hem yapı hem de mekanik özellikler çok fazla değişim göstermektedir.

Karbon eşleniği üretimi yapılacak parça için büyük önem arz etmektedir. Bu nedenle ergiyik halinde iken sürekli kontrol edilir ve döküm parçasının boyutlarına göre hesaplanarak istenen değere çekilir. Bu değişim şekil 6.24’de gösterilmektedir.



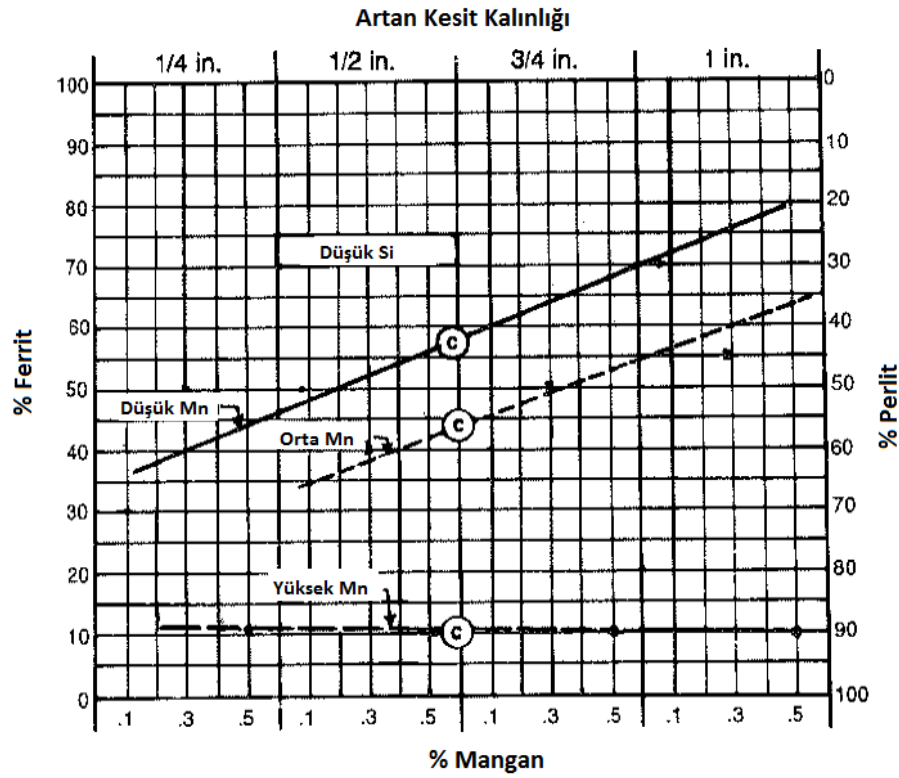
Şekil 6.24 Farklı kesit kalınlıkları için tavsiye edilen (CE).

Hedeflenen mekanik özellikleri elde etmede ferrit-perlit yüzdesi, küre sayısı gibi temel faktörler bulunmaktadır. Bunlardan ferrit-perlit yüzdesini belirleyen ana elementler ve soğuma hızıdır. Özellikle Mn ve Si bu yüzdeyi etkileyen temel elementlerdir. Bu konuda yapılmış olan çalışmalarda artan kesit kalınlığı ile birlikte elementlerin miktarlarının yapıyı nasıl etkilediği şekil 6.25’de açıkça gösterilmektedir.



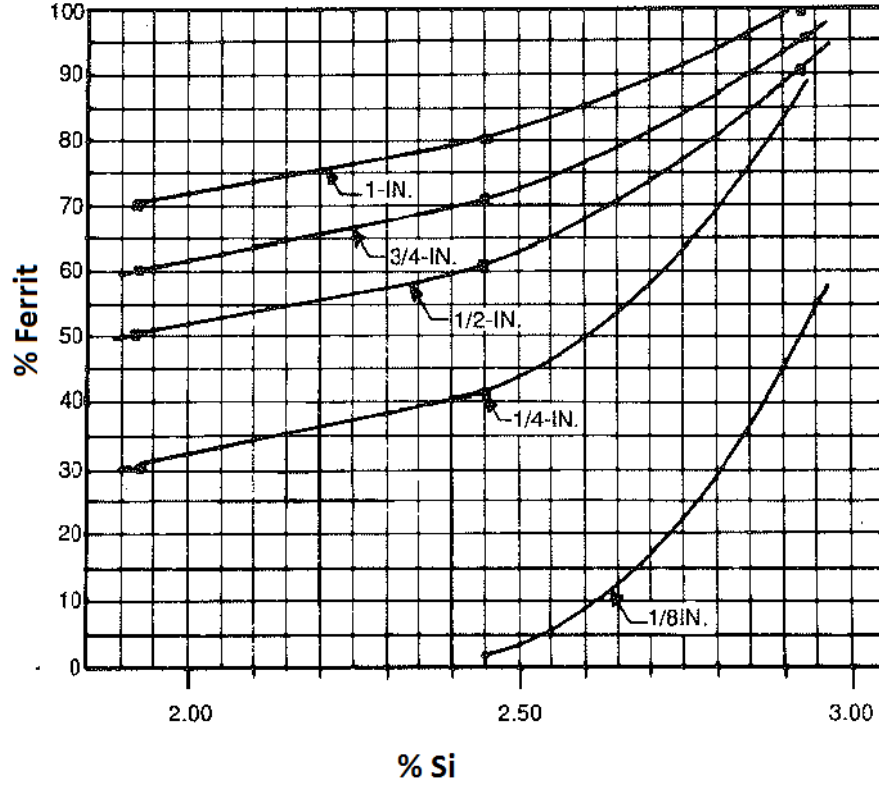
Şekil 6.25 Farklı kesit kalınlıklarındaki dökme demirlerde Si ve Mn Ferrit/perlit bileşimine etkisi

Atan kesit kalınlığı ile birlikte çeşitli seviyelerde Mn ve Si içeren dökümlerin Ferrit ve Perlit oluşumları Şekil 6.25’da verilmiştir. Ferrit miktarı sünek bir yapıyı beraberinde getirirken perlitik ise daha serttir. Elde edilmek istenen ferrit ve perlit miktarlarına göre grafikten bu iki ana elementin teorik sınırları bulunabilir. Burada Mn miktarının artması perlitik yapıyı arttırmakta, Si ise ferritik yapıyı arttırmaktadır.



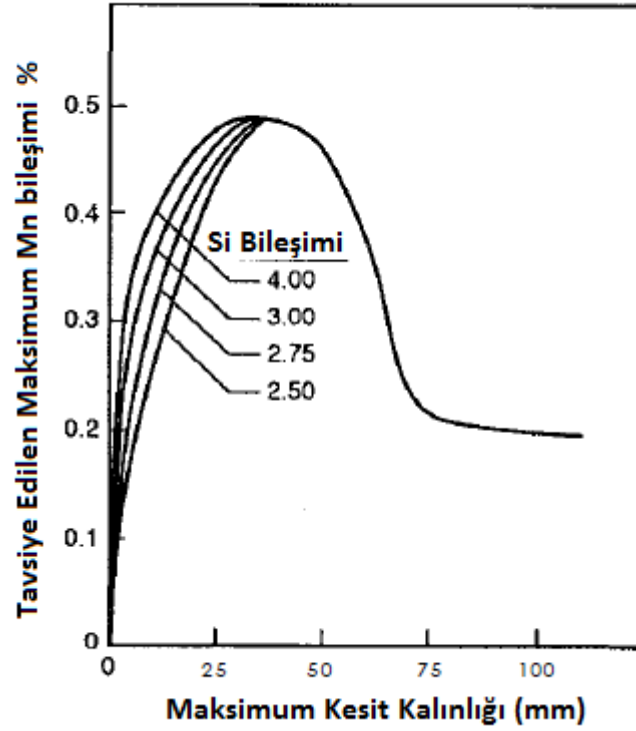
Şekil 6.26 Artan kesit kalınlığı ile birlikte çeşitli seviyelerdeki Mn ve düşük seviyede Si içeren dökme demirlerin ferrit ve perlit değişimleri

Şekil 6.26'deki artan kesit kalınlığı ile birlikte çeşitli seviyelerdeki Mn ve düşük seviyede Si içeren dökme demirlerin ferrit ve perlit değişimlerini gösterilmektedir. Burada dikkat çeken bir husus da yüksek Mn içeriğinin perlitik ve kararlı bir yapıda olduğu göze çarpmaktadır. Yani yüksek Mn içeriği yüksek perlit miktarı oluşumu sağlamaktadır. Bu perlitik yapı kesit kalınlığı ile değişimi ihmal edilecek kadar az olduğu için değişim göstermemektedir demek daha doğru olacaktır.



Şekil 6.27 Düşük Mn(0,08-0,09) içeren Dökme demirlerde kesit kalınlığı ile Si içeriğinin ferrit % olan etkisi

Düşük seviyede Mn içeren dökme demirde % ferrit miktarının değişimi şekil 6.27’de görülmektedir. Kesit kalınlığının artmasıyla % ferrit miktarı da artmaktadır. Bu nedenle kalın kesitli dökümlerde Si oranı 2,00 nin üzerinde olmalıdır.



Şekil 6.28 Çeşitli bileşimlerde Si ve tavsiye edilen Mn miktarı ile kesit kalınlığı arasındaki ilişki.

Şekil 6.28’da görüldüğü gibi kesit kalınlığı 50 mm geçtikten sonra Si içeriğinin bir önemi kalmamaktadır. Bu değerden sonra hangi Si değere sahip olursa olsun tavsiye edilen Mn miktarı aynıdır.

6.7.1.3 Kalın Kesitlerin Dökümü

Daha öncede bahsettiğimiz gibi kalın kesitli dökümlerde katılaşma yavaş olduğundan dolayı küre sayısı da düşüktür. Az küre sayısı ve az taneler tane sınırlarında ki segregasyon çok fazla olur. Bu elementler de perlit ve karbür arttırıcı olduğundan, hücre sınırlarında yer alan kararlı karbürler ve kalıntı perlit oluşacaktır. Bu ise kalın kesitlerde sünekliği düşürecektir. Bu nedenle, segregasyonu arttıran tüm elementler çok düşük seviyede kontrollü tutularak maksimum süneklik sağlanmalıdır.

Seryum (Ce) kalın kesitlerde patlamış grafiti arttırdığı biliniyor. Ce ve serbest Mg alaşımları yada saf Mg işlemi kalın kesitlerin dökümlerin üretiminde kesinlikle bulunmalıdır. Karbon eşleniği (CE) kontrolü de çok önemlidir, yavaş katılaşma karbon yüzdürmesini artırır. Karbon flotasyonu flotasyonun meydana geldiği bölgelerde

mekanik için zararlıdır. Kalın kesitli dökümler için ya ötektik yada biraz ötektik altı bileşimler tercih edilir.

Ara kesitlerin üretiminde büyük besleyiciler kullanıldığında, karbon yüzdürmesi besleyicilerde meydana gelir. Mg kalıntıları, farklı grafit oluşumunu ve patlamış grafit şeklini önlediği için kalın kesitler için yüksek seviyede (0.045-0.055%) bulunmalıdır. Küre sayısı daha düşük olma eğiliminde olacağından, geç ve etkin aşılama kalın kesitli dökümler için çok önemlidir. Yüksek küre sayısı ile, yavaş soğumadan kaynaklanan bir çok problem minimize edilmiş olur.

Demirin karbon eşleniği dökümün yapılan baskın olan kesit kalınlığına göre seçilmiş olmalıdır. Kalın kesitlerde poroziteyi minimize etmek için Si miktarı 2,25'e kadar olmalıdır. Düşük Si ile perlitli kararlı hale getirmek daha basittir. Hatta düşük Si ile perlit arttırıcı elementler kombinasyonu döküm şartlarında perlit miktarını yükseltmek için kullanılır.

Kalın kesitli dökümleri üretmek için, katılaşma süreleri saatin periyodları şeklinde daha da uzatılabilir, kalıp içerisinde bir ek soğutma patlak grafit oluşumunu engeller ve iyi bir küre sayısı sağlar.

7.1 Üretim Prosesi

Küresel grafitli dökme demirlerde yüksek süneklik, %90 üzerinde ferrit, yüksek uzama/yüksek darbe özelliklerine ulaşabilmek için şarj malzemeleri, ergitme işlemi, magnezyum işlemi, aşılama, döküm sıcaklığı ve döküm, kalıplama ve kalıp bozma parametrelerini sıkı bir şekilde kontrol altında tutmak gerekir.

Üretimin gerçekleştirildiği İğrek Makine A.Ş’de deney numuneleri ve prototip döküm için gerekli şartlar belirlenmiştir. Şarj malzemesi olarak yüksek kalitedeki çelik hurdası, ferritik küresel grafitli dökme demir dönüş hurdaları kullanılmıştır. Ergitme işlemi yüksek ergiyik kalitesi ve çekirdeklenme için 1500°C’de çok az bekleme süresi gerektiren bir ergitme prosesi uygulanmıştır.

Üretimde aşılama iki aşamalı uygulanmıştır; Potada ve kalıp ağzında akışa aşılama yapılmıştır. Magnezyum işlemi ise sandwich pota yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Yüksek küre sayısını sağlamak ve porozite oluşumundan kaçınmak için aşılama, %0.3 oranında barinoc aşılama döküm potasına transfer esnasında, %0.1 oranında ultaseed aşılama son aşamada kalıp ağzında eklenmektedir.

Şekli değişmeyen iyi sıkıştırılmış kalıplar, hatasız kalın kesitli dökümlerin üretimi için çok önemlidir. Yüksek yüzey kalitesi gerektiren küresel grafitli dökme demir döküm parçaları ve özellikle rüzgar türbin göbekleri için geliştirilmiş düşük kükürtlü yeni bağlayıcı ve katalizörler kullanılarak hazırlanmıştır.

Kalıpta soğuma zamanı perlit oluşumundan kaçınmak için önemlidir. Bu nedenle kalıp bozma işlemi yeterince geç yapılmalıdır. Bu şekilde soğuma hızının düşük olmasından dolayı ferrit oluşumu artmış olacaktır.

7.2 Kimyasal Bileşim

Dökülen parçanın kimyasal bileşimi Tablo 1’ de verilmiştir.

Çizelge 18 Dökümün Kimyasal Bileşimi

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Mg
% Bileşim	3,50	1,89	0,145	0,02	0,01	0,04	0,03	0,04

Tavsiye edilen kimyasal bileşim, birçok bilimsel çalışmanın ışığında hazırlanmıştır. ASTM A536-84 standartlarındaki tavsiye edilen kimyasal bileşim aşağıda verilmiştir. Döküm parçasının kesit kalınlığı standartlarda kullanılan numunelere oranla daha büyük olduğu için farklı bir reçete hazırlanarak dökümün gerçekleştirilmesi tavsiye edilmiştir. Tavsiye edilen kimyasal bileşim çizelge 19’da verilmiştir.

Çizelge 19 Kimyasal Analizler

ASTM A536-84 Standardı		Tavsiye edilen kimyasal analiz		
Kimyasal Bileşim	60-40-18	Kimyasal Bileşim	Min. %	Maks.%
C	3.50-3.90	C	3,30	3,60
Si	2.20-3.00	Si	2,00	2,30
Mn	0.3 Max	Mn	0,05	0,15
P	0.05 Max	P	0,00	0,03
S	0.015 Max	S	0,005	0,02
Ni	0	%CE	3,9	4,3
Cu	0			

7.3 Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi

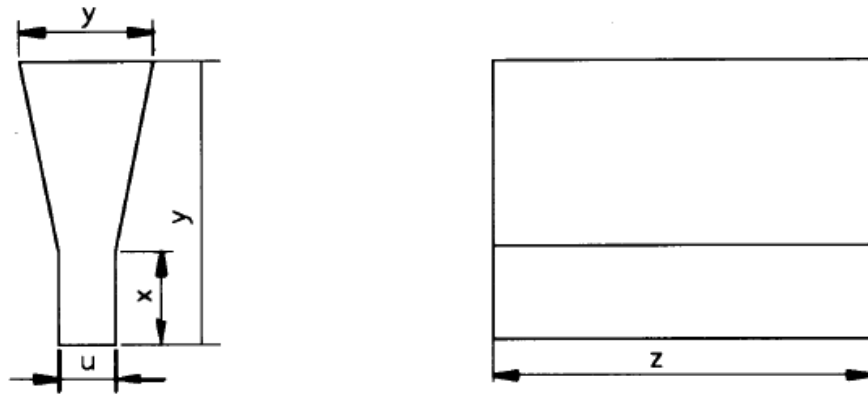
Bu bölümde Rüzgar türbini pervane göbeği üretimi için gerçekleştirilen deneysel çalışmalara yer verilmiştir. Rüzgar türbini pervane göbeğinin üretimi yüksek maliyet

gerektirmektedir. Bu nedenle metalürjik olarak değişkenlerin belirlenmesi ve bu değişkenlerin optimizasyonu için numunelerin temin edilmesi gerekmektedir.

Türbin göbeğinin üretimi için prototip numunelerin dökülmesine karar verilmiştir. Bu döküm işlemi yapılırken TSE, ASTM ve DIN standartlarının belirlediği numune elde etme yöntemi olarak ayırık ya da bitişik olarak standart boyutlarda 'Y' blok dökülmelidir.

Numunelerin hazırlanması ve deneysel verilerin elde edilmesinde TS 526 EN 1563 ve ASTM A536 – 84 numaralı standartlar esas alınmıştır.

Bu standart, küresel grafitli dökme demirin kalite ve özelliklerini kapsar.



Ölçüler mm'dir.

Boyut ¹⁾	Çekme Deneyi Numune Tipleri İçin Boyutlar			
	I	II	III	IV
u	12,5	25	50	75
v	40	55	100	125
x	25	40	50	65
y ¹⁾	135	140	150	175
z ²⁾	Deney parçası uzunluğunun bir fonksiyonudur.			

1) Bilgi için verilmistir.

2) Sekil 5'te gösterilen islenecek deney numunesinin z boyutu çekme deney parçası için yeterli büyüklükte olmalıdır.

Şekil 7.1 TS 526 EN 1563 standardına göre ayrı dökülmüş Y blok.

Deney numunesinin TS 526 EN 1563 standartlarına uygun ölçülerde hazırlanmasına özen gösterilmiş ve tüm talimatlar harfiyen uygulanmıştır. Burada seçilen numunelerden III numaralı boyutlara sahip olan tercih edilmiştir.

Dökümün ardından 'Y' bloktan standartlara uygun çekme ve çentik darbe numunesi hazırlanmıştır.

Dökümü gerçekleştirilmiş olan numunelerden beklenen mekanik özellikler ve mikro yapı görüntüleri belirlenen standartlara uygun olmalıdır. Mekanik özellikler Çizelge 20’de belirtildiği gibi olmalıdır. Çentik deneyi için ise şartlar ve özellikler Çizelge 21’de ki gibi olmalıdır.

Çizelge 20 TS 526 EN 1563 Standardına göre ayrı dökülmüş numunelerden çıkarılan deney parçalarının üzerinde olması gereken mekanik özellikler.

Kısa Gösterilis	Malzeme No	Çekme Dayanımı R_m N/mm^2 min.	%0,2 Akma Siniri $R_{p0,2}$ N/mm^2 min.	Kopma Uzunluğu % A Min
EN-GJS-400-18 LT ¹⁾	EN-JS 1025	400	240	18
EN-GJS-400-18 RT ²⁾	EN-JS 1024	400	250	18
1) LT düşük sıcaklıkta 2) RT oda sıcaklığında NOT 1 - Bu malzeme değerleri kum döküm için verilmiştir. Önceden belirtildiğinde değiştirilebilir. İstendiginde değişik metotlarla dökülen malzemelere de uygulanabilir. NOT 2 - Döküm metoduna bakılmaksızın malzeme değerlerinin karşılaştırılmasında ayrı dökülmüş deney parçaları mekanik özelliklerinin değerleri esas alınmıştır. NOT 3 - $1 N/mm^2 = 1 MPa$ NOT 4 - Malzeme kısa gösterilişi TS EN 1560’a uygundur.				

Çizelge 21 TS 526 EN 1563 Standardına göre ayrı dökülmüş numunelerden çıkarılan v-çentikli deney parçalarının olması gereken minimum vurma dayanım değerleri.

Kısa Gösterilis	Malzeme No.	V Çentikli Deney Numunelerinde Ölçülen Minimum Vurma (Joule)					
		23 ± 5°C ortam sıcaklığında		- 20 ± 2°C’da		- 40 ± 2°C’da	
		3 deney ortalaması	Bir deney	3 deney ortalaması	Bir deney	Uç deney ortalaması	Bir deney
EN-GJS-400-18 LT ¹⁾	EN-GJS 1025	-	-	12	9	-	-
EN-GJS-400-18 RT ²⁾	EN-GJS 1024	14	11	-	-	-	-
1) LT = Düşük sıcaklıkta 2) RT = Oda sıcaklığında NOT 1 - Bu değerler kum döküm için verilmiştir. Önceden belirtildiğinde değiştirilebilir. İstendiginde değişik metotlarla dökülen malzemelere de uygulanabilir. NOT 2 - Döküm metoduna bakılmaksızın malzeme değerlerinin karşılaştırılmasında ayrı dökülmüş deney parçalarının mekanik özelliklerinin değerleri esas alınmıştır.							

7.3.1 Çekme Deneyi

Ayrı dökülmüş Y Bloğun 3. Tipinden (kesit kalınlığı 50mm) elde edilmiş çekme numunelerinin mekanik özellikleri aşağıdaki tablo 22’de verilmiştir. Çekme eğrisi ve verileri Şekil 7.3’de verilmiştir.

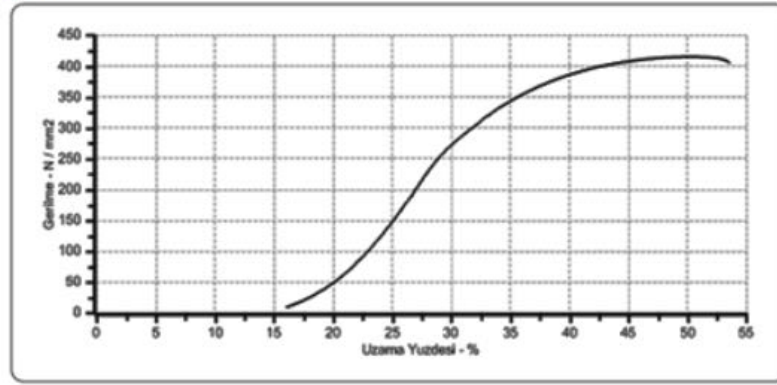
Tablo 22 Çekme deneyi sonucunda elde edilen mekanik özellikler.

Numune No	Çap (mm)	% Akma Dayanımı (MPa)	%Çekme Dayanımı (MPa)	Uzama (%)
1	10.04	238,47	399,73	18,5
2	10.05	271,57	415,25	16
3	10.03	260,84	400,15	20,14
Ortalama	10.04	256,96	405,04	18,21



Şekil 7.2 Mohr-Federhaff Universal çekme-basma makinesi

GRAFİK



SONUÇLAR

Numune No	Kesit Alanı - mm ²	L0 Boyu - mm	L1 Boyu - mm	ReH Nmm ²	Rm / Re	Rm Nmm ²
	79.3273635	50	76.78	269.08	1.53	415.25
Rp0.1 Nmm ²	Re Nmm ²	Rp0.2 Nmm ²	Rp0.4 Nmm ²	Rp0.5 Nmm ²	Fm kN	Uzama %
269.38	271.57	273.16	275.42	277.61	32.94	53.6
DENEY HIZLARI						
Ön Yük : 5 Nmm ² Deney Hızı : 12 mm/dk Alma Hızı : 10 mm/dk						

Şekil 7.3 Numuneye ait çekme eğrisi ve elde edilen değerler.

7.3.2 Çentik Darbe Testleri

Dökülen parçadan elde edilen numunelerin çentik darbe deneyinde elde edilen veriler Çizelge 23’de verilmiştir.

Çizelge 23 Çentik darbe deney sonuçları

Numune No	Kesit ölçüleri (mm)	Kesit (mm ²)	Kırılma Enerjisi (+21,7°C)	Kırılma Enerjisi (-20°C)	Çentik darbe mukavemeti a _k (J/cm ²)
1	10,10 x 8,12	82,012	19,58	-	23,8745
2	9,98 x 7,95	79,341	15,77	-	19,8762
3	9,84 x 7,87	77,4408	16,97	-	21,9134
Ortalama		79,60	17,44		21,89
4	9,96 x 8,02	79,8792	-	15,04	18,8284
5	9,83 x 7,90	77,657	-	13,18	16,972
6	9,70 x 8,12	78,764	-	14,90	18,9172
Ortalama		78,77		14,37	18,24



Şekil 7.4 Mohr-Federhaff çentik darbe test cihazı

Mekanik özellikler özetlenecek olursa;

- ✓405MPa Çekme dayanımı,
- ✓256 MPa Akma dayanımı,
- ✓%18 Kopma uzaması,
- ✓18,24 J/cm² çentik darbe dayanımı (oda sıcaklığı), 14,37 J/cm² (-20 °C),

Mekanik özellikler incelendiğinde numune için beklenen 400 Çekme, 250 Akma, %18 Uzama değerlerini sağladığı görülmektedir.

7.3.3 Sertlik İncelenmesi

Sertlik testi malzeme kalınlığına ve malzeme cinsine bağlı olarak seçilmektedir. Dökme demirlere uygulanan sertlik testi Brinell sertlik değerlerine göre 400 BSD değerlerine kadar çıkılabilmektedir.

Deneyde uygulanacak yük kullanılan bilye çapına ve malzemenin cinsine göre seçilmiştir.

Çizelge 24 Dökümü yapılmış olan malzemenin sertlik değerleri.

Numune	R1	R2	R ort	HB
1	1,27	1,25	1,26	140
2	1,26	1,26		
3	1,26	1,26		

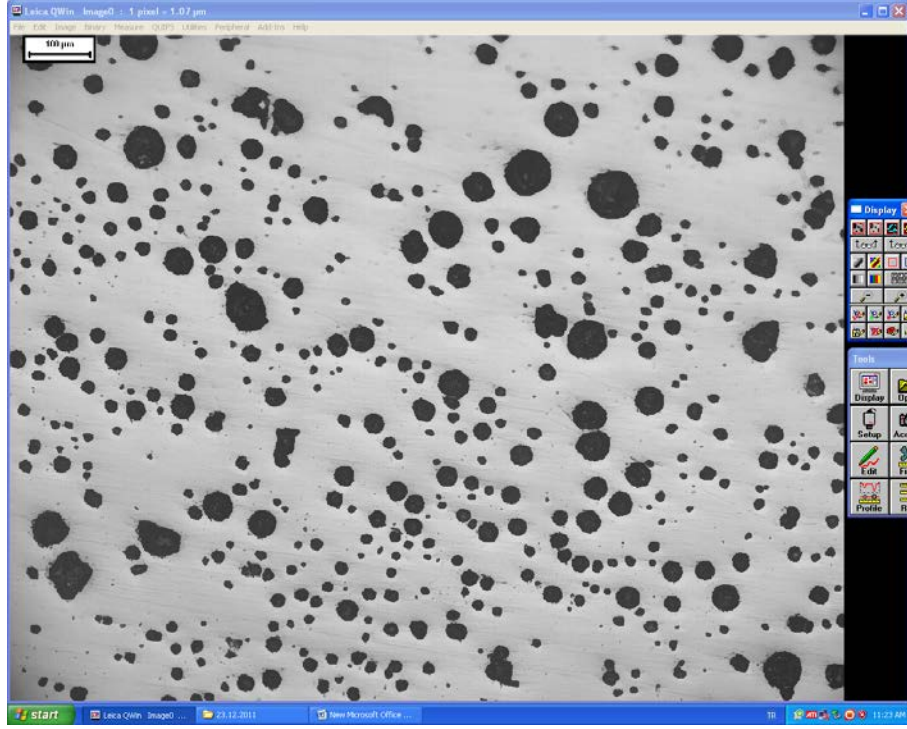
7.4 Mikro Yapısal İnceleme

Mikro yapı incelemeleri ayrık dökülmüş olan ‘Y’ bloktan alınan örnekler incelenmiştir.

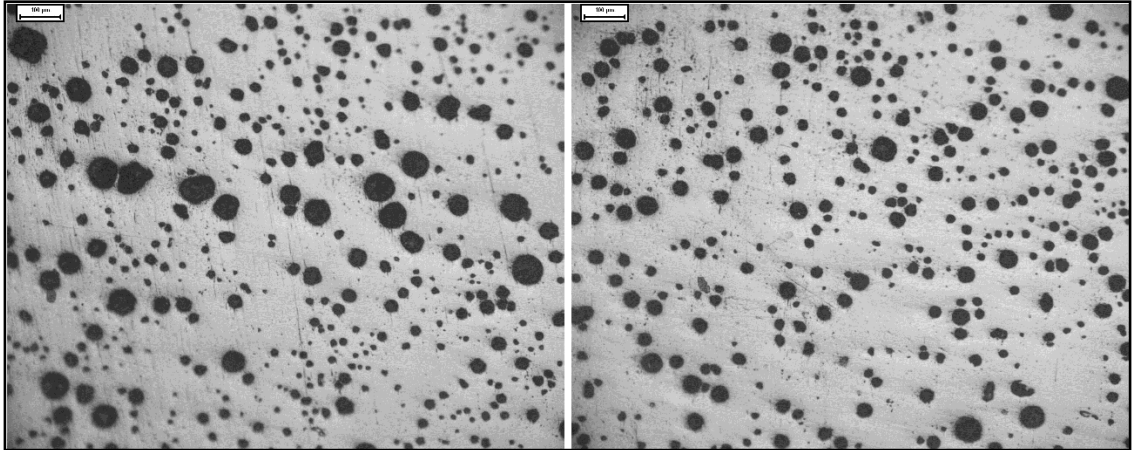
Mikro inceleme için numuneler istenen boyutlara göre kesildi. Daha sonra zımparalama işlemlerini takip eden parlatma ve dağlama işlemleri ile mikro yapısal analize hazırlanmıştır.

Zımparalama ve parlatma işlemlerinden sonra optik mikroskopta malzemenin yapısı incelenmiştir. Daha sonra görüntü almak için görüntü analiz cihazına geçilmiş ve görüntüler kaydedilmiştir.

Numuneler dağlanmadan önce grafit oranı ve küre sayısı, nital2 ile dağlandıktan sonra da doku analizi yani ferrit-perlit yüzdesi görüntü analiz cihazındaki program yardımıyla tespit edilmiştir.

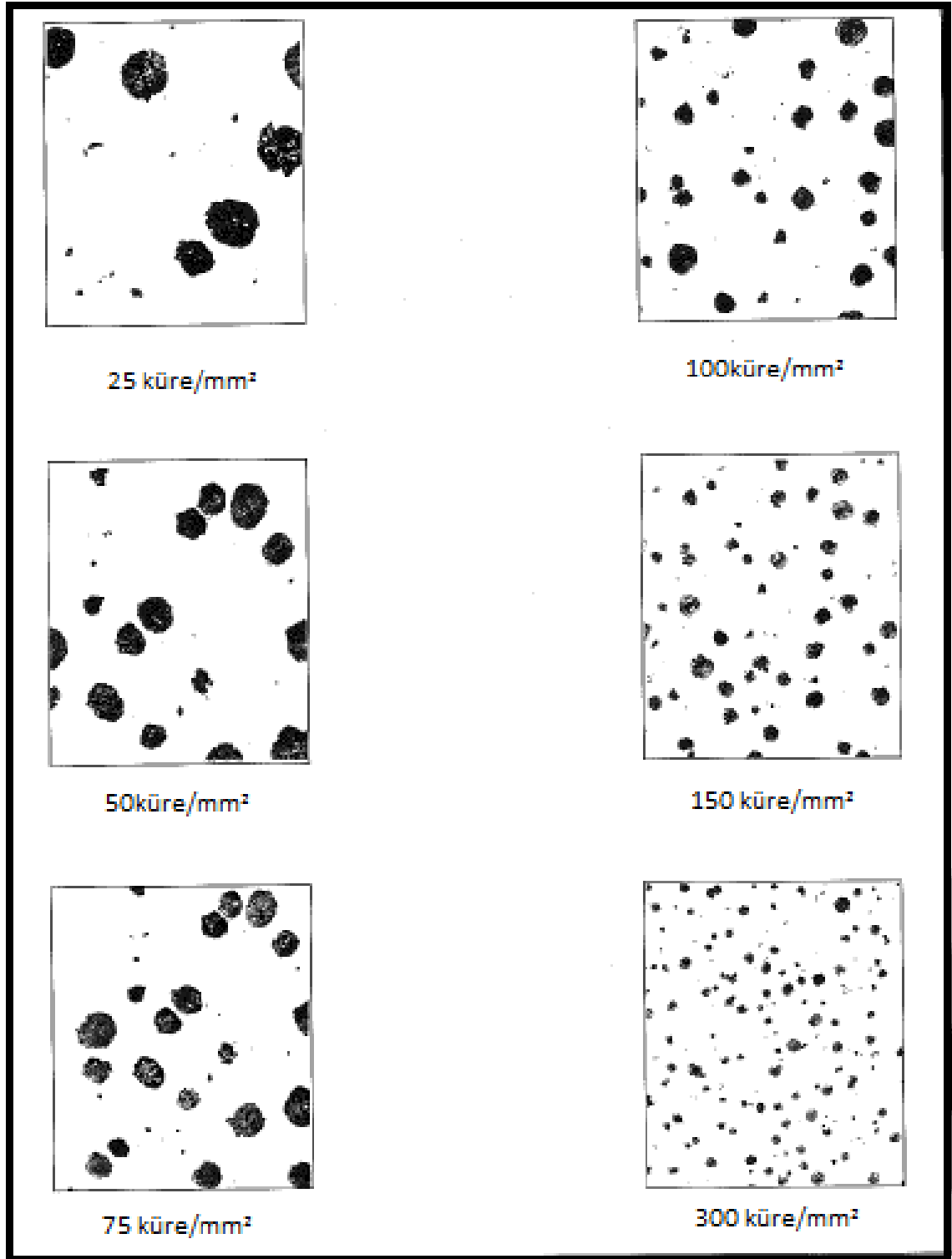


Şekil 7.5 Görüntü analiz cihazında mikro yapı incelemesi küre sayının tayini.

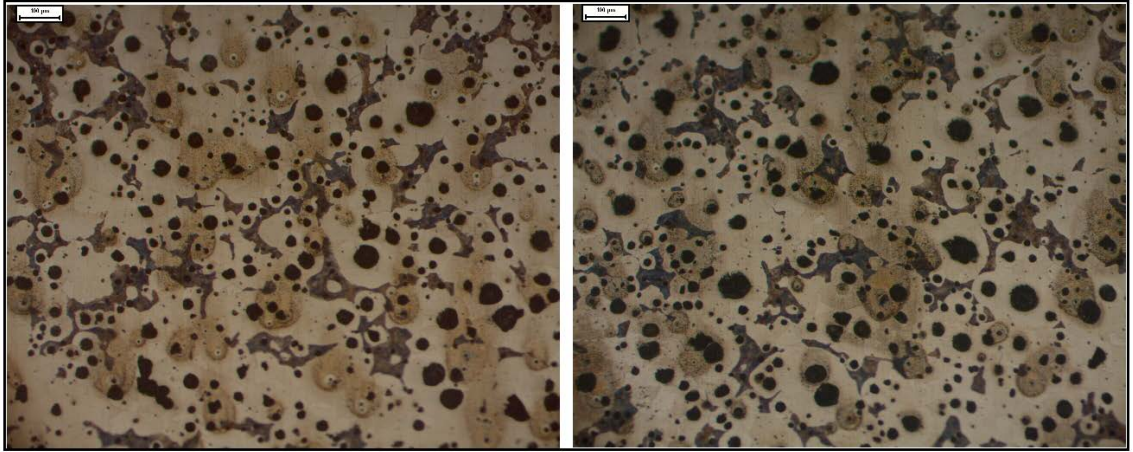


Şekil 7.6 Dökümü yapılmış olan rüzgar türbini numunesinin mikro yapısı(X100)

Yapılan ışık mikroskobu ve görüntü analiz cihazından alınarak kaydedilen görüntüler şekil 7.5 ve 7.6'daki gibidir. Bu görüntüler 100 büyütmede(X100) alınmıştır. Verilerimizi doğrulamak için ASTM standartlarından alınan küresel dökme demirlerdeki küre sayısının sınıflandırılması (Şekil 7.7) şeklinden karşılaştırma yapılarak tayin edilmiştir. Küre sayısı 100-150 küre/mm² olarak belirlenmiştir. Rüzgar türbini pervane göbeğinde istenen küre sayısı minimum 100 olduğundan dolayı hedeflenen değerlere ulaşılmıştır.



Şekil 7.7 ASTM Standartlarına göre küresel dökme demirlerdeki küre sayısının sınıflandırılması(X100).



Şekil 7.8 Dökümü yapılmış olan rüzgar türbini numunesinin dağlanmış mikro yapısı(X100)

Şekil 7.8’de görüldüğü gibi açık renkli kısımlar ferritik yapıyı dairesel küreler küresel grafiti ve koyu (yanık) görünümlü kısımlar ise perlitli temsil etmektedir. Rüzgar türbini pervane göbeği üretiminde hedeflenen ferritik yapı %90 üzerindedir. Yapılan ölçümler sonrasında hedeflenen değerlere ulaşılmıştır. Bu değerler;

Çizelge 25 Yapılan dökümden alınan numuneden elde edilen değerler.

Kesit (mm)	Kalınlığı	Küre sayısı (küre/ mm ²)	Ferrit (%)	Sertlik (HB)
76,2		148	93	140

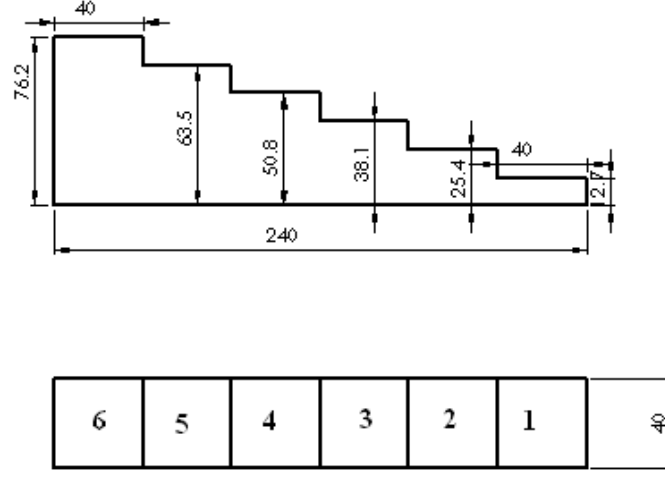
Küre sayısının yanında oluşan kürelerdeki küresellik oranı da mekanik özellikler üzerinde etkili olduğundan dolayı istenen küre sayısına ulaşıldığında küreselleşme yüzdesi incelenmiş ve yüksek oranda olduğu Çizelge 26’de belirlenmiştir.

Çizelge 26 Küreselleşme yüzdesi

	1	2	3	4	5	ORTALAMA
Küre Sayısı	449	408	444	449	483	446,6
Toplam Küre	479	442	501	483	527	486,4
Küreselleşme %	94%	92%	89%	93%	92%	92%

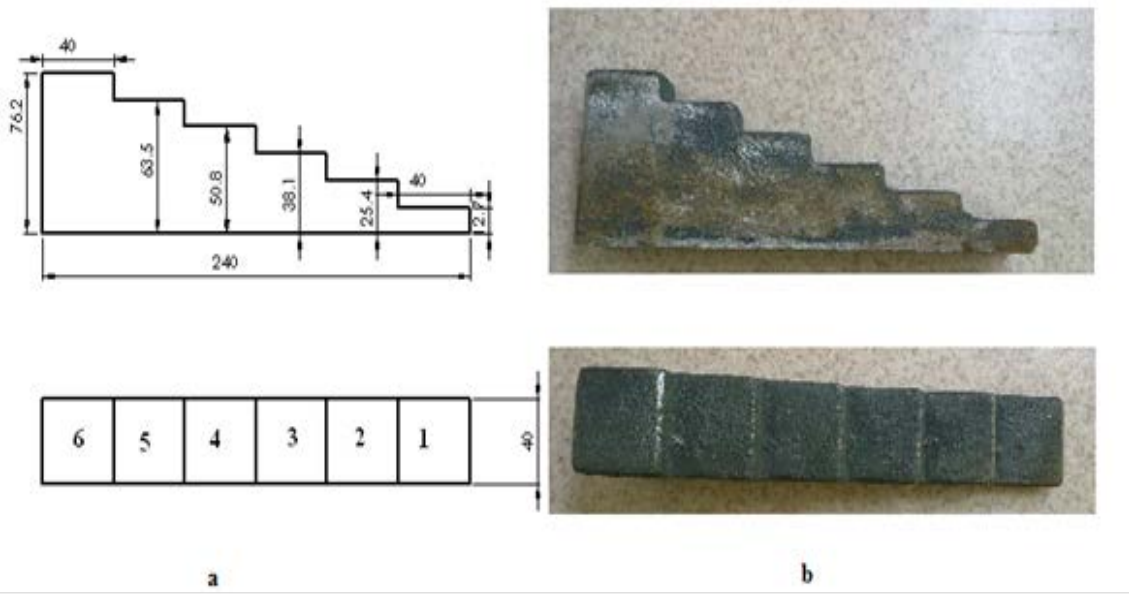
7.5 Kesit Değişiminin Etkisinin Belirlenmesi

Katılaşmaya kesitin etkisini araştırmak için Şekil 7.9’da görülen boyut ve şekilde döküm numunesi GGG40.3 malzeme için hazırlanarak, kesit değişiminin mikro yapıya ve sertlik değişimine olan etkileri incelenmiştir. Bu incelemedeki amaç yapılacak farklı dökümlerde elde edilecek özelliklerin belirlenmesidir.



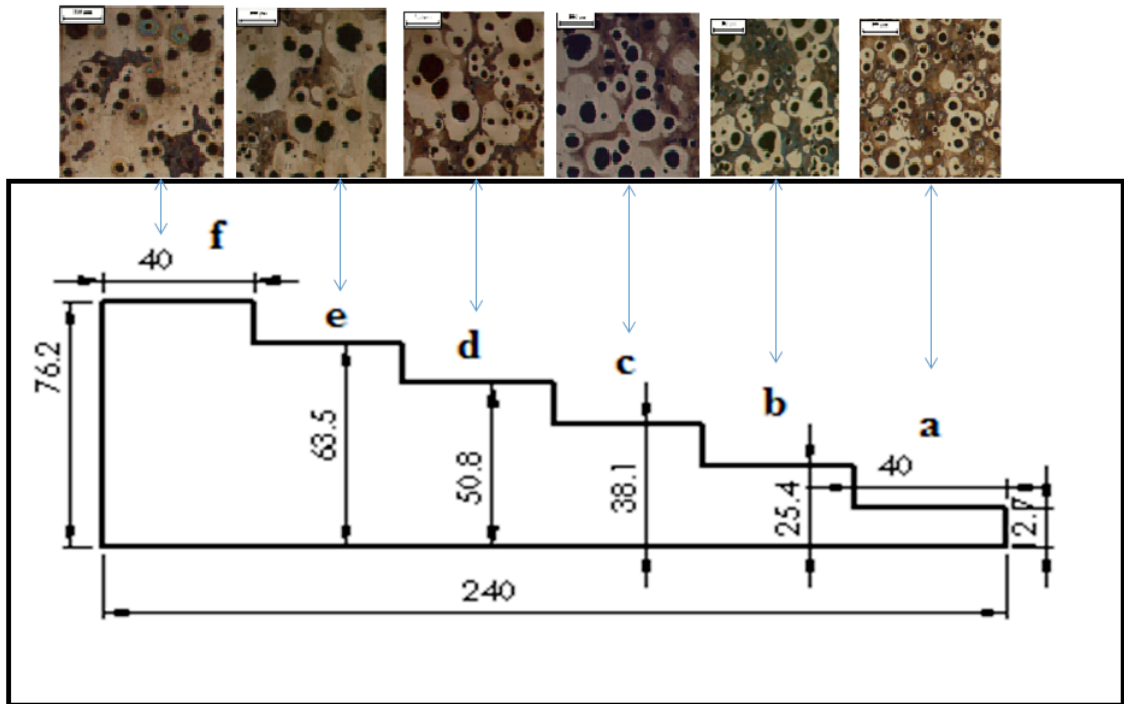
Şekil 7.9 Basamaklı döküm numunesi

Rüzgar türbini pervane göbeği için hazırlanan ergiyik ile aynı kimyasal bileşime sahip olan GGG40.3 basamak döküm için hazırlanarak, dökülmüş farklı numunelerden mikro yapıya ve sertlik değişimine olan etkileri incelenmiştir.



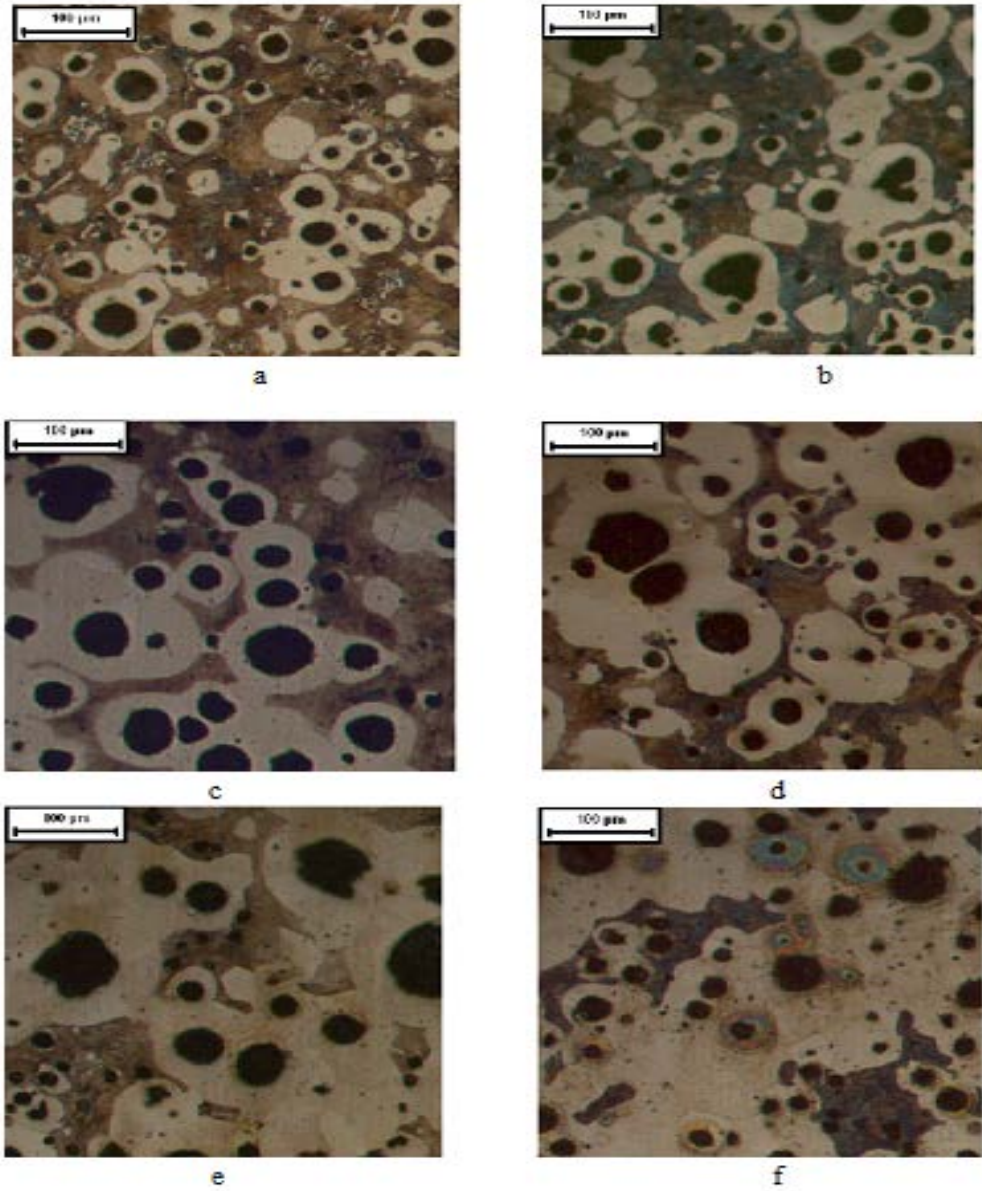
Şekil 7.10 Basamak dökümün a) kesit ölçüleri, b) dökümden sonraki görüntüleri

Bu deneyde 6 numaralı kesit üretimi planlanan rüzgar türbini pervane göbeğinin kesit kalınlığı ile aynıdır. Yani bu kesitte elde edilen özellikler döküm sonrasında ana parçada olması planlanan ile aynıdır. Bu numunenin sağlamış olduğu özellikler referans olarak kabul edilerek o büyüklükteki numunenin dökümü gerçekleştirilecektir. Dökümü yapılacak türbin göbeğinin kalın kesitli olması ve soğuma hızının daha yavaş olması sebebiyle ferritik yapının daha da artacağı hesaplanmıştır.



Şekil 7.11 Basamaklı dökümden elde edilen numunelerin mikro yapı görüntüleri

Basamaklı dökümden elde edilen numunelerin mikroyapı fotoğrafları Şekil 7.11’de verilmiştir. Şekil 7.11’de ferritik yapının kesit kalınlığının artması ile arttığı görülmektedir. Burada ferritik yapının soğuma hızının azalması ile birlikte arttığı açıkça görülmektedir.



Şekil 7.12 Küresel grafitli dökme demirin farklı kesit kalınlıklardaki mikro yapıları (nital 2 ile dağlanmış, 100x) ; a) 12,7mm, b) 25,4mm, c) 38,1mm, d) 50,8mm, e) 63,5mm ve f) 76,2mm

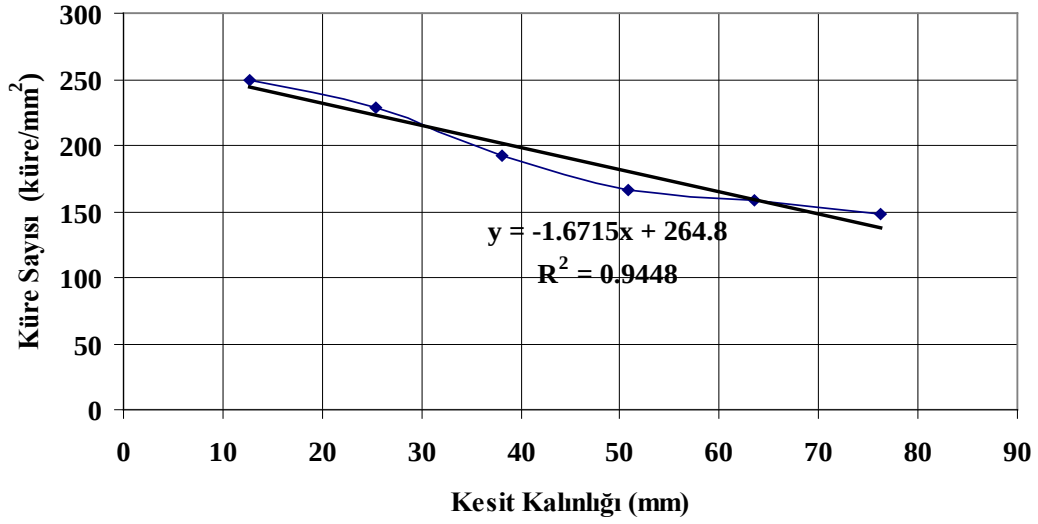
Kesite bağılı mikro yapı incelemelerinden elde edilen veriler Tablo 2’de verilmiştir. Tablo incelendiğinde kesit kalınlığının mikro yapısal özelliklere ve sertliğe etkisi açıkça görülmektedir. Daha önceki bölümlerde bahsedildiği gibi soğuma hızı ferritik yapıyı temin edebilmenin en verimli yoludur. Soğuma hızı düşük olan parçaların ferritik yapısı çok daha fazla olacaktır. Bu numune bitişik dökülmüştür fakat her ne kadar bitişik ve aynı kesit kalınlığına sahip de olsa soğuma hızı üretilcek parçanın soğuma hızı kadar düşük olmayacaktır.

Bu çalışmanın amacı kesit kalınlığı ile ferritik yapının değişimini ve sertlik gibi temel mekanik özelliklerin göz önüne serilmesidir. Bu çalışmada önemli olan bir diğer inceleme ise küre sayısıdır. Standartlarda dökümden beklenen küre sayısı minimum 100 küre/ mm²’dir. Çizelge 27 incelenirse küre sayısının başarı ile elde edildiği görülmektedir.

Çizelge 27 İncelenen numunelerin mikro yapısal özellikleri ve sertlikleri.

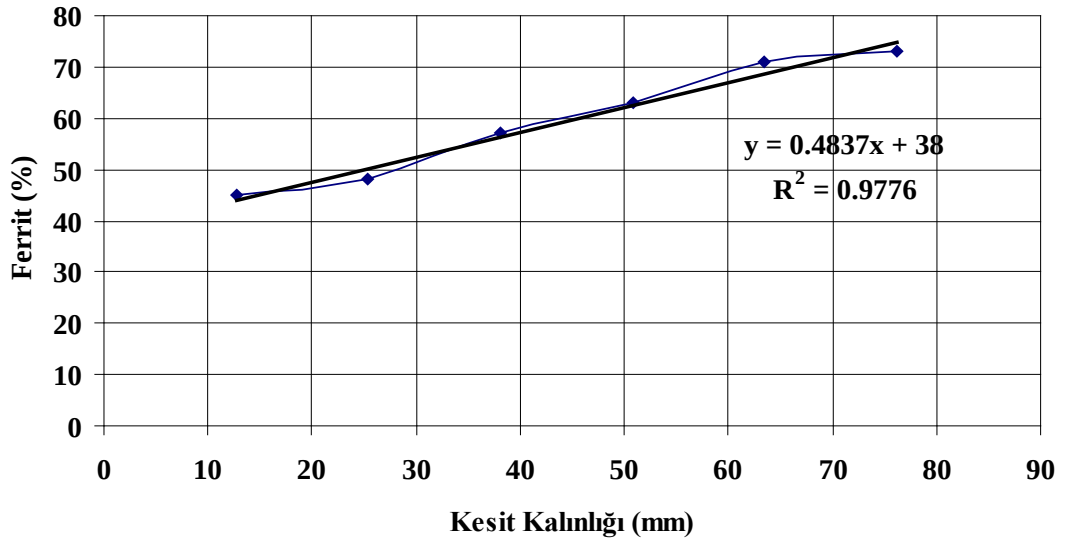
Numune No	Kesit Kalınlığı (mm)	Küre sayısı (küre/ mm²)	Ferrit (%)	Sertlik (HB)
1	12,7	250	45	198
2	25,4	228	48	177
3	38,1	192	57	170
4	50,8	166	63	158
5	63,5	159	71	148
6	76,2	148	73	140

Çizelge 27 incelendiğinde mm² küre sayısı artan kesit kalınlığı ile ters orantılı olarak azalmıştır. Bu azalmanın değişimi Şekil 7.13’de ki grafikte görülmektedir. Yani kesit kalınlığının artması küre sayısını azaltmaktadır. Kesit kalınlığı ile küre sayısı arasındaki lineer ilişkide yüksek ilişki katsayısı(R²=0,945) elde edilmiştir.



Şekil 7.13 Kesit kalınlığının küre sayısına olan etkisi.

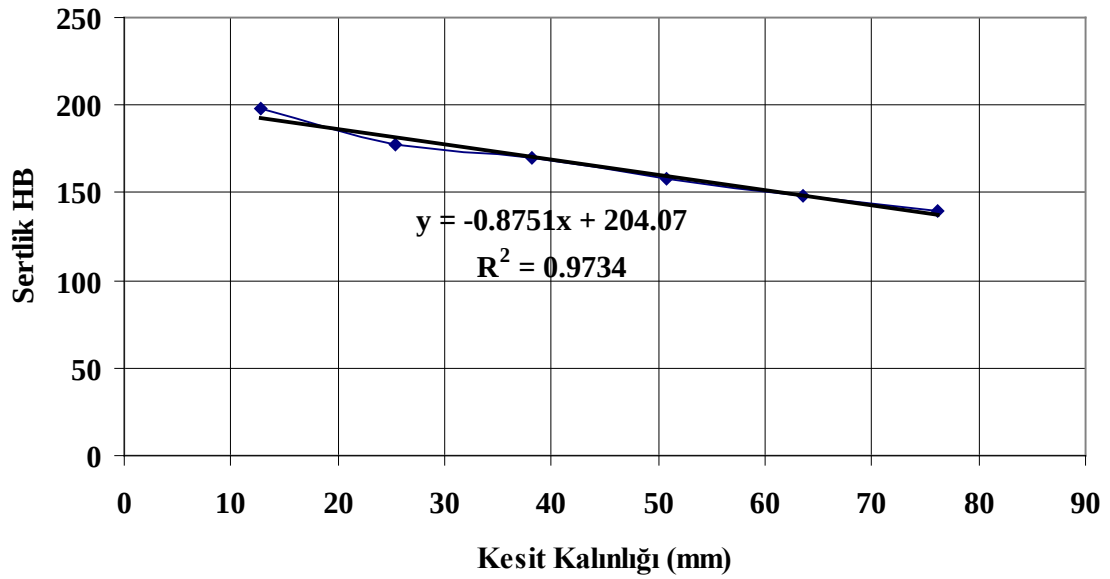
Kesit kalınlığı ile ferrit yüzdesi arasındaki ilişkiye bakıldığında kesit kalınlığının artması ferrit yüzdesini artırmıştır. Kesit kalınlığı ile ferrit yüzdesi arasındaki lineer ilişkide de yüksek ilişki katsayısı ($R^2=0,978$) elde edilmiştir.



Şekil 7.14 Kesit kalınlığı ile % Ferrit miktarının değişimi

Kesit kalınlığının artması mekanik özelliklerin düşmesine sebep olmaktadır. Mekanik özellikler sertlikle kıyaslanabildiği için sertliklerden yola çıkarak malzemedeki mekanik özelliklerin değişimi yorumlanabilir. Şekil 5’de kesit kalınlığının sertlikle olan ilişkisi

görülmektedir. Kesit kalınlığı ile sertlik arasındaki lineer ilişkide de yüksek ilişki katsayısı($R^2=0,973$) elde edilmiştir.



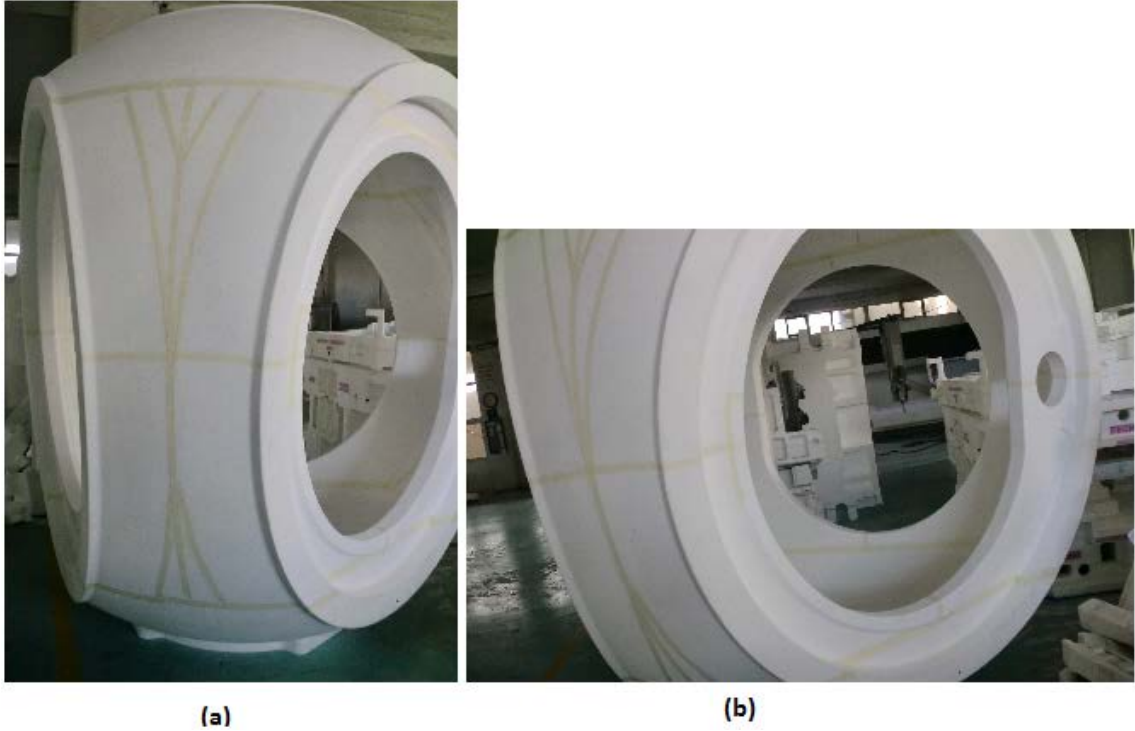
Şekil 7.15 Kesit kalınlığının sertliğe olan etkisi.

Kesit kalınlığının artması ile birlikte sertlik azalmış yani mekanik özellikleri düşmüştür. Bunun yanında sertliğin düşmüş olması bize malzemenin sünekliğinin arttığını göstermektedir. Sertliğin kesit kalınlığıyla birlikte düşmesinin en önemli nedenlerinden biri soğuma hızının düşmesi ile birlikte ferritik yapının artmasıdır.

Küresel grafitli dökme demirin kullanım yerlerine göre istenen özellikler standartlarda belirtilmiştir. Bu çalışmada kullanılan küresel grafitli dökme demirin bileşimi farklı kesitlerdeki özellikleri dikkate alınarak bundan sonra istenilen yapıda ve mekanik özellikte üretim yapılabilir.

7.5.1 Rüzgar Türbini Pervane Göbeği Üretimi

Rüzgar türbini pervane göbeği üretimi için dizayn gerçekleştirildikten sonra üretimin kalıplama aşamasına geçilmiştir. Öncelikle strafor malzemedan Şekil 7.16’da görüldüğü gibi pervane göbeğinin modeli çıkartılmıştır. Bu model kum kalıba yerleştirilerek dökümhaneye gönderilmiştir.



Şekil 7.16 İğrek makine A.Ş de straforan yapılan pervane göbeği modeli. a- Dış Görünüşü, b- İçten Görünüşü.

Kum kalıba yerleştirilmesinin ardından döküm hattına sevk edilen döküm kalıbı metalin ergitme ve takip eden treatment işlemlerine hazır hale getirilmiştir. Öncelikle yüksek kalitede dönüş hurdası ve yüksek kalitede pikten elde edilen ergiyik kısa süreliğine 15000C kadar çıkartıldı. Bu sıcaklıkta uzun süre bekletilmemesinin nedeni çekirdeklerin kaybolması ve Mg içerisinde uçup gitmesi önlemektir. Ocakta 1300-1400 0C’de bekletilen sıvı metal hedeflenen analize ulaşmak için birkaç defa kimyasal analiz numunesi alınarak eksik ya da fazla element varsa ya da hedeflenen CE değerinde değilse istenen değerlere çekilecek şekilde ayarlamalar yapılır. Daha sonra ergiyik

kalitesi ve istenen değerlere ulaşıldığında ‘Sandviç Prosesi’ ile Mg treatmanına tabi tutulur.



şekil 7.17 Ergiyik metali potaya alma işlemi



şekil 7.18 Pota içerisindeki ergiyik metale uygulanan Mg treatmanı (Sandwich Prosesi)

şekil 7.17 de metalin ince elik sa ile Mg’a ‘Sandviç Prosesi’ yapılmış olan potaya alınır. Bu potaya alma işlemi aşamalı yapılır bunun nedeni teorik kısımda bahsedildiği gibi daha iyi karıştırma etkisi ile daha etkin bir Mg treatmanıdır.

Şekil 7.18 Pota içerisine aktarılan metal ince çelik sacın erimesiyle birlikte yaklaşık 1300 OC'de Mg ile tepkimeye girmeye başlar. Tepkimenin başlamasını pota içeresinden çıkan parlak ışıktan anlayabiliriz buna 'Mg parlaması' da denir. Şekil 7.18 ve 7.19'da Mg işleminin aşamaları açıkça görülmektedir.



Şekil 7.19 Mg işlemi sırasında Mg ile tepkime sonucu çıkan parlak ışık (Mg parlaması) Mg etkisini kaybederek solması ile birlikte pota içerisindeki sıvı metale cüruf alma işlemi uygulanır. Şekil 7.20'de Mg işlemi sonrası uygulanan cüruf alma işlemi görülmektedir. Kalıp içerisine istenmeyen impürütelerin girmemesi ve daha başarılı bir döküm elde edilmesi için uygulanan cüruf alandan sonra potalar döküm hattına sevk edilir. Döküm işlemi sırasında pota ağzında akışa aşılama yapılır. Yüksek küre sayısı elde etmek için bu aşılama şarttır.



Şekil 7.20 Mg işleminden sonra Cüruf alma işlemi



Şekil 7.21 Cüruf alındıktan sonra döküm hattına transfer edilen potaların kalıba dökümü



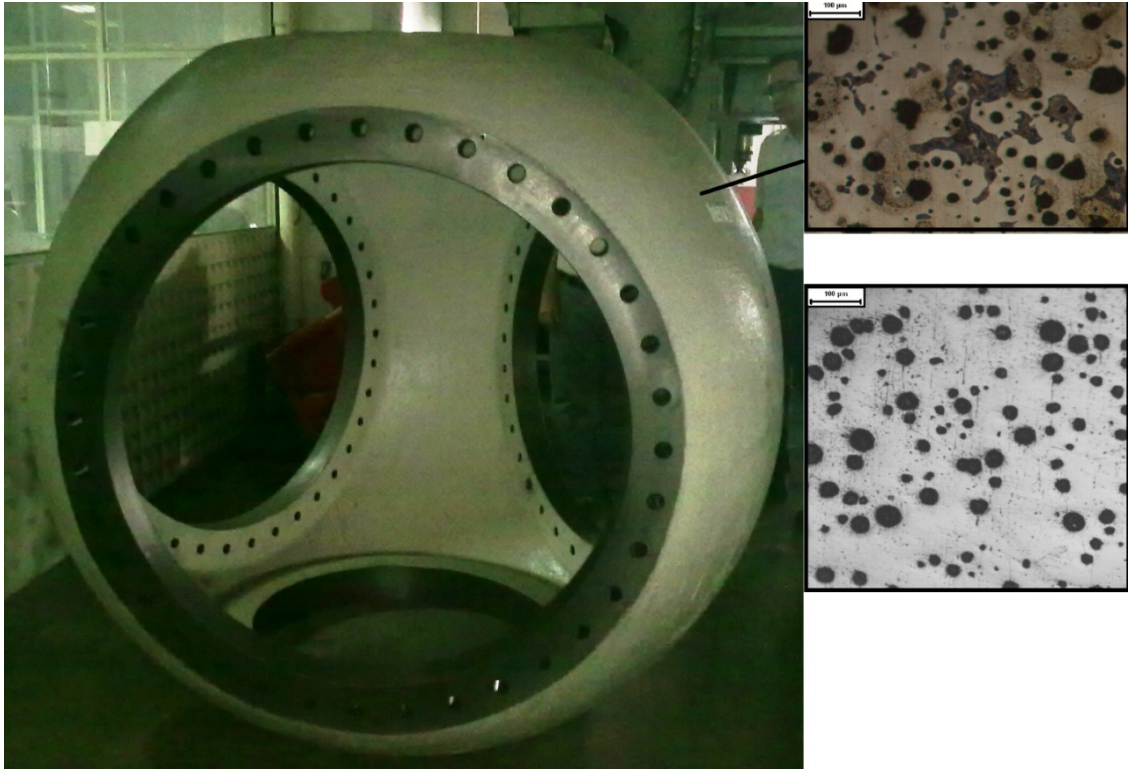
Şekil 7.22 İğrek Makine A.Ş de dökme demirden dökülen örnek prototip pervane göbeğinin döküm sonrası görüntüsü

Döküm sonrası analizler tamamen standartlara uygun çıktı. İğrek Makine A.Ş. tarafından yaptırılan lazer ile porozite tespit işleminden de başarılı bir şekilde geçti. Sıfır '0' porozite ile hem seri üretime hazır olduğunu ispatladı hem de kesit kalınlığı yüksek olan bir parçanın döküle bilirliliğini ispatlamış oldu.

Tasarımı yapılarak dökümü ve şekillendirilmesi gerçekleştirilen pervane göbekleri Şekil 7.23’de verilmiştir. Teknik resimleri de hazırlanan pervane göbeklerinin şekil ve ölçüleri standart hale getirilmiştir.



Şekil 7.23Dökümü yapılan prototip rüzgar türbin göbeğinin farklı görüntüsü.



Şekil 7.24 Dökümü yapılmış olan prototip rüzgar türbin göbeğine ait mikroyapı görüntüleri

Rüzgar Türbini pervane göbeği için gerekli malzemenin öncelikle kimyasal bileşiminin aralıkları belirlenmiş ve döküm gerçekleştirilmiştir.

Yapılan dökümlerin mekanik testlerinin ve metalografik olarak incelenmesinin ardından standartlara uygunluğu araştırılmıştır. Mekanik özellikleri istenen sınır değerlerinde olup olmadığı belirlenmiştir. Mekanik özellikler EN-GJS400-18U-LT ve TS 526 EN 1563 standartlarına uygundur.

Tavsiye edilen kimyasal bileşim, birçok bilimsel çalışmanın ışığında hazırlanmıştır. ASTM A536-84 standartlarındaki tavsiye edilen analiz referans alınarak bir reçete hazırlanmıştır.

Döküm parçasının kesit kalınlığı standartlarda kullanılan numunelere oranla daha büyük olduğu için farklı bir reçete hazırlanarak dökümün gerçekleştirilmesi tavsiye edilmiştir. Tavsiye edilen analize göre; Si miktarının 2.0'dan düşük olmalıdır. Tavsiye edilen analiz başlangıçta düşük çıkan Si oranının (1,89) yükseltilmesi kararını desteklemektedir. Fakat burada dikkat edilmesi gereken bir diğer husus ise C miktarının Si miktarının artması grafit oluşumunu arttırmasına rağmen ferrit sertliğini arttırdığından dolayı daha yüksek değerlere çıkarılması uygun bulunmamıştır. Malzemedan istenilen özellik sertliğin yüksek oluşu değil sünekliktir. Bu nedenle Si ilavesinin 2.3 üzerine çıkarılmamasına karar verilmiştir.

Kesit kalınlığımızın 3 Inc olduğunu kabul ettiğimizde % 95 üzerinde bir Ferrit miktarı için gerekli Si miktarı 2,00-2,30 olması gerektiği belirlenmiştir.

Dökümden beklenen % 95 üzerinde bir ferrit miktarını sağlamak için sadece soğuma hızının düşük olması yeterli değildir. Elementlerin etkisi de oldukça fazladır. Ana elementler C, Si, Mn, P, S 'dir. Bu elementler tayin edilen sınırlar içerisinde tutulmalıdır. Özellikle P,S Mn gibi perlit arttırıcı elementler olabildiğince bünyeden uzak tutulmalıdır.

Malzemenin metalografik incelemesinde küre sayısı ve ferrit miktarı istenen değerlerin altında çıkmıştır. Bu problemin nedenleri araştırılmış ve kimyasal bileşimdeki Mn

miktarının istenilen sonuç değerinden yüksek çıktığı belirlenmiştir. Tavsiye edilen analiz seviyesine düşürülmesi önerilmiş ve metalik hurdadan gelen diğer istenmeyen elementler konusunda üretici firma uyarılmıştır.

Üretilen parça için fabrikada iki tip aşılama yöntemi kullanılmaktadır. İlk olarak potada aşılama yapılırken yeteri miktarda küre sayısına ulaşabilmek için ikinci bir aşlamaya ihtiyaç duyulmaktadır. İkinci aşılama olarak kalıp ağzında akışa aşılama prosesi uygulanmaktadır. Potada aşılama fabrikada kullanılan Barinoc aşılama miktari % 0,3' dür. Dökümde kalıp ağzında akışa yapılan Ultraseed aşılama miktari ise % 0,1'dir.Yapılan mikroyapı incelemelerinde kesit kalınlığının etkisinden dolayı aşılama veriminin düşük olmasının sonucu oluşan küre sayısı olması gereken 100/mm² standardının altında olduğu belirlenmiştir.

İlk üretimde kullanılan oran sfero dökümleri için minimum seçilmiştir. Bu dökümden beklenen performansı vermediği için ilave edilmesi gereken aşılama miktari artırılmasına karar verilmiştir. Döküm için tavsiye edilen miktarlar potada aşılama için minimum % 0,35-0,45 ve akışa aşılama da % 0,2 olarak belirlenmiştir.

Böylelikle yapılmış olan öneriler ile yapılan dökümlerde küre sayısı, ferrit miktari ve kimyasal bileşim literatürde ve yapılan referans kaynak araştırmalarında olan seviyelere çıkartılarak sorunsuz bir döküm için istenen koşullar sağlanmıştır.

Döküm ardından gerçekleştirilen lazerli porozite ölçme cihazı ile porozitesine bakılmış ve sıfır '0' porozite bulunmuştur.

Etki eden parametreler optimize edilerek en uygun şartlar sağlanmaya çalışılmış ve başarılı bir döküm gerçekleştirilmiştir.

- [1] Karadağ H.İ (2009) Yenilenebilir Enerji Kaynakları Arasında Rüzgar Enerjisinin Önemi Ve Rüzgar Türbini Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [2] Ergür Ö. (2006) Rüzgar Türbinleri İle Enerji Üretimi Yüksek Lisans Tezi Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya
- [3] (GWEC) 2011 Global Wind Report
- [4] (REN21) 2011 Renewables Global Status Report
- [5] Eker B. ve Vardar, A. (2003) Rüzgar Türbinlerinde Uygun Kanat Tipinin Seçilmesi, 3 E Dergisi, Sayı:105
- [6] Yağmur A.O (2011) Rüzgar Türbini Pervane Göbeği Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [7] Aktemur K. (2010) Bir Rüzgar Türbininin Bilgisayar Destekli Analizi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [8] Stiesdal, H. (1999) “Wind Turbine Components and Operation”, Bonus Energy A/S, Bonus Info Special Issue, Brande
- [9] http://tr.wikipedia.org/wiki/R%C3%BCzg%C3%A2r_t%C3%BCrbini (24.05.12)
- [10] <http://www.bilgiustam.com/ruzgar-enerjisi-nedir-nasil-calisir/> (24.05.12)
- [11] Demirci S. (2011) Rüzgar Türbini Göbeğinin Yapısal Tasarımı Ve Optimizasyonu, Yüksek Lisans Tezi , Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [12] Durdyev S. (2010)) Rüzgar Enerjisinde Uygun Türbin Seçimi, Yüksek Lisans Tezi , İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [12] http://www.eie.gov.tr/turkce/YEK/ruzgar/ruzgar_turbin.html (03.06.12)
- [13] Fidaner, S., Çelik S., Doğmuş, H., Süzen, C., (1979). Genel Dökümcülük Bilgisi, Milli Eğitim Basımevi, İstanbul,
- [14] <http://www.haddemetal.com/tr/Download/Dokmedemirler.pdf> (15.11.2011)

- [15] Doru M. S., (1998), ASM Handbook 15 Classification of Ferrous Casting Alloys , ASM International, USA
- [16] Doru M. S.,(1990). ASM Handbook 1 Classification and Basic Metallurgy of Cast Iron , ASM International, USA
- [17] Joseph R. Davis,(1996). Cast Irons (Asm Specialty Handbook), ASM International, USA
- [18] <http://www.haddemetal.com/tr/Download/Dokmedemirler.pdf> (29.05.2012)
- [19] Kırcalı K. K.,(2006) Farklı Matriks Yapılara Sahip Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Mekanik Ve İşlenebilirlik Özelliklerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa
- [20] Ahlsrom, A.,(2002) Simulating Dynamical Behaviour of Wind Power Structures, Royal Institute of Technology Department of Mechanics, Technical Reports, Stockholm Sweeden
- [21] Çavuşoğlu, E., (1992), 'Döküm Teknolojisi I'. İTÜ Kimya-Metalurji Fakültesi, İstanbul.
- [22] Walton C.F. ve Opar T.J., Ed.,(1981) Iron Castings Handbook, Iron Castings Society, USA.
- [23] Yüksel Ç. (2011). Rüzgar Türbini Pervane Göbeği Üretimi Ve Yapısal Özelliklerinin Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [24] Mullins, J., (2006), 'Basic Ductile Iron Alloying' , Sorelmetal.
- [25] Karaman S.,(2011) Küresel Grafitli Dökme Demirlerin (Ggg40, Ggg50, Ggg60, Ggg70) Üretim Sürecinin Ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi , Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi,Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne
- [26] Cantekinler A.,(2008) Ferritik Küresel Grafitli Dökme Demirlerde Kaynak Gücünün Mekanik Özelliklere Etkilerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya
- [27] Sen, Ö., (2003), Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Üretimi ve İşlem Yöntemlerinin Karşılaştırılması, Metal Dünyası

- [28] Çetin, M., (1998), Karabük Pikinden Küresel Grafitli Dökme Demir Üretiminde Etkili Parametreler, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara
- [29] Yavuz, K., (2006), GGG-70 Sınıfı Küresel Grafitli Dökme Demir Kam Millerinin İslenebilirliğinin Deneyisel Olarak Arastırılması, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara
- [30] Ekinci E., (2009), Düktil Demirlerde Asılayıcının Mikroyapı Ve Mekanik Özelliklere Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya
- [31] Ductile Iron Data (1998) www.ductile.org/didata/default.htm (05.03.2012)
- [32] <http://www.unaldokum.com.tr/> (05.06.2012)
- [33] ASTM A 874/A 874M – 98 Standard Specification for Ferritic Ductile Iron Castings Suitable for Low-Temperature Service, , ASTM, Philadelphia.
- [34] Gundlach R. B., Loper C. R. Ve Morgensteren B., (1998) Composition of Ductile Irons, Michigan
- [35] Technical Information 12. (2001), Effects of Minor and Trace Elements in Cast Iron Revision No. 1, Elkem ASA, Silicon Division, Norveç.
- [36] Technical Information 18. (2001), Recommended Target Analysis for Ductile Cast Iron Revision No. 1. (2001), Elkem ASA, Silicon Division, Norveç.
- [37] Technical Information 3. (2001), Inoculant Alloy Composition Revision No. 1, Elkem ASA, Silicon Division, Norveç.
- [38] Technical Information 5. (2001), Inoculation Mechanisms Revision No. 1, Elkem ASA, Silicon Division, Norveç.
- [39] Technical Information 4. (2001), Inoculation Practices Revision No. 1, Elkem ASA, Silicon Division, Norveç.
- [40] Technical Information 6. (2001), Fading of Inoculation Revision No. 1, Elkem ASA, Silicon Division, Norveç.
- [41] Technical Information 36. (2001), Inoculation of Heavy Section Castings Revision No. 1, Elkem ASA, Silicon Division, Norveç.

- [42] Technical Information 9. (2001), Magnesium Treatment Processes Revision No. 1, Elkem ASA, Silicon Division, Norveç.
- [43] Technical Information 23. (2001), Factors Influencing the Recovery and Addition of Magnesium in Ductile Iron Ladle Treatment Processes Revision No. 1, Elkem ASA, Silicon Division, Norveç.
- [44] Technical Information 7. (2001), Magnesium Contents in Ductile Iron Revision No. 1, Elkem ASA, Silicon Division, Norveç.
- [45] Brown J.R., (2000), “Foseco Ferrous Foundryman's Handbook” , Butterworth-Heinemann,
- [46] Technical Information 11. (2001),, The "Sandwich Pocket Process" Revision No. 1, Elkem ASA, Silicon Division, Norveç.
- [47] Güzel E., Şen Ö. ve Ekerim A. (2011) Küresel Grafitli Dökme Demirde Kesit Kalınlığının Mikroyapı ve Sertliğe Etkisinin İncelenmesi, 4. Döküm ve Çevre Sempozyumu, İstanbul
- [48] Technical Information 35. (2001),, In-the-Mould Nodularisation Revision No. 1, Elkem ASA, Silicon Division, Norveç.
- [49] Technical Information 10. (2001),, Tundish Cover Ladle Nodularization Revision No. 1, Elkem ASA, Silicon Division, Norveç.
- [50] Technical Information 6. (2001),, Fading of Inoculation Revision No. 1, Elkem ASA, Silicon Division, Norveç.
- [51] C. Ronald Kern Melting Practices for Ductile Iron Production
- [52] Al A., (1992). American Foundrymen's Society Ductile Iron Handbook., Michigan University, Michigan.
- [53] TS 526 EN 1563, (2000). Dökümler - Küresel Grafitli Dökme Demirler, TSE, I. Baskı, Ankara.
- [54] ASTM A 874/A 874M – 98, (1986). Standard Specification for Ferritic Ductile Iron Castings Suitable for Low-Temperature Service, ASTM, Philadelphia.

[55] ASTM-536, (1999). Standard Specification for Ductile Iron Casting, ASTM, Philadelphia.

[56] ASTM-536-84, (1999). Standard Specification for Ductile Iron Casting, ASTM, Philadelphia.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı :Erdoğan GÜZEL
Doğum Tarihi ve Yeri :Torul -08.04.1985
Yabancı Dili :İngilizce
E-posta :erdogdu_g@hotmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Lisans	Metalürji ve Malzeme Müh.	Yıldız Teknik Üniversitesi	2010
Lise	Sayısal	Karacabey Anadolu Lisesi	2003

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2011	İshakoğlu Gold	Metalürji ve Malzeme Müh

Bildiri

1. Küresel Grafitli Dökme Demirde Kesit Kalınlığının Mikro yapı ve Sertliğe Etkisinin İncelenmesi, FES 2011

Proje

1. 00453 STZ.2009-2 numaralı SANTEZ projesi.