

154602

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

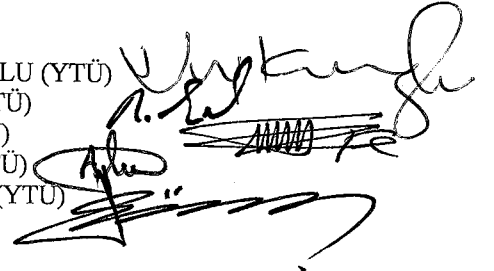
**DÖKME DEMİRLERDE ISIL ANALİZ YÖNTEMİYLE
YAPI BELİRLENMESİ**

Y.Müh. Özkan ŞEN

F.B.E Metalurji ve Malzeme Müh. Anabilim Dalı Malzeme Programında
Hazırlanan

DOKTORA TEZİ

Tez Savunma Tarihi : 24 Haziran 2004
Tez Danışmanı : Prof. Dr. Nihat G. KINIKOĞLU (YTÜ)
Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Niyazi ERUSLU (İTÜ)
: Prof. Dr. Fevzi YILMAZ (SÜ)
: Prof. Dr. Ahmet TOPUZ (YTÜ)
: Prof. Dr. Hüseyin SÖNMEZ (YTÜ)



İSTANBUL, 2004

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	v
KISALTMA LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	vii
ÇİZELGE LİSTESİ	xi
ÖNSÖZ	xii
ÖZET	xiii
ABSTRACT	xiv
1. GİRİŞ	1
2. DÖKME DEMİRLER	4
2.1 Genel Özellikler	4
2.2 Dökme Demirlerin Sınıflandırılması	5
2.3 Dökme Demirlerin Metalurjisi	5
2.3.1 Katılaşmaya Soğuma Hızının Etkisi	6
3. KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİR	9
3.1 Giriş	9
3.2 Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Üretimi	11
3.2.1 Üretimde Kullanılan Şarj Malzemeleri	14
3.2.1.1 Pik	14
3.2.1.2 Çelik Hurdası	15
3.2.1.3 Küresel Grafitli Dökme Demir Hurdası	15
3.2.1.4 Doğrudan İndirgenmiş Demir Cevheri	16
3.2.1.5 Ferro Alaşımlar ve Silisyum Karbür	16
3.2.1.6 Karbon Vericiler	16
3.2.2 Küreleştirme İşlemi	16
3.2.2.1 Küreleştirme Yöntemleri	17
3.2.2.2 Magnezyum İçeriğinin Kontrolü	21
3.2.3 Aşılama	21
3.2.4 Küresel Grafitli Dökme Demir Üretiminin Metalurjik Kontrolleri	24
3.2.4.1 Metal Bileşimi	24
3.2.4.2 Küresellik ve Küre Sayısı	24
3.3 Küresel Grafitli Dökme Demirin Katılaşması	26
3.3.1 Çekirdeklenme	29
3.3.2 Büyüme	30
3.3.3 Ötektoid Dönüşümün Mekanizması	32

3.4	Küresel Grafitli Dökme Demirin Bileşiminin Kontrolü.....	34
4.	ISIL ANALİZ	40
4.1	Nicel Isıl Analiz.....	42
4.2	Isıl Analiz Teknikleri.....	43
4.2.1	Soğuma Eğrileri.....	44
4.2.1.1	Türetilmiş Soğuma Eğrileri	45
4.2.1.2	Ters Oran Eğrisi.....	46
4.2.2	Diferansiyel Tarama Kalorimetresi(DSC).....	47
4.2.3	Diferansiyel Isıl Analiz(DTA).....	48
4.2.4	Newtonian Isıl Analizi.....	52
4.2.5	Fourier Isıl Analizi.....	54
4.3	Dökme Demirlerin Isıl Analizi	56
4.3.1	Giriş	56
4.3.2	Metal Bileşiminin Isıl Analiz ile Kontrolü	58
4.3.3	Isıl Analizin Diğer Uygulamaları	58
4.3.4	Dökme Demirlerin Soğuma Eğrilerinin Kaydedilmesi	59
4.3.4.1	Soğuma Eğrilerinin Tipik Özellikleri	59
4.3.4.2	Bilgisayar Destekli Diferansiyel Analiz(CA-DTA)	65
4.3.4.3	Katılma Isısı ve Gizli Isının Hesaplanması	66
4.3.5	Soğuma Eğrilerinde Demir Özelliklerinin Etkileri.....	69
4.3.5.1	Grafit Parçacık Şekli ve Küresellik	69
4.3.5.2	Ergiyiğin Oksidasyon Durumu.....	72
4.3.5.3	Küreselleştirme ve Aşılama.....	73
4.3.5.4	Numune Ölçüsü ve Ölçüm Hassasiyetinin Etkisi.....	75
4.3.6	Soğuma Eğrilerinde Ötektoid Dönüşüm Değerlendirmesi	77
4.3.7	Soğuma Eğrileri Örnekleri.....	80
4.3.7.1	Sertlik Tahmini	80
4.3.7.2	Çekme Eğilimi Tahmini	82
4.3.7.3	Isıl Analiz Yöntemiyle Aşılamanın Optimizasyonu.....	84
4.3.8	Soğuma Eğrilerini Etkileyen Faktörler.....	85
4.3.9	Uygun Soğuma Eğrileri	87
4.3.10	Dökme Demirin Isıl Analizinde Artırılmış Güvenilirlik İçin Öneriler.....	89
5.	DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	91
5.1	Kullanılan Cihazlar.....	91
5.1.1	Eritme Birimi.....	91
5.1.2	Yüksek Sıcaklık Isıl Çifti ve Göstergesi.....	91
5.1.3	LPG Pota Isıtma Sistemi.....	91
5.1.4	Daldırma Çanı Düzeneği	92
5.1.5	Bilgisayar ve Deney Düzeneği	92
5.2	Kısım I: Al-Si Alaşımı ile Yapılan Deneysel Çalışmalar	93
5.2.1	Giriş	93
5.2.2	Soğuma Eğri Analizi.....	94
5.2.3	Sıfır Eğrisinin Hesaplanması Yöntemleri.....	95
5.2.4	Modül Esaslı Yeni Sıfır Eğrisi.....	95
5.2.5	Modülün Soğuma Eğrilerine Etkileri.....	97
5.2.6	Deneysel Çalışma Prosedürü	98
5.2.7	Sonuçlar ve Tartışma	101

5.2.7.1	Soğuma Eğri Analizi.....	101
5.2.7.2	Gizli Isı	105
5.2.8	Sonuçlar	106
5.3	Kısım II: Küresel Grafitli Dökme Demirlerle Yapılan Deneysel Çalışmalar.....	107
5.3.1	Ergiyik ve Sistem Hazırlama	108
5.3.2	Isıl Analiz.....	111
5.3.3	Mikroyapı Analizi.....	112
5.3.3.1	Numune Hazırlama.....	112
5.3.3.2	Zımparalama	112
5.3.3.3	Parlatma ve Dağlama	112
5.3.3.4	Görüntü Analizi	112
5.3.3.5	Grafit Karakterizasyonu.....	113
5.3.3.6	Ferrit ve Perlit Yüzdesi.....	114
6.	DENEYSEL SONUÇLAR.....	115
6.1	Isıl Analiz.....	129
6.1.1	Ötektik Bölgesi	129
6.1.2	Ötektoid Bölgesi	130
6.2	Mikroyapı Analizi.....	132
6.2.1	Grafit Karakterizasyonu.....	132
6.2.2	Ferrit ve Perlit Yüzdesi.....	135
6.3	Gizli Isı	138
7.	SONUÇLAR.....	143
8.	KAYNAKLAR.....	145
9.	ÖZGEÇMİŞ.....	150

SİMGE LİSTESİ

A	Yüzey alanı
c	Özgül ısı
C _p	Özgül ısı
C	Bir katsayı
Gr	Grafit
h	konveksiyon ısı transfer katsayısı
L	Gizli ısı
L	Sıvı
M	Modül
M _{küçük}	Küçük modül
M _{orta}	Orta modül
M _{büyük}	Büyük modül
n	Veri sayısı
Q _L	Katılma ısı
Sc	Doymuşluk derecesi
α	Ferrit
α	Bir katsayı
γ	Östenit
t ₀	Katılma başlangıç zamanı
t _s	Katılma zamanı
Δt	Zaman farkı
T	Sıcaklık
T _∞	Oda sıcaklığı
V	Hacim
ρ	Yoğunluk

KISALTMA LİSTESİ

A/D	Analog/ Dijital
AFS	American Foundry Society
ASM	American Society of Materials
ASTM	American Standarts for Testing of Materials
BCIRA	British Cast Iron Association
CA-DTA	Bilgisayar Destekli Diferansiyel Isıl Analiz
CE	Karbon Eşdeğeri
CEL	Karbon Eşdeğer Sıvıgeni
CG	Sıkışık Grafit
DDK	Küresel Grafitli Dökme Demir
DSC	Diferansiyel Tarama Kalorimetresi
DTA	Diferansiyel Isıl Analiz
EDX	Enerji Dağıtıcılı X-Işını Spektrometresi
FG	Lamel Grafit
ISO	International Standard Organization
IPTS	International Practical Temperature Scale
KGDD	Küresel Grafitli Dökme Demir
LPG	Sıvılaştırılmış Petrol Gazı
SG	Küresel Grafit
TG	Temper Grafit
TAL	Östenit Sıvıgen Sıcaklığı
TEU	Ötektik Aşırı Soğuma Sıcaklığı
TER	Ötektik Tutulmanın Maksimumu
TES	Ötektik Katılaşmanın Sonu Sıcaklığı
XRD	X-Işını Toz Difraksiyonu

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1	Fe-C kararlı(kesik çizgi) ve Fe-Fe ₃ C yarı kararlı(sürekli çizgili) faz diyagramı (Suarez, 2000).	4
Şekil 2.2	Genel ticari dökme demirleri elde etmek için temel işlem ve mikroyapılar (ASM Handbook, 1992).	6
Şekil 3.1	Metal üretim kontrolünün önemli ilk adımları (Labrecque ve Gagne, 1998).	11
Şekil 3.2	Küresel grafitli dökme demir üretiminin şematik akış diyagramı (Labrecque ve Gagne, 1998).	13
Şekil 3.3	Küresel grafitli dökme demir üretiminde açık pota yöntemi (Brown, 1994)	17
Şekil 3.4	Küresel grafitli dökme demir üretiminde sandiviç yöntemi (Brown, 1994).	18
Şekil 3.5	Çift alaşım bölmeli kapaklı tandiş potasının şematik gösterimi (Elkem, 1997). ...	18
Şekil 3.6	Küresel grafitli dökme demir üretiminde daldırma yöntemi (Brown,1994).	19
Şekil 3.7	Küresel grafitli dökme demir mikroyapılarında aşılamanın etkileri(250x) (a) aşılammış K.G.D.D., (b) yetersiz aşılammış K.G.D.D, (c) iyi aşılammış K.G.D.D, (d) etkisi kaybolmuş aşılama, (Labrecque ve Gagne, 1998).	23
Şekil 3.8	Standart küre sayılarını gösteren mikro fotoğraflar (Mullins, 2003).	25
Şekil 3.9	Farklı küresellikte küresel grafitli demirlerin mikroyapısı. (a) %99 küresellik, (b) %80 küresellik (c) %50 küresellik. Hepsi dağlanmamış. 36x (ASM Handbook, 1992)	26
Şekil 3.10	Ötektik altı küresel grafitli dökme demirin katılaşma sırasının şematik gösterimi. (a) silisyumun eş düzlem kesitinde katılaşmanın yolu, (b) soğuma eğrisi (Lesoult vd, 1998).	27
Şekil 3.11	Katı bir daire içinde kürenin eşsıl büyümesi ve bir düzgün arayüzeyle halenin büyümesi (a) ötektik öncesi faz katılaşması: sıvı ile temastaki kürenin büyümesi (b) ötektik katılaşma: hale çevrelemesi, (c) katı hale içinde kürenin büyümesi (Labrecque ve Gagne, 1998).	27
Şekil 3.12	Ötektik üstü küresel grafitli dökme demirin katılaşma sırasının şematik gösterimi. (a) silisyumun eş düzlem kesitinde katılaşmanın yolu, (b) soğuma eğrisi (Lesoult vd, 1998).	29
Şekil 3.13	Demirin küreselleştirme ve aşılamasından sonra karışık sülfid ve oksit fazları içeren bir çekirdek parçacığının şematik gösterimi (Skaland, 2001).	30
Şekil 3.14	Östenit –grafit ötektiğinde meydana gelen şematik grafit çeşitleri. (a) lamel grafit, (b)sıkışık grafit, (c) mercan grafit, (d) küresel grafit (ASM Handbook, 1992).	31
Şekil 3.15	Küreleştirici ile işlem görmüş sıvı demirde grafit oluşumunun şematik gösterimi (Itofuji ve Masutani, 2001).	32
Şekil 3.16	Ötektoid dönüşüm modelleri: (I) α/γ ara yüzeyinde perlit çekirdeklenmesi; (II) γ/γ ve Gr/γ ara yüzeyinde perlit çekirdeklenmesi (Guo ve Stefanescu, 1997)	33
Şekil 3.17	Fe-C-Si katılaşma diyagramının kararlı Fe- grafit ötektik bölgesi (Labrecque ve Gagne, 1998).	34
Şekil 3.18	Küresel grafitli dökme demirler için tipik karbon ve silisyum alanları (ASM Handbook, 1992).	35
Şekil 4.1	Ergimiş metal işleminin kontrol yöntemleri ve istekleri (Frost vd,1992).	41
Şekil 4.2	Soğuma eğrilerinin analizinden bilgisayar vasıtasıyla elde edilebilir tipik bilgiler (Frost vd.,1992).	44
Şekil 4.3	Gri ve beyaz dökme demirin soğuma eğrileri(Ekpoom ve Heine, 1981).	45
Şekil 4.4	Beyaz temperdökme demirin soğuma eğrisi ve onun türev eğrisi (Ekpoom ve Heine, 1981).	46
Şekil 4.5	Bir soğuma eğrisi ve onun ters oran eğrisi ile ilişkisi (Ekpoom vd., 1981).	47
Şekil 4.6	Diferansiyel ısıl analiz cihazının temel yapı şeması. T _n standart sıcaklığı, T _s numune sıcaklığı ve T _f ocak sıcaklığı (ASM Handbook, 1988).	49

Şekil 4.7	Dökme demir için Newtonian sıfır eğrisi: $dT/dt = A.e^{(Bt)}$ den tahmin edilmiş A ve B değerleri (sırasıyla $-2,253^{\circ}C/s$, $-0,003^{\circ}C/s$)dir (Fras vd., 1993).	54
Şekil 4.8	$\nabla^2 T$ 'nin belirlenmesi için kullanılan sıcaklık alanının şematik gösterimi (Fras vd., 1993).	55
Şekil 4.9	(a) gri dökme demir, (b) beyaz dökme demir ve (c) benekli dökme demir için tipik soğuma eğrileri (Maijer vd, 1998).	61
Şekil 4.10	Tipik ötektik altı demirin soğuma eğrisi ve onun türevleri (Labrecque ve Gagne, 1998).	62
Şekil 4.11	Tipik ötektik küresel grafitli dökme demir soğuma eğrisi ve türev eğrileri (Fung vd., 1990)	64
Şekil 4.12	Ötektik üstü küresel grafitli dökme demirin(SG) ve sıkışık grafitli dökme demirin(CG) soğuma eğrileri (ASM Handbook, 1992).	64
Şekil 4.13	Ötektik üstü dökme demir için soğuma eğrisi ve onun 1. ve 2. türevleri (Chen ve Stefanescu, 1984).....	65
Şekil 4.14	Ötektikaltı bileşimde ısı hesaplaması için CA-DTA'nın örneği (Labrecque ve Gagne, 1998).....	66
Şekil 4.15	İki kaynaktan, (a) Monroe ve Bates (1982), (b) Chen ve Stefanescu (1984), alınmış gri, küresel ve sıkışık grafitli dökme demirler için şematik soğuma eğrileri (Labrecque ve Gagne, 1998).	70
Şekil 4.16	CE=3,87-4,06'lı ötektik altı dökme demirler için parlamanın maksimum oranı ve küresellik arasındaki ilişki (Labrecque ve Gagne, 1998).	72
Şekil 4.17	Ergitme ve işlem proseslerinin her bir aşamasından alınmış soğuma eğrileri (Labrecque ve Gagne, 1998).	73
Şekil 4.18	Ötektoid dönüşüm sıcaklığında alaşım elementlerinin etkileri (Gowri vd, 1998). 77	
Şekil 4.19	Küresel grafitli dökme demirin ötektoid dönüşümünün soğuma eğrileri ve gradyent ΔT (işlemden önce) (Bauer, 1998).	78
Şekil 4.20	Ötektoid dönüşümün perlit miktarı ile ilişkisi (ATAS, 1998)	78
Şekil 4.21	İki farklı soğuma hızında soğutulmuş ferritik küresel grafitli dökme demirin soğuma eğrileri ve birinci türevleri, (a) $0,2^{\circ}C/s$, (b) $0,4^{\circ}C/s$ (Guo ve Stefanescu, 1997).	79
Şekil 4.22	İki farklı soğuma hızında soğutulmuş perlitik küresel grafitli dökme demirin soğuma eğrileri ve birinci türevleri, (a) $0,2^{\circ}C/s$, (b) $0,4^{\circ}C/s$ (Guo ve Stefanescu, 1997).	80
Şekil 4.23	Çekme çeşitleri, (a) dıştan çökme, (b) makro çekme, (c)mikro çekme ve gözeneklilik (Novacast, 1997).	82
Şekil 4.24	Soğuma eğrisi üzerinde çekme çeşitlerinin oluşum bölgeleri (Sillen, 2002).....	83
Şekil 4.25	Gri dökme demir alaşımları için uygun soğuma eğrisi (ATAS, 1994).	87
Şekil 4.26	Küresel grafitli dökme demir için uygun soğuma eğrisi (ATAS, 1994).....	88
Şekil 5.1	Ergitmede kullanılan indüksiyon ocağı	91
Şekil 5.2	Yüksek sıcaklık ısı çifti.....	91
Şekil 5.3	LPG veya doğal gazla çalışabilen pota ısıtma sistemi	92
Şekil 5.4	Daldırma çanı düzeneği	92
Şekil 5.5	Deney sisteminin fotoğrafı.....	92
Şekil 5.6	Küçük ve orta modüllü numunelerin soğuma eğrileri ve birinci türev eğrisinden Δt 'nin belirlenmesi.....	96
Şekil 5.7	Küçük modüllü numunenin yeni soğuma eğrisi ve orta modüllü numunenin soğuma eğrisi	97
Şekil 5.8	Bu çalışmada kullanılan deneysel sistem.....	100
Şekil 5.9	Kullanılan üç farklı modüllü kabın enine kesitleri; a) büyük, b) orta ve c) küçük kap.....	101
Şekil 5.10	Küçük modüllü kap için soğuma eğrisi ve birinci türev eğrisi	103

Şekil 5.11	Orta modüllü kap için soğuma eğrisi ve birinci türev eğrisi.....	103
Şekil 5.12	Büyük modüllü kap için soğuma eğrisi ve birinci türev eğrisi	103
Şekil 5.13	a) küçük, b) orta, ve c) büyük modüllü numunelerin mikroyapıları;1)birincil alüminyum, 2) Al ₅ FeSi, 3)silisyum, 4)Al ₁₅ (Fe,Mn) ₃ Si ₂ ve 5)masif Al ₂ Cu (100x)	104
Şekil 5.14	Sırasıyla küçük,orta ve büyük modüle göre odaklanmış ikincil fazlar bölgesi. ..	104
Şekil 5.15	Orta modüllü numunenin birinci türevi ve Newtonian sıfır eğrisi.....	105
Şekil 5.16	Orta modüllü kabın birinci türevi ve yeni yöntemden elde edilmiş sıfır eğrisi. ..	106
Şekil 5.17	Bu çalışmada kullanılan deneysel sistem; dökümden önce ve sonraki fotoğraf..	109
Şekil 5.18	Deneylerde kullanılan üç farklı modüllü kapların üstten görünüşü: a)Mküçük=0,43cm, b) Morta=0,53cm, ve c) Mbüyük=0,60cm'lik kaplar.....	109
Şekil 5.19	Görüntü analizinde dağlanmamış numune üzerinde grafit özelliklerinin belirlenmesi.....	114
Şekil 5.20	Görüntü analizinde dağlanmış numune üzerinde ferrit alanın tespiti.	114
Şekil 6.1	1, 2 ve 3 nolu numunelerin soğuma eğrileri ve 1.türev eğrileri.	116
Şekil 6.2	1, 2 ve 3 nolu numunelerin mikroyapısı(100x).....	116
Şekil 6.3	1, 2 ve 3 nolu numunelerin soğuma eğrileri ve ters oran eğrileri.	116
Şekil 6.4	4, 5 ve 6 nolu numunelerin soğuma eğrileri ve 1.türev eğrileri.....	117
Şekil 6.5	4, 5 ve 6 nolu numunelerin mikroyapısı(100x).....	117
Şekil 6.6	4, 5 ve 6 nolu numunelerin soğuma eğrileri ve ters oran eğrileri.	117
Şekil 6.7	7, 8 ve 9 nolu numunelerin soğuma eğrileri ve 1.türev eğrileri.	118
Şekil 6.8	7, 8 ve 9 nolu numunelerin mikroyapısı(100x).....	118
Şekil 6.9	7, 8 ve 9 nolu numunelerin soğuma eğrileri ve ters oran eğrileri.	118
Şekil 6.10	10, 11 ve 12 nolu numunelerin soğuma eğrileri ve 1.türev eğrileri.	119
Şekil 6.11	10, 11 ve 12 nolu numunelerin mikroyapısı(100x).....	119
Şekil 6.12	10, 11 ve 12 nolu numunelerin soğuma eğrileri ve ters oran eğrileri.	119
Şekil 6.13	13, 14 ve 15 nolu numunelerin soğuma eğrileri ve 1.türev eğrileri.	120
Şekil 6.14	13, 14 ve 15 nolu numunelerin mikroyapısı(100x).....	120
Şekil 6.15	13, 14 ve 15 nolu numunelerin soğuma eğrileri ve ters oran eğrileri.	120
Şekil 6.16	16, 17 ve 18 nolu numunelerin soğuma eğrileri ve 1.türev eğrileri.	121
Şekil 6.17	16, 17 ve 18 nolu numunelerin mikroyapısı(100x).....	121
Şekil 6.18	16, 17 ve 18 nolu numunelerin soğuma eğrileri ve ters oran eğrileri.	121
Şekil 6.19	19, 20 ve 21 nolu numunelerin soğuma eğrileri ve 1.türev eğrileri.	122
Şekil 6.20	19, 20 ve 21 nolu numunelerin mikroyapısı(100x).....	122
Şekil 6.21	19, 20 ve 21 nolu numunelerin soğuma eğrileri ve ters oran eğrileri.	122
Şekil 6.22	22, 23 ve 24 nolu numunelerin soğuma eğrileri ve 1.türev eğrileri.	123
Şekil 6.23	22, 23 ve 24 nolu numunelerin mikroyapısı(100x).....	123
Şekil 6.24	22, 23 ve 24 nolu numunelerin soğuma eğrileri ve ters oran eğrileri.	123
Şekil 6.25	25, 26 ve 27 nolu numunelerin soğuma eğrileri ve 1.türev eğrileri.	124
Şekil 6.26	25, 26 ve 27 nolu numunelerin mikroyapısı(100x).....	124
Şekil 6.27	25, 26 ve 27 nolu numunelerin soğuma eğrileri ve ters oran eğrileri.	124
Şekil 6.28	28, 29 ve 30 nolu numunelerin soğuma eğrileri ve 1.türev eğrileri.	125
Şekil 6.29	28, 29 ve 30 nolu numunelerin mikroyapısı(100x).....	125
Şekil 6.30	28, 29 ve 30 nolu numunelerin soğuma eğrileri ve ters oran eğrileri.	125
Şekil 6.31	31, 32 ve 33 nolu numunelerin soğuma eğrileri ve 1.türev eğrileri.	126
Şekil 6.32	31, 32 ve 33 nolu numunelerin mikroyapısı(100x).....	126
Şekil 6.33	31, 32 ve 33 nolu numunelerin soğuma eğrileri ve ters oran eğrileri.	126
Şekil 6.34	34, 35 ve 36 nolu numunelerin soğuma eğrileri ve 1.türev eğrileri.	127
Şekil 6.35	34, 35 ve 36 nolu numunelerin mikroyapısı(100x).....	127
Şekil 6.36	34, 35 ve 36 nolu numunelerin soğuma eğrileri ve ters oran eğrileri.	127
Şekil 6.37	Farklı dökümlerde modüle göre TEU'nun değişimini gösterir.....	129
Şekil 6.38	Farklı dökümlerde modüle göre TER'in değişimini gösterir.....	130
Şekil 6.39	Üç dökümde modül ile küre sayısı arasındaki ilişki	132

Şekil 6.40	Üç dökümde modül ile ortalama grafit çapı arasındaki ilişki.....	133
Şekil 6.41	Üç dökümde modül ile küreselleşme oranı arasındaki ilişki	133
Şekil 6.42	Üç dökümde modül ile grafit yüzdesi arasındaki ilişki.	134
Şekil 6.43	Üç dökümde modül ile ferrit yüzdesi arasındaki ilişki.	136
Şekil 6.44	Üç dökümde modül ile perlit yüzdesi arasındaki ilişki.....	136
Şekil 6.45	Chen ve Stefanescu'nun (1984) yöntemiyle orta modüllü kabın birinci türevi üzerinden sıfır eğrisinin belirlenmesi.....	139
Şekil 6.46	Malherios ve Riberio'nun (1999) yöntemiyle sıfır eğrisinin orta modüllü kabın birinci türevi üzerinden belirlenmesi.	139
Şekil 6.47	Yeni yöntemle orta modüllü kabta birinci türevden sıfır eğrisinin belirlenmesi.	139
Şekil 6.48	1.,8. ve 10. döküm için yeni yöntemle hesaplanmış gizli ısı değerleri, CE ve modül ilişkisi.....	141
Şekil 6.49	Üç dökümde gizli ısı ve modül ilişkisi	141



ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 2.1	Tipik alaşımsız dökme demirler için bileşimlerinin alanı(Engineered Casting Solutions, 2001).	6
Çizelge 3.1	Tipik Mg küreselleştirme alaşımları ve kullanılan işlem yöntemleri(Labrecque ve Gagne, 1998).	17
Çizelge 3.2	Küresel grafitli dökme demir için bazı ferrosilisyum esaslı aşılaiıcıların bileşimleri(Labrecque ve Gagne, 1998).	22
Çizelge 4.1	Soğuma eğrisi tipik sıcaklık noktaları(Labrecque ve Gagne, 1998).....	63
Çizelge 4.2	Soğuma eğrilerinin birinci ve ikinci türevlerinin tipik noktaları(Labrecque ve Gagne,1998).....	63
Çizelge 4.3	Soğuma eğrisinin tipik noktaları, sıvı demirin işlemi, CE ve demir çeşidi arasındaki ilişkiler(Labrecque ve Gagne, 1998).	71
Çizelge 4.4	Soğuma eğrileri tipik sıcaklıklarında küreleştirici etkileri hakkında Zhu ve Smith' in sonuçlarının özeti(Labrecque ve Gagne, 1998).	74
Çizelge 4.5	Eşitlik 4.32'deki göstergeç değişkenlerin "a" katsayıları (Labrecque ve Gagne,1998).	76
Çizelge 4.6	IPTS 68 ve IPTS 48 arasında hataları ve IPTS 48 ısı çiftleri IPTS 68 cihazı ile kullanılırsa eğer var olacak sıcaklık farklarını gösterir(Shaw ve Blatzer, 2002).90	
Çizelge 5.1	Test numune bileşimi	100
Çizelge 5.2	380 alaşımının reaksiyon sıcaklıklarında modülün etkisi	102
Çizelge 5.3.	Gizli ısı değerlerinin karşılaştırılması (kJ/kg).....	105
Çizelge 5.4	Küresel grafitli dökme demir üretimi için kullanılan malzemelerin bileşimi .	108
Çizelge 5.5	Şarjlarda kullanılan şarj içerik yüzdeleri.....	110
Çizelge 5.6	Dökümlerde elde edilen kimyasal bileşimler ve karbon eşdeğerleri.....	110
Çizelge 6.1	Soğuma eğrileri ve 1.türevlerinden elde edilen ısı analiz parametreleri.....	128
Çizelge 6.2	Ters oran eğrilerinden elde edilen dönüşüm sıcaklıkları	131
Çizelge 6.3	Görüntü analizi ile mikroyapılardan elde edilen faz yüzdeleri ve grafit özellikleri.....	134
Çizelge 6.4	Görüntü analizi ile yüksek Cr'lu dökümün mikroyapılarından elde edilen faz yüzdeleri ve grafit özellikleri	135
Çizelge 6.5	Bilgisayar destekli diferansiyel analizinde yeni yöntemle hesaplanan gizli ısılar.....	140
Çizelge 6.6	Gizli ısı değerlerinin karşılaştırılması (cal/g).....	140

ÖNSÖZ

Her bir ergiyik kendine has metalurjik özelliklere sahiptir. Soğuma eğrisi bu özelliklerin göstergesi olan bir eğridir. Kısaca buna o ergiyik için metalurjik parmak izi diyebiliriz. Dolayısıyla bu parmak izi çeşitli yöntemlerle analiz edildikten sonra mikroyapı ile ilişkisi belirlenerek dökümün özellikleri tahmin edilebilir. Dökümün özellikleri esasen mikroyapıya bağlıdır. Mikroyapı da alaşım içeriği ,metal işlemi ve soğuma hızına bağlı olduğundan, bu faktörlerin parmak izindeki etkileri önem taşımaktadır. Bu noktadan hareketle dökme demirlerde ısı analiz yöntemiyle yapı belirlenmesi için yeni üç farklı modüllü bir sistem kullanarak araştırma yapılmıştır. Bu sistem yardımı ile dökümden önce ergiyiğin kalitesinin belirlenebileceği, gerekirse sıvı metale müdahale edilerek karışık parçaların hatasız üretilebileceği düşünülmektedir.

Bu tez çalışmasının hazırlanmasında, teşvik ve yapıcı tenkitleri ile destek olan hocam sayın Prof.Dr. Nihat G.Kınikoğlu'na, ısı analizde kullandığım yazılım programının hazırlanmasındaki yardımlarından dolayı Yrd.Doç.Dr. Tuncay Uzun'a, dökümlerin gerçekleştirilmesinde yardım eden araştırma görevlisi ve teknisyen arkadaşlara ve tezimin hazırlanmasındaki maddi ve manevi desteklerinden dolayı tüm araştırma görevlisi arkadaşlara ve aileme teşekkürlerimi sunarım.

ÖZET

Küresel grafitli dökme demirler mükemmel mekanik özellikleri ile endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte, küresel grafitli dökme demirin istenilen kalitede küresel grafit yapısını elde etmek için ergiyik işlem aşaması, özel dikkati gerektirir. Grafit oluşumunda döküm parçasındaki modül değişiminin etkisi bilhassa önemlidir.

Isıl analiz döküm endüstrisinde mikroyapı ve grafit oluşumunu kontrol için kullanılan önemli takımlardan bir tanesidir. Önceden kullanılan tek kap ısı analiz sistemleri mikroyapıda modül etkilerini dikkate almaz. Bu çalışmada, Al-Si alaşımları için ve küresel grafitli dökme demirler için farklı modüllü üç kaplı ısı analiz sistemi kullanılmıştır.

Buna ek olarak, çalışmada soğuma eğrilerinin analizi için gerekli olan gizli ısının hesaplanması için yeni sıfır eğrileri önerilmiş ve kullanılmıştır. Önerilen sıfır eğrilerinden elde edilen gizli ısıların önceki çalışmalardan elde edilmiş değerlere uyduğu bulunmuş ve önerilen sıfır eğrisi elde etmenin yöntemi önceki bazı çalışmalardan daha iyi olduğu bulunmuştur.

Bu çalışmada kullanılan, döküm mikroyapılarının modüle bağlı çok kaplı ısı analizinin, Al-Si alaşım dökümleri ve küresel grafitli dökme demir dökümler için faydalı bir takım olabileceği düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Isıl analiz, modül, sıfır eğrisi, mikroyapı, küresel grafitli dökme demir.

ABSTRACT

Ductile irons with their superior mechanical properties are used extensively by the industry. However, melt treatment step of the production to obtain the necessary spherical graphite structure of the ductile iron needs special care in order to achieve the required quality castings. Especially the effect of the modulus variation of the casting on the graphite formation is important.

Thermal analysis is one of the important tools used to control microstructure and graphite formation in the foundry industry. Previously used single cup thermal analysis systems do not consider the effect of the modulus on the microstructure. In this study thermal analysis with three cups with different modulus is used for Al-Si alloys and for ductile irons.

In addition, new zero curves, for the calculation of latent heat that is necessary for the analysis of the cooling curves has been proposed and used. Latent heats obtained from the proposed zero curves found to be coinciding with the data obtained from previous studies and the method of obtaining zero curve was found to be better than some earlier studies.

Proposed modulus dependent, multiple cups thermal analysis of the casting microstructures, used in this study, might be a useful tool for the Al-Si alloy castings and ductile iron castings.

Keywords: Thermal analysis, modulus, zero curve, microstructure, ductile iron.

1. GİRİŞ

Dökme demirlerin ana alaşım elementleri karbon ve silisyumdur. Onlardaki karbon içeriği normal olarak %2,5- 4 alanındadır. Dökme demir ergiyiklerinin katılma özellikleri karbon eşdeğeri CE ($CE = \%C + \%Si/3$) vasıtasıyla büyük ölçüde tanımlanır ($CE=4.26$ ikili ötektik bileşim için). $CE < 4.26$ için alaşımlar ötektikaltı alaşımlar ve $CE > 4.26$ için alaşımlar ötektiküstü olarak bilinir. Gri dökme demirlerin büyük miktarı ötektikaltı bileşimdedir ve küresel grafitli dökme demirinki ise ötektiküstü bileşimdedir (Vijayaraghanan, 1996).

Soğuma hızı ve varolan elementlerin çeşidine bağlı olarak, katılma kararlı demir-karbon (grafit) sistemine (Fe-C) göre ya da yarı kararlı demir-sementit sistemine (Fe-Fe₃C) göre meydana gelir. Kararlı sistemde ötektik reaksiyonun ürünleri östenit (γ) ve grafit ($L \rightarrow \gamma + Gr$) ve yarı kararlı sistemde östenit ve sementittir ($L \rightarrow \gamma + Fe_3C$) (Mirle, 1998).

Dökme demirin ergimiş metal işleminde anahtar konu daha yüksek sıcaklıkta meydana gelen kararlı ötektik reaksiyonu teşvik etmek ve grafitin istenilen şekilde ergiyikten karbon çökmesini garanti etmektir. Yüksek kaliteli dökme demirin üretimi için elde edilebilir işlem çerçevesini tanımlayan, kararlı ve yarı kararlı reaksiyonlar arasında sıcaklık aralığının ölçüsüdür (Vijayaraghanan, 1996).

Dökme demirler endüstriyel işlem uygulaması ve sonuçlanan mikroyapıya bağlı olarak, beyaz dökme demir, gri dökme demir, küresel grafitli dökme demir, sıkışık (compact) dökme demir ve temper dökme demir şeklinde sınıflandırılabilir. Küresel grafitli dökme demirde grafitler küreler halindedir. Bu sıvı gri dökme demire Mg veya Ce metal ve alaşımlarının pek az miktarda ilavesi ile gerçekleştirilir (Ersümer, 1981). Magnezyum, karbür ötektik reaksiyonunu teşvik eder. Magnezyum işlemlenmiş dökme demirin son aşılması istenilen küresel grafit şekli ile karbürsüz bir mikroyapı elde etmek için esastır.

Küresel grafitli dökme demir otomotiv, tarım, inşaat ve ağır iş parçaları içinde kullanılır. Bu tür, dökme demir ailesi içinde en iyi özelliklere sahiptir. Küre olarak grafitin varlığı büyük ölçüde sünekliliği ve tokluğu artırır. Bununla birlikte mukavemet değerleri de yüksektir. Mukavemet değerleri matris yapısında bulunan fazlardan gelişir. Böylece farklı uygulamalar için küresel grafitli dökme demirin çeşitli türleri matris yapısının kontrolüyle üretilir (Gowri vd., 1998).

Matris yapının oluşumu ötektoid dönüşüm alanından çeşitli alaşım elementleri ve soğuma hızının varlığı ve miktarı tarafından etkilenir. Bu alanın miktarı silisyum ve diğer elementlerin

varlığına bağlıdır. Çok yavaş soğuma hızı ve silisyum, nikel gibi elementler ferrit oluşumunu destekler. Hızlı soğuma ve bakır, kalay, mangan, nikel, krom gibi elementler perlit oluşumunu destekler (Gowri vd., 1998).

Soğuma hızı dökümün modülü, kalıp malzemesi ve kalınlığı gibi kalıp özellikleri, kalıpta harcanan döküm zamanı ve herhangi bir dış soğuma şartları vasıtasıyla belirlenir. Isıl analiz için ticari kaplar kum dökümde yaklaşık 13-15 mm kesit kalınlığı ile karşılaştırılır sadece orta bir katılma hızına sahiptir. Bu kimyasal bileşim değerlendirmesi için ihtiyaç duyulan TAL'ın güvenilir ortaya konmasının garanti eder ve numune döküm sıcaklığının değişimleri için ölçümleri nispeten duyarsız yapar (Bauer, 1998).

Her bir kesit kalınlığı tam olarak hatasız dökümlerin yapılabildiği en uygun döküm sıcaklık alanı ve bileşimine sahiptir. Bir dökümde kesit kalınlığında büyük farklar var olduğu zaman sorun çıkabilir. Böyle dökümler fazladan çaba ile hatasız yapılabilmektedir (Rio Tinto Iron, 2000).

Katılma ya da katı faz dönüşümü esnasında ortaya çıkan gizli ısının miktarı ile dökümün son mikroyapısının ilişkili olduğu kabul edilir. Bu yüzden ısıl analiz cihazı yeterince hassas ise dökümün katılması ve soğuması esnasında mikroyapısal değişimi takip edilebilir (Malheiros ve Riberio, 1999).

Alaşımın bilgisayar destekli soğuma eğri analizi alaşımın bileşimi, katılma gizli ısısı, katı kesitinin gelişimi, katılma fazların çeşitleri ve miktarları ve dendrit varlığı hakkında bilgi sağlamaktadır. Dendrit kolları arası uzaklık, alüminyum alaşımlarında modifikasyon ve tane inceltmenin derecesi önemlidir. Dökme demirlerde grafit şekli ve küreselliğin derecesi ve östemperlenmiş küresel grafitli dökme demir yapılar, ısıl işlem çevrimleri soğuma eğrisinin analizi ile belirlenebilir. Dökümhanelerde işlem kontrolü için soğuma eğrilerinin kullanımı çok yaygındır (Barlow ve Stefanescu, 1997).

Dökme demirin çeşidi ve kesit ölçüsü bileşim ve şarj ile ilişkilidir. Bununla birlikte, karışık dökümler için özellikle kesit ölçüsü ve bileşimin ilişkisini araştırmak için her hangi bir online kontrol yöntemi yoktur. Dökümhane verimliliğini, ürün kalitesini artırmak ve ısıl işlem fiyatlarından kaçınmak için normal döküm mikroyapısını tahmin etmek ve elde etmek hedefidir.

Modülün etkisini değerlendirmek ve farklı modüllü parçalar içinde katılma davranışını incelemek için farklı modüllü ısıl analiz numunelerinin kullanımı geliştirilebilir. Karışık bir dökümü üretmek için online modül ve bileşimin ilişkisini hızlı veren güvenilir vasıtalara

ihtiyaç vardır. Ötektik ve ötektoid bölgede soğuma eğri analizini yapmak için yeni bir ısı analiz sistemi uygulandı. Modül ve soğuma eğrileri arasındaki ilişkiler laboratuvar şartlarında değişik bileşimler için tespit edildi. Gizli ısıyı gösteren eğrilerden orta modüllü kabın daha uygun olduğu yeni bir yöntem belirlendi. Dünyada eş ergiyik ve döküm işlemlerine sahip olan iki küresel grafitli dökme demir dökümhanesi yoktur. Ana metal, eritme uygulaması, Mg-ışlemi, işlem sıcaklıkları, işlem zamanları, aşıl原因ıcılar, kalıp malzemeleri v.b.'nin seçiminde farklılıklar vardır. Bütün tecrübeli dökümhaneciler, tüm bu etkenlerin mekanizmalarını ve döküm üzerinde bir etkiye sahip olduğunu bilirler (Wessen vd., 1999). Bu nedenle her işlemin kontrolü gereklidir. Buda daha gelişmiş ısı analiz sistemleri ile başarılabilir.

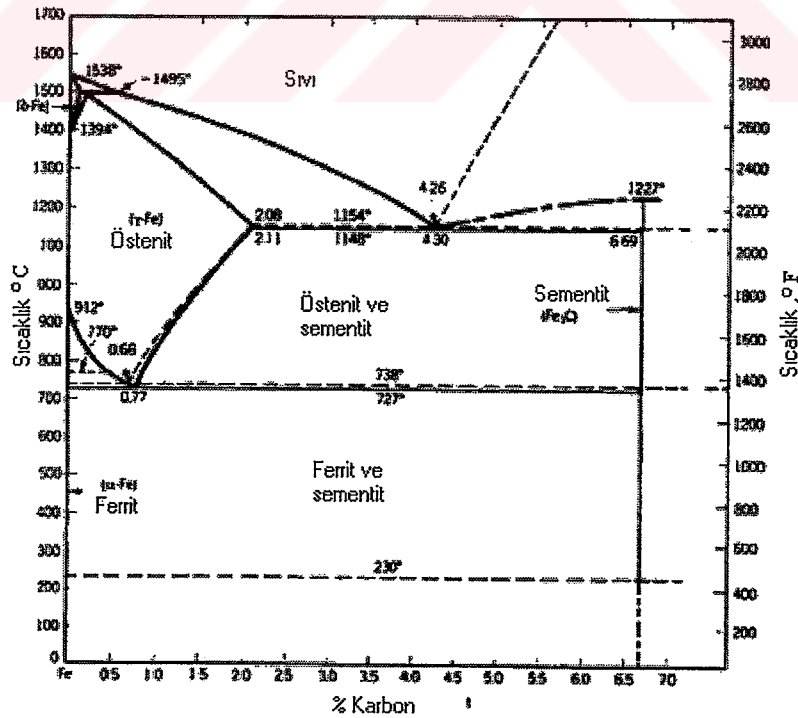


2. DÖKME DEMİRLER

2.1 Genel Özellikler

Dökme demirlerin özellikleri geniş bir aralıkta değişir ve adından da anlaşılacağı gibi istenilen şekle katı halde işlenerek değil dökülerek getirilir. Çoğunlukla %1 den az karbon içeren çeliklerin aksine dökme demirler normal olarak %2- 4 karbon ve %1- 3 silisyum içerirler. Bazı özellikleri denetlemek ve değiştirmek için bileşimde diğer alaşım elementleri de bulunabilir.

Dökme demirler mükemmel döküm alaşımlarıdır çünkü kolaylıkla ergitilirler, sıvı halde çok akışkandırlar ve katılaşırlarken istenilmeyen yüzey filmi oluşturmazlar. Dökme demirler katılaşırlarken ve soğurken çok az veya orta derecede büzülme gösterirler. Bu alaşımların dayanım ve sertlikleri geniş bir aralıkta değişir ve çoğunlukla kolay talaşlı işlenebilirler. Alaşımlanarak üstün yıpranma, aşınma, korozyon dayanımına sahip olabilirler. Buna rağmen dökme demirler nispeten düşük darbe dayanımına ve sünekliğe sahiptir ve bu onların uygulama alanlarını daraltmaktadır. Dökme demirlerin bu kadar yaygın olarak sanayide kullanılmalarının nedeni nispeten ucuz ve geniş bir mühendislik malzemesi özellik aralığına sahip olmalarıdır (Smith, 1996). Şekil 2.1 Fe-C ve Fe-Fe₃C diyagramlarını gösterir.



Şekil 2.1 Fe-C kararlı(kesik çizgi) ve Fe-Fe₃C yarı kararlı(sürekli çizgili) faz diyagramı (Suarez, 2000).

2.2 Dökme Demirlerin Sınıflandırılması

Tarihsel olarak, dökme demirin birinci sınıflandırması onun kırılma yüzeyine dayandırılır. Demirin iki çeşidi ilk olarak aşağıdaki gibi tanımlandı:

- Beyaz Dökme Demir: Beyaz kristalli bir yüzey gösterir çünkü kırılma demir karbür tabakaları boyunca meydana gelir; Yarı kararlı katılaşmanın(Fe_3C ötektik) sonucudur.
- Gri Dökme Demir: Gri bir kırılma yüzeyi gösterir çünkü kırılma grafit tabakaları(lamelleri) boyunca meydana gelir; Kararlı katılaşmanın(Gr ötektik) sonucudur.

Metalografinin gelişimiyle ve dökme demire uyan bilginin yapısının artması ile mikroyapısal özelliklere dayandırılan diğer sınıflandırmalar mümkün oldu:

- Grafit şekli: lamel grafit(FG), küresel grafit(SG) sıkışık grafit(CG) ve temper grafit(TG); temper grafit katı dönüşüm reaksiyonundan sonuçlanır
- Matris: Ferritik, perlitik, östenitik, martensitik, bainitik(östemperlenmiş).

Bu sınıflama dökümhaneciler tarafından nadiren kullanılır. Çok yaygın kullanılan terminoloji ticari olanlardan biridir. Birinci ayırım iki kategoride yapılmaktadır:

- Genel dökme demirler: Genel amaçlı uygulamalar için onlar alaşımsız ya da düşük alaşımlıdır.
- Özel dökme demirler: Özel uygulamalar için genellikle yüksek alaşımlıdır.

Genel dökme demirlerin elde edilmesinde son işlem aşaması kadar ticari ve mikroyapısal sınıflamanın ilişkisi Şekil 2.2'de verilir.

Özel dökme demirler yüksek sıcaklık uygulamaları, korozyon direnci ve aşınma direnci için özel özelliklere sahip olan mikroyapıları teşvik eden alaşım elementlerinin(>%3) daha yüksek içerikleri içinde esasen genel dökme demirlerden farklıdır (ASM Handbook, 1992).

2.3 Dökme Demirlerin Metalurjisi

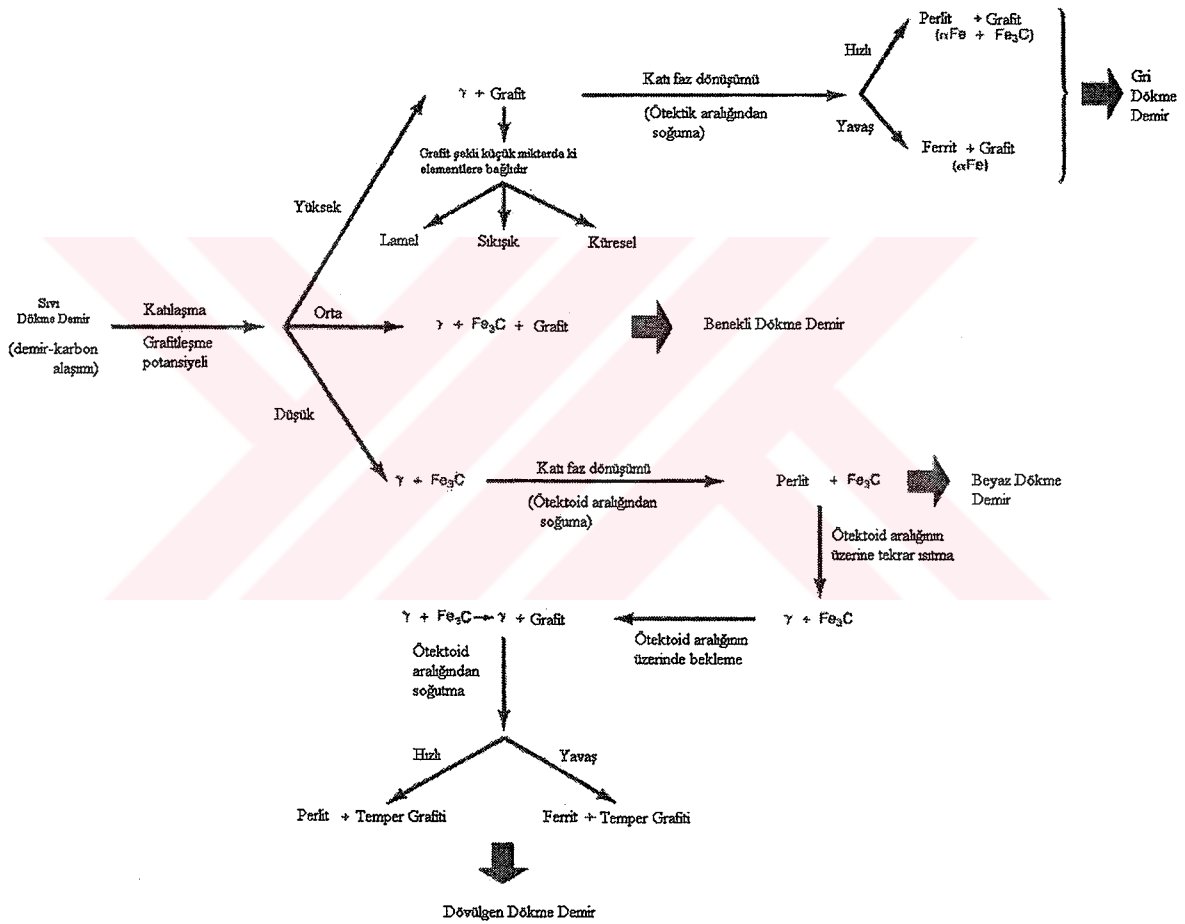
Metalurjistin amacı beklenen mekanik özelliklerde bir yapıyı üretecek bir proses dizayn etmektir. Bu yapıyı etkileyen faktörler kadar inceleme altındaki özel alaşım için yapı özellik ilişkisinin bilgisini gerektirir. Dökme demirin metalurjisi dikkate alındığında yapı üzerinde etkili olan ana faktörler aşağıda verilir:

- Kimyasal bileşim
- Soğuma hızı
- Sıvı işlemi
- Isıl işlem

Fakat dökme demirlerin kimyasal bileşimleri çakıştığından birbirlerinden sadece kimyasal bileşim çözümlemesi ile ayrılamazlar (ASM Handbook, 1992). Çizelge 2.1 beş temel dökme demirin bileşim aralıklarını vermektedir.

Cizelge 2.1 Tipik alaşımsız dökme demirler için bileşimlerinin alanı (Engineered Casting Solutions, 2001).

Dökme Demir Çeşidi	Yüzde(%)				
	Karbon	Silisyum	Mangan	Kükürt	Fosfor
Beyaz	1.8-3.6	0.5-1.9	0.25-0.8	0.06-0.2	0.06-0.2
Dövülgen (Temper Döküm)	2.2-2.9	0.9-1.9	0.15-1.2	0.02-0.2	0.02-0.2
Gri	2.5-4.0	1.0-3.0	0.2-1.0	0.02-0.25	0.02-1.0
Küresel Grafitli	3.0-4.0	1.8-2.8	0.1-1.0	0.01-0.03	0.01-0.1
Sıkışık(Compacted) Grafitli	2.5-4.0	1.0-3.0	0.2-1.0	0.2-1.0	0.01-0.1



Şekil 2.2 Genel ticari dökme demirleri elde etmek için temel işlem ve mikroyapılar (ASM Handbook, 1992).

2.3.1 Katılaşmaya Soğuma Hızının Etkisi

Demir karbon denge diyagramından (Şekil 2.1) görüldüğü gibi bu diyagram bazı şartlarda Fe- Fe_3C , bazı şartlarda Fe-Grafit denge diyagramı halindedir. Bu değişik hallere kimyasal

bileşim gibi dökümün soğuma hızı da etki etmektedir. Normal olarak dökümlerde soğuma hızına tesir eden iki faktör vardır: kalıp malzemesinin cinsi ve döküm parçasının boyutları. Bu faktörlerin etkisini matematiksel yünden en iyi gösteren Chvorinov'un aşağıdaki incelemesidir. Chvorinov, katılma zamanı t_s yi

$$t_s = B \left(\frac{V}{A} \right)^2 \quad (2.1)$$

şeklinde ifade etmiştir. Burada B katsayısı da

$$B = \left(\frac{\rho_{metal} \sqrt{\pi \alpha_{KALIP}} [L_{metal} + C_{metal} (T_D - T_1)]}{2 K_{KALIP} (T_1 - T_0)} \right)^2 \quad (2.2)$$

Olup diğer parametrelerin manaları aşağıda verilmiştir.

ρ_{metal} , ρ_{KALIP} = Metalin ve kalıbın özgül ağırlığı

α_{KALIP} = Kalıbın ısı yayma katsayısı = $(K_{KALIP}/C_{KALIP} \rho_{KALIP})$

K_{KALIP} = Kalıbın ısı iletim katsayısı

C_{metal} , C_{KALIP} = Metalin ve Kalıbın özgül ısısı

L_{metal} = Metalin ergime gizli ısısı

T_D = Döküm sıcaklığı

T_1 = Katılma sıcaklığı

T_0 = Kalıbın ilk sıcaklığı

V = Döküm parçasının hacmi

A = Döküm parçasının alanı

Chvorinov denkleminde görüleceği gibi, katılma zamanını tayin eden iki terim

$$B \text{ ve } \left(\frac{V}{A} \right)^2 \text{ dir.}$$

Katılma hızı B ile ters orantılı olduğuna göre, B'yi veren ifadede de anlaşılacağı gibi, kalıbın ısı iletim katsayısı büyüdükçe katılma hızlanmaktadır. Aksine olarak, dökülen parçanın hacmi ile alanı arasındaki oran büyüdükçe katılma yavaşlamaktadır (Dikeç, 1970).

Verilen şartlar altında sabit olan B değeri alaşım ve kalıplama malzemesinin fiziksel özelliklerine ilaveten önceden seçilmiş kalınlığa bağlıdır. Ergime gizli ısı önemli bir etkidir. Eşitlik 2.1 çelik ingotlarda katılaşmanın gelişmesi için uygun görülebilir bir sadeleştirilmiştir.

Şartlar demir dökümlerin soğuması ve katılaşması analiz edildiği zaman farklıdır. Bu proses iki ardışık olayla sadeleştirilmiştir. Sonuçta aşağıdaki bağıntı elde edilmiştir:

$$t = k.M^2[(T_y - 1150) + 250] \quad (2.3)$$

M: modül(V/A)

T_y : tamamlanmış dökümde sıvı sıcaklığı(°C)

1150: yaklaşık katılaşma sıcaklığı (°C)

250: ergime gizli ısısının sıcaklık eşdeğeri (°C) ($T = L/c$)

L: ergime gizli ısı, gri ve küresel grafitli dökme demir için yaklaşık değeri 50 cal/g.

c: özgül ısı, gri ve küresel grafitli dökme demir için yaklaşık değeri 0,2 cal/g.°C.

k: verilen şartlar altında sabit, kum kalıba dökülmüş küresel grafitli dökme demir için 0,086dak/cm².°C.

Bu değiştirilmiş bağıntının çok daha doğru olduğuna inanılır (Karsay, 1981).

3. KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİR

3.1 Giriş

İlk kez Amerikan Dökümcüler Cemiyetinin 7 Mayıs 1948' deki yıllık toplantısında H. Morrogh tarafından döküm endüstrisi için yeni bir malzeme olarak tanıtılmıştır. Birbirinden bağımsız olarak İngiltere'de British Cast Iron Research Association (BCIRA) Seryum (Ce) kullanılarak, Amerika'da International Nickel Company ise Magnezyum (Mg) kullanarak DDK elde etmeyi başarmıştır (Çavuşoğlu, 1981).

Küresel grafitli dökme demirler önceden "nodular cast iron", "spheroidal graphite (SG) cast iron" ve en son uluslar arası olarak "ductile iron" olarak bilinmektedir (Cast Irons,1996). Türk standartlarında "Küresel grafitli dökme demirler" olarak yer alırlar ve D.D.K kısaltılmış rumuzu ile ifade edilirler (Dikeç, 1970).

Gri dökme demirden farklı olarak grafitler lamel yerine sünek bir matris içinde küçük, yuvarlak ve küreseldir. Küresel grafitli dökme demir gri dökme demirden daha yüksek dayanıma ve süneklilik derecesine sahiptir.

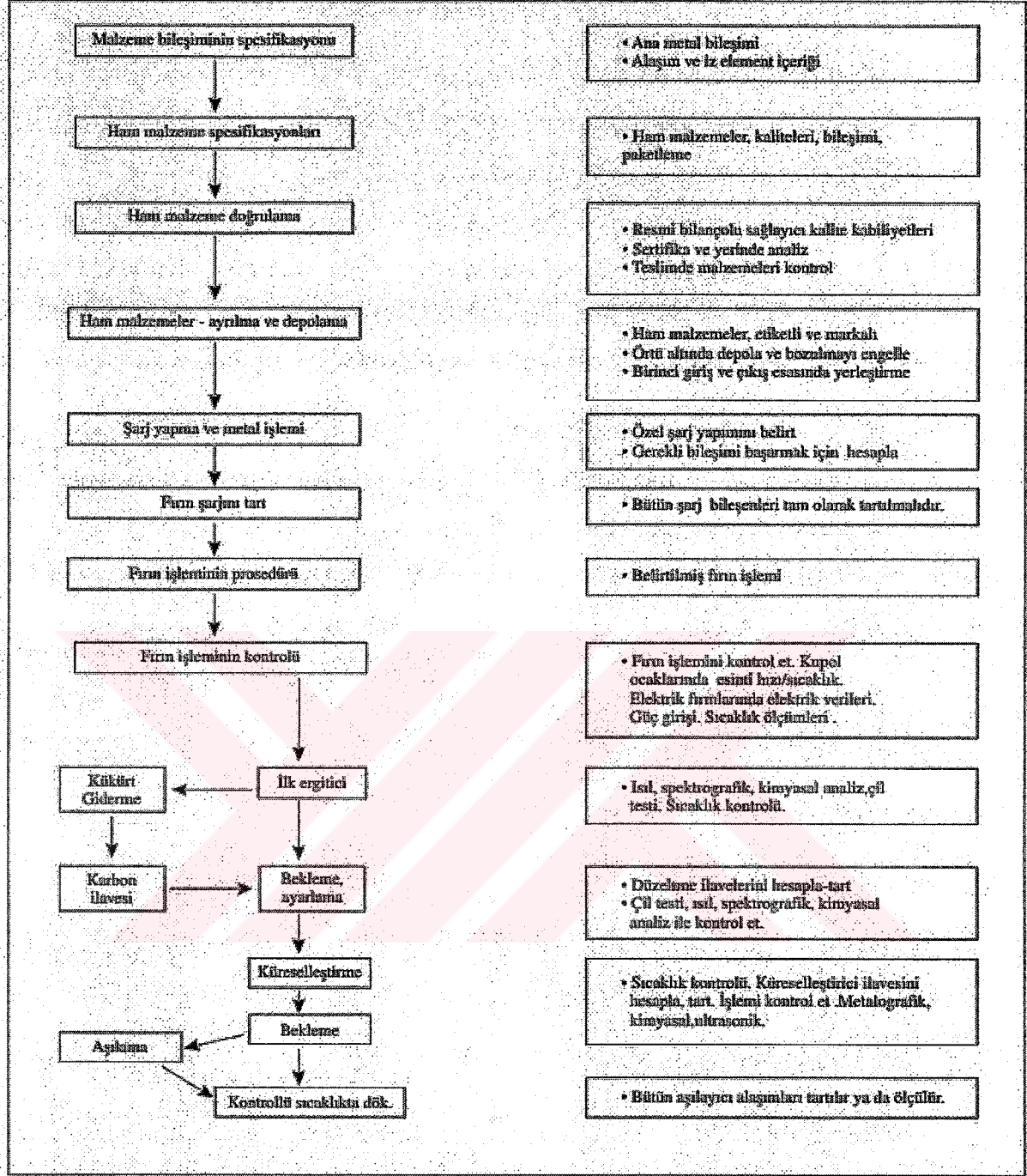
Küresel grafitli dökme demir bütün kesit ölçülerinde üretilebilir. Bununla birlikte sünek çok ince kesitler üretmek her zaman mümkün olmaz. İnce kesitler sünekliliği geliştirmek için ısıtma işlemine ihtiyaç duyarlar. Küresel grafitli dökme demir gri dökme demir gibi mükemmel akıcılığa sahiptir. Hatasız dökümleri garanti etmek için çok dikkat gereklidir. İnce kesitlerde keskin kenarlardan ve karbürlerden kaçınmak için çok dikkat gerektirir. O gri dökme demirden daha düşük döküm ürününe sahiptir. Çelik ve temper dökme demir ile karşılaştırıldığında hatasız döküm yapmak daha kolaydır. Kalıplamada ve dökümde de çok dikkat gereklidir. Küresel grafitli dökme demir Mg ve ara sıra Ce içeren bir katkı elemanı ile düşük kükürtlü sıvı dökme demir işlemi vasıtasıyla üretilir. Genellikle Si içeren aşılama ile dökümden önce veya döküm esnasında aşılır. Ticari işlem uygulamalarında çok değişiklikler vardır. Genelde bileşim alanı gri dökme demire benzerdir. Yine de çok sayıda önemli farklılıklar vardır (ASM Handbook,1992).

Küresel grafitli dökme demir otomotiv, tarım makine ve ekipmanları, kamyon, basınçlı boru, vanalar vb. bir çok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Ekonomik durgunluklara ve malzeme teknolojilerinde değişimlere rağmen, küresel grafitli dökme demir pazarı 1996'da dünyada 13 milyon tonu aşarak sürekli olarak büyümüş (Labrecque ve Gagne, 1998) ve 2000 yılında yaklaşık 14 milyon tona ulaşmıştır. Dünyadaki üretimi 2006 yılına kadar 20 milyon

tona ulaşması beklenmektedir (Rio Tinto Iron& Titanium Inc, 2000).

Diğer demirli dökümler süper bireysel özelliklere sahip olmasına rağmen, küresel grafitli dökme demir mikro yapı kontrolünden elde edilebilecek bir çok yönlülük ve daha düşük maliyet sunar (Labrecque ve Gagne, 1998). Bu özellikleri onu dizayn mühendislerinin seçiminde tek malzeme yapar. Üretim seviyesindeki ve kullanımdaki sürekli artış, üretilen dökümlerin metalurjik isteklerinin kontrolünü gerekli yapar. Uygun mekanik özellikli normal döküm küresel grafitli dökme demirin üretimi Şekil 3.1'de tasarlandığı gibi, üretim adımlarının dikkatli kontrolünü gerektirir (Labrecque ve Gagne, 1998).

Kalite güvencesi her hangi bir döküm üretim işleminin temel bir parçasıdır. Alışılmış şekilde uygulanan üç temel test, kimyasal bileşim için spektrografik test, küresellik ve matris yapısı için mikroskobik analiz ve mekanik özellikler için sertlik ve çekme testidir. Yüksek üretim dökümhanelerinde üç testi online olarak hızlı değerlendiren güvenilir vasıtalara ihtiyaç duyulmaktadır (Gowri, 1998). Isıl analiz bu ihtiyacı karşılayacak bir yöntem olarak, mikro işlemcilerdeki gelişmelerle birlikte yaygın olarak kullanılmaya başladı.



Şekil 3.1 Metal üretim kontrolünün önemli ilk adımları (Labrecque ve Gagne, 1998).

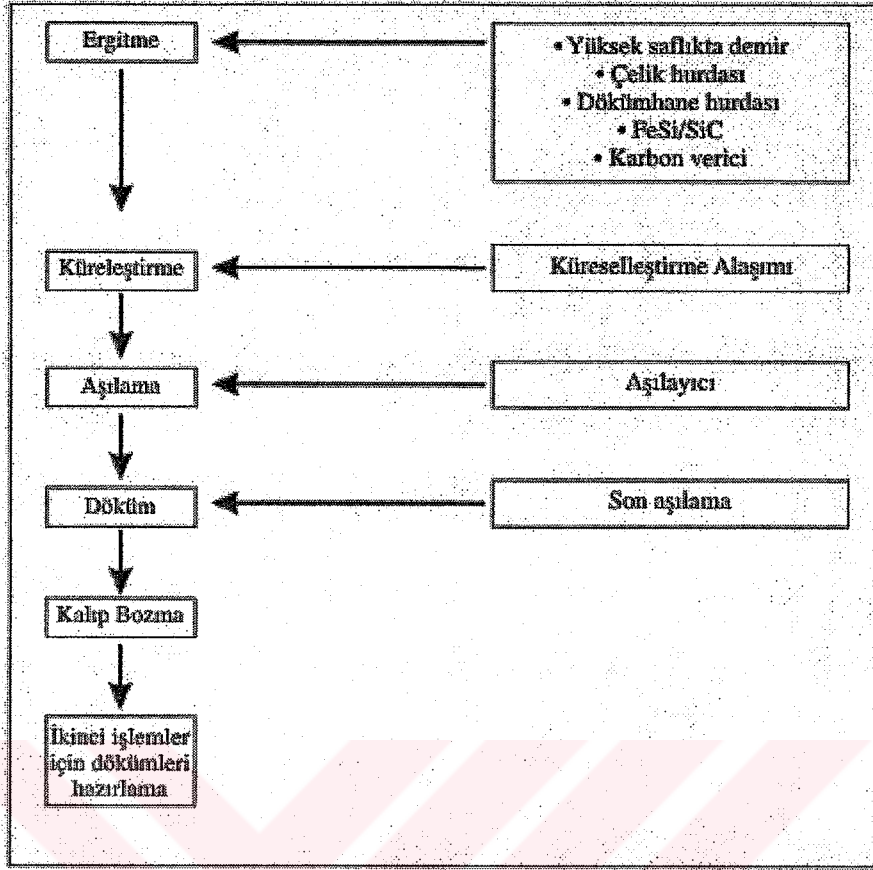
3.2 Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Üretimi

Küresel grafitli dökme demirin başarılı üretiminin anahtarı küçük fakat magnezyumun yalnız ya da seryum gibi toprak nadir elementler ile birlikte önemli yüzdede ilavesiyle dökme demirde küresel grafitin oluşumunu meydana getirmektir. Seryum, kalsiyum, lityum, sodyum, yitrium gibi diğer elementler de küresel grafit oluşumunu teşvik ediyorken, magnezyum şimdiki küresel grafitli dökme demir üretimi için en basit ve en ekonomik yöntemdir. Esasen

küresel grafiti üretmek için gerekli artık magnezyumun en az miktarı %0.018 ve %0.05 arasında değişir ve ana metalin kükürt ve oksijen içeriğiyle büyük ölçüde belirlenir (Spengler, 1972).

Yeterli miktarda magnezyum ilavesinden sonra ergiyik aşılır ve dökülür. Grafit küreler şeklinde çöker. Sıvı demire magnezyumu ilave etmek kolay değildir: magnezyum düşük sıcaklıkta(1090°C) kaynar. İşlem sıcaklığında Mg'un yüksek buhar basıncından dolayı şiddetli bir reaksiyon vardır. Bu yüzden sıvı demirin şiddetli karışmasına ve buhar şeklinde Mg'un önemli ölçüde kaybına sebep olur. İşlem esnasında bu beyaz magnezyum oksit dumanı ile birlikte magnezyum parlak ışığı olarak görünür. Mg işlemi esnasında oksitler ve sülfidler metal yüzeyinde cüruf oluşturur. Bu cüruf dökümden önce tamamen uzaklaştırılmalıdır. Aksi takdirde dökümler zararlı cüruf kalıntıları içerir (Brown, 1994).

Küresel grafitli dökme demir üretiminin şematik akış diyagramı Şekil 3.2'de gösterilir.KGDD dökümlerin üretiminin ilk adımı şarj malzemesinin dikkatli seçimidir. Çelik hurdası, dönüş hurdası ya da diğer malzemelerin bileşimi tam olarak bilinmelidir. Çünkü küresel grafitli dökme demir üretmek için bileşimdeki elementlerin belirli aralıkta kalması gerekir.Ana metalde düşük S (<%0,02), yüksek karbon konsantrasyonu (%3,4 –3.8), Si (%1-1,5) içerikleri ancak döküm esnasında Si içeriği %2,0-2,8 olmalıdır (Labrecque ve Gagne, 1998, ASM Handbook, 1992). Ayrıca matris yapısı da önemli ise bazı elementlerin özellikle kontrol edilmesi gerekir. C, Si, ferrit oluşumunu desteklerken, Mn, Ni, Cu, C, N, Mo, Sn, P, ve Sb perlit oluşumunu destekler. Ferritik dökümler için yüksek saflıkta pik demire ve yüksek saflıkta çelik hurdasına ihtiyaç olmaktadır.Yüksek kaliteli KGDD dökümlerin üretimi bileşim, döküm sıcaklığı bekleme zamanları v.b.'nin sıkı kontrolüne dayandırılır. Kupol ocakları ve indüksiyon ergitme fırınları genellikle bütün istekleri karşılar (Labrecque ve Gagne, 1998). Ancak son zamanlarda eğilim çekirdeksiz indüksiyon ocakları yönündedir.



Şekil 3.2 Küresel grafitli dökme demir üretiminin şematik akış diyagramı(Labrecque ve Gagne, 1998).

İkinci adım küreselleştirme işlemidir. Bu zamana kadar bir çok küreselleştirme işlemi geliştirilmiştir. Bireysel bir dökümhane için işlem yönteminin seçimi önemlidir. Bir çok faktörün etkilemesinden dolayı dökümhane koşullarına göre seçim yapılmalıdır (Labrecque ve Gagne, 1998).

Aşılama, KGDD dökümlerin üretimi için gerekli bir adımdır. Potada, metal akıntısında ve kalıpta olmak üzere üç farklı şekilde uygulanabilir. Küresel grafitli dökme demirin aşılama işlemi çil eğilimini azaltır ve oluşan küresel grafit sayısını artırır. Aşılama işlemi zamanla etkisini kaybeder. O nedenle mümkün olduğunca aşılama işlemi hemen sonra döküm yapılmalıdır. En fazla verimi almak için döküm akıntısına ilave edilmelidir (Elkem, 1997). Ayrıca aşılama işlemi özellikleri ve miktarı kaliteli döküm için kontrol altında tutulmalıdır.

Yüksek kaliteli KGDD dökümlerin üretimi dikkatli olarak kontrol gerektiren bir çok kademeler içerir. Küreleştirme işleminden önce aşılama ısıtma ve bekleme zamanı sınırlı

olmalıdır. Magnezyum işlemi için ergiyik normalde 1450-1510°C sıcaklıklarında olmalıdır.

Dökümde aşırı sıcaklık gradyentleri ve soğuk metalin dökülmesi istenmez ve bunlar ince kesitlerde ve döküm uçlarında karbür oluşumunu teşvik edebilir. Bunlar 25mm kesitli dökümler için 1315°C üzerindeki sıcaklıklarda ve 6mm dökümler için 1425°C üzerinde dökülerek ve çıkıcılar ve gidici çubuk uzantılarıyla yolluk sistemi değiştirilerek oluşmaları engellenir (ASM Handbook, 1992).

Yüksek kaliteli küresel grafitli dökme demir üretimi Şekil 3.1'de belirtilen her aşamanın dikkatli yapılmasını gerektirir. Bu da dökümhanelerin kaliteli küresel grafitli dökme demir üretiminde süreklilik için dinamik ve donanımlı bir yapıya sahip olmasını zorunlu yapmaktadır (Şen, 2003).

3.2.1 Üretimde Kullanılan Şarj Malzemeleri

Şarj yapmak için kullanılan ham malzemeler ergiyiğin bileşimini belirler. Bu nedenle kalitesi dikkatlice kontrol edilmek zorundadır. Özellikle ham madde alımlarında bileşim, sağlanan kalite, teslim zamanı vb. faktörler net olarak belirtilmelidir (Henych, 1998).

Şarjdaki metalik bileşenler ergiyiğin çekirdeklenme potansiyeli üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Çelik ve dönüş hurdasının çekirdeklenme potansiyeline etkisi çok azdır. Pik demirler, grafit, silisyum karbür ve diğer ferro silisyum ilaveleri ergiyikler için çekirdeklenme potansiyeline sahiptir. Katılma esnasında aşılama için iyi karşılık veren ve karbür oluşumu için düşük potansiyel gösteren dökme demirler üretmek için, dönüş hurdaları %50'den çok olmamalı , çelik bileşeni en çok %40 ile sınırlanmalı ve şarjda pik demir kullanılmalıdır. Şarjların temizliği de çil kama değerinde önemli rol oynar (Muratore, 1998).

KGDD üretiminde kullanılan metalik şarj başlıca; Pik, çelik hurdası, küresel grafitli döküm hurdası, katı halde indirgenmiş demir cevheri, ferroalaşımlar, silisyum karbür ve karbür vericilerden oluşabilmektedir. (Çavuşoğlu, 1981).

3.2.1.1 Pik

İz elementlerin varlığında küresel grafitli dökme demirin yüksek hassaslığından dolayı bozucu elementlerin düşük seviyesini içeren özel pik demir kullanımı çoğunlukla gereklidir. Bu dökme demirlerin dezavantajı oldukça pahalı olmasıdır. Kaliteli pik demir uygun bileşim, düzenli parça ölçüsü ve karbon kaynağı sunar. Şarjdaki pik demirin payı çelik hurdasının elde

edilebilirliğine ve kalitesine bağlıdır. Çoğu dökümhanede pik demir sadece bileşim ayarlaması için özellikle ferritik kaliteler için kullanılır (Henych, 1998).

Dökme demir üretimi için daha pahalı olmakla beraber doğrudan yüksek fırın pikinin kullanılması özellikle bileşim denetimi açısından yararlı katkı sağlar, buna ilaveten pikin özelliklerinin dökme demirinkiler üzerinde kalıcı etkisi de söz konusudur. Örneğin yapıda serbest karbür bulunmayışı, aşılama iyi cevap verışı, kararlı mikroyapı ve mekanik özellikler bunlardan sayılabilecek birkaçıdır (Çavuşoğlu, 1981).

Piyasada “Sorel metal” adıyla satılan çok düşük kükürt ve mangan (%0.01) içeren pikler, küresel grafitli dökme demir üretimine en uygun malzeme olmaktadır. Ayrıca yüksek fırın işletmeciliğinde gelişmeler ve kaliteli cevher kullanma ile düşük mangan(% 0.05 - % 0.20) ve silisyum içeren pikler üretilebilmektedir. Küresel grafitli dökme demir üretiminde kullanılacak pik seçimi, gerek kupol ürünü metalde kükürt giderme işlemini kaldırmak gerekse küreleştirici, aşılama ilavelerinin verimini artırıp masrafını azaltmak amacıyla taşımaktadır (Spengler ve Briggs, 1972).

3.2.1.2 Çelik Hurdası

Küresel grafitli dökme demir üretiminde pike nazaran daha ucuz olan ve kolay temin edilebilen çelik hurdası şarjın önemli bir bileşimini oluşturur. Şarja katılacak çelik hurdasının özellikle kimyasal bileşimi göz önünde tutulmalıdır. Çelik hurdasında mangan oranı ne kadar düşük olursa şarj için gerekli pik miktarı da o kadar azalır. Bundan daha önemli olan husus, döküm yapısında karbür oluşumunu teşvik eden (Cr, B, V, Mo, v.b.) elementler ile grafitin şeklini etkileyen (S, Pb, Zn, v.b.) elementlerin bileşimde bulunmaması veya çok az oranlarda bulunması gerekir (Çavuşoğlu, 1981).

Araba gövdelerinin üretimi için galvenizli çelik levhalar ve mikro alaşımlı çelik kalitelerinin kullanımı kaliteli hurda seçimini azaltır. Galvanizli çelik pota indüksiyon fırınlarında ergitme için yetersizdir fakat kupol ocaklarında şarj edilebilmektedir. Çelik hurdanın şartları dahi önemlidir. Kurşun ya da beyaz titanyum oksit esaslı boyalar iz elementleri ile ergiyiğe bulaşabilmektedir. Aşırı derecede oksitli malzemelerden kaçınılmalıdır (Henych, 1998).

3.2.1.3 Küresel Grafitli Dökme Demir Hurdası

Dökümhanelerin kendi dönüş hurdaları en değerli şarj malzemeleridir. Kimyasal analizi bilinir ve genellikle temizdir. Çok az istisna dışında şarj içinde küresel grafitli döküm

hurdasından başka döküm hurdası girmemelidir (Karsay, 1976). Çünkü bunlar ilave kükürt, fosfor ve bakır için kaynak olabilmektedir. O nedenle diğer dökümhanelerden gelen hurdalar kalite problemlerinden kaçınmak için kontrol edilmelidir. Şarjda dönüş hurdasının payı istenilen son silisyum içeriğinden dolayı çok sınırlandırılır. Silisyum esaslı master alaşımlarının kullanılmasından kaynaklanan bu sınırlama bu değerli şarj malzemesi ile problemler oluşturur. Saf magnezyum işlem metodu kullanarak bu sınırlama kaldırılır (Henych, 1998). Ancak hem gri dökme hem de küresel grafitli dökme demir üreten bazı küçük dökümhanelerde ve ayrıca hem ferritik hem de perlitik küresel grafitli dökme demir üretiminde her iki ürünün hurdaları titizlikle birbirinden ayrılmalıdır (Çavuşoğlu, 1981).

3.2.1.4 Doğrudan İndirgenmiş Demir Cevheri

Küçük üreticilerden bazıları kupol fırınlarında yaklaşık % 5 ila 10 oranında ön indirgenmiş demir cevheri de kullanmaktadır. Ancak gerek kupol gerekse indüksiyon fırınında işlem koşulları etkilendiği için yukarıda belirtilen orandan daha fazla kullanılmamalıdır (Çavuşoğlu, 1981).

3.2.1.5 Ferro Alaşımlar ve Silisyum Karbür

Ferro alaşımlar şarjda ihtiyaç duyulduğu zaman onların sağlayıcısı tüm kimyasal analizi vermelidir. Karbon ve silisyum ilavesinin yanında silisyum karbürün kullanımı iki fayda oluşturmak için istenir. Birincisi, ergiyiğin metalurjik kalitesi bütün ergitme cihazlarında geliştirir, o münasebetle normal dökümde karbür ihtimalini azaltır. İkincisi, elektrik fırınlarında cüruf yapısı azaltılır ve astar ömrü silisyum karbür ilavesi ile uzatılır (Karsay, 1976).

3.2.1.6 Karbon Vericiler

Karbon vericiler pota indüksiyon fırınlarında ergitmeyle özellikle yaygın olarak kullanılır. Pazarda farklı tiplerde karbon vericiler vardır. Onların özellikle kükürt, azot ve kül içerikleri farklıdır. Saflık ne kadar yüksek ise, fiyatta o kadar yüksektir. Kalitenin seçimi işlemin çeşidine bağlıdır. İşlemden önce ana metale(%0,1) karbon verici ilavesi çekirdeklenme kabiliyetini artırır ve işlem esnasında karbon kaybını telafi eder ve küresel grafitli dökme demir kalitesini olumlu etkiler (Henych, 1998).

3.2.2 Küreleştirme İşlemi

KGDD üretme işlemi karbürlerden bağımsız bir grafit yapısını garanti etmek için silisyum

içeren bir malzemenin aşılması ile takip edilen ya da birleştirilen grafit şeklini değiştirmek için magnezyum ilavesinden oluşur. Magnezyum işlemi için demir normalde 1450-1510°C sıcaklıklarında olacaktır. İşlemin birçok yöntemi uygulanmaktadır. KGDD küreleştirme işlemleri ve uygun ilave yöntemleri için kullanılan çeşitli Mg alaşımları Çizelge 3.1’de verilmektedir.

Çizelge 3.1 Tipik Mg küreselleştirme alaşımları ve kullanılan işlem yöntemleri (Labrecque ve Gagne, 1998).

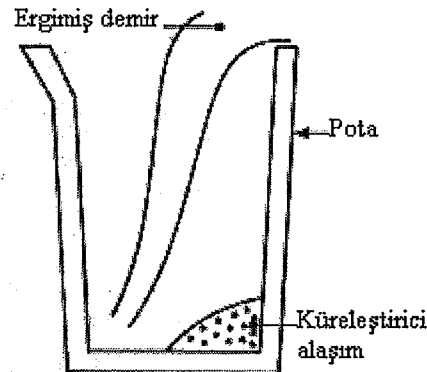
Alaşımlar	Teknik vasıtalar
NiMg	Açık Pota
CuMg	
FeSiMg %3/5	Sandiviç, Tandış Kapak
FeSiMg %5/7	Flotret, İnconod, Kalıp içinde
FeSiMg %8/10	Gazal
FeMg peletleri %6/10	
Mg kaplı tel	Daldırma, Dönen pota
Mg kok	Daldırılmış ilaveli pota
FeSiMg %30-40	
Saf Mg çubuk	Konvertör, basınçlı pota
Saf Mg tozu	Daldırma, enjeksiyon

3.2.2.1 Küreleştirme Yöntemleri

Küresel grafitli dökme demir üretimi için geliştirilmiş bir çok farklı işlem yöntemi vardır.

Bu işlem yöntemleri aşağıdakileri içerir:

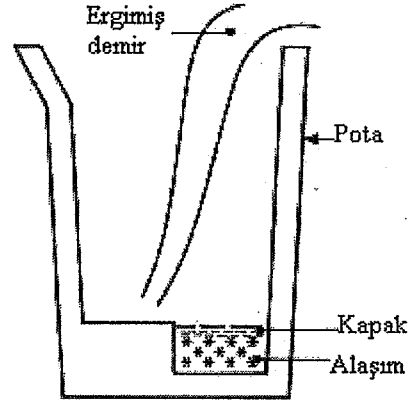
- **Açık Pota:** Bu yöntem basitliğinden ve düşük yatırım maliyetinden dolayı çoğu dökümhanenin seçimidir. İşlemden önce alaşım işlem potasının tabanına yerleştirilir ve pota sonra doldurulur (Foundry Trade Journal, 2001). Şekil 3.3 açık pota yöntemini gösterir.



Şekil 3.3 Küresel grafitli dökme demir üretiminde açık pota yöntemi (Brown, 1994)

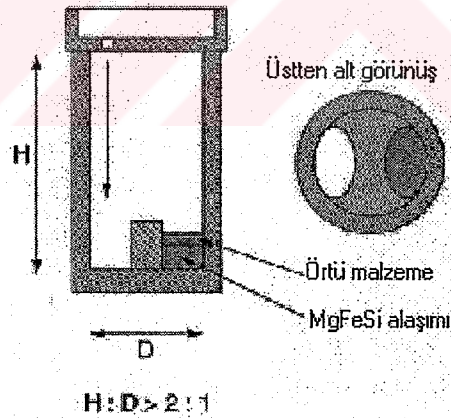
- **Sandiviç potası:** İşlem alaşımı oldukça uzun potanın tabanında bir yerde bulunur ve

çelik talaşı ile örtülür. Yöntem sadece %10 Mg'dan daha az içeren alaşımlar ile kullanım için uygundur. Şekil 3.4 küresel grafitli dökme üretiminde sandiviç yöntemini gösterir (Brown, 1994).



Şekil 3.4 Küresel grafitli dökme demir üretiminde sandiviç yöntemi (Brown, 1994).

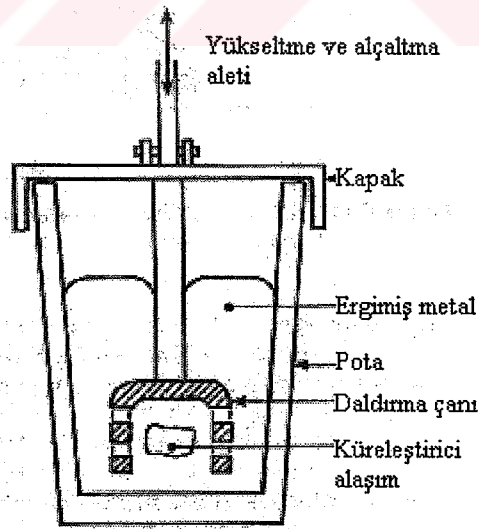
- **Kapaklı Tandış :** Bu Mg kazanımını artıran ve hemen hemen parıltı ve dumanı bertaraf eden pota için özel olarak dizayn edilmiş kapaklı işlem potasının gelişimidir (Brown, 1994). Şekil 3.5 kapaklı tandış potasını şematik olarak gösterir.



Şekil 3.5 Çift alaşım bölmeli kapaklı tandış potasının şematik gösterimi (Elkem, 1997).

- **Daldırma:** Alaşım, kapaklı ve duman çekmeli bir pota ile birleştirilmiş genellikle refrakter daldırma çanını kullanarak pota içine daldırılır. İlave yapıldığı zaman, daldırma çanı sıvı demir içerisine iyice daldırılmalıdır. Bu yöntem nispeten basit teçhizata ihtiyaç gösterdiğinden bir çok dökümhanelerde tercihen kullanılmaktadır. Açık pota yöntemi için uygun magnezyum alaşımı daldırma tekniği ile de ilave edilebilir. İlaveten, daldırma tekniği için özel şekilde hazırlanmış magnezyum

alaşımları mevcuttur. Bu alaşımların en önemlilerinden biri VL 55 alaşımıdır. Bu alaşımın kimyasal analizi; %30 Mg, %50 Si, %4-5Ca, bir miktar toprak metali geri kalanı da demirden ibarettir. Daldırma tekniği ile kullanılan diğer bir ilave maddesi magnezyumlu koktur. Magnezyum emdirilmiş bu kokun toplam ağırlığının %40'ını saf magnezyum teşkil etmektedir. Daldırma potası ebat ve şekil bakımından nakil potasına benzemektedir. Daldırma potasının da iyi ısıtılması gerekmektedir (Aras, 1970). Bu üretim yöntemi çok yönlüdür ve magnezyum işlem malzemelerinin önemli sayısı ile kullanılabilir. Daldırma açık pota yönteminden %30-%50 daha çok verimlidir. Verimlilikteki bu artış esasen magnezyum buharının erimiş demirden yükselme mesafesinden dolayıdır. Böylece magnezyum oksit içeren temiz bir metal üretilir. Demir ve magnezyum arasında reaksiyon daha az duman, parlayan ışık, dökülen metal ve işlem personeli için tehlikede sonuçlanan metal içerir. Birkaç istisna ile daldırma kurulması sadece küçük bir yatırım gerekir. İşlem maliyetleri daldırma çanının ömrüne büyük ölçüde bağlıdır. Daldırma şimdiye kadar herhangi bir işlem yönteminden en uygunudur. Sonuçlar kolayca tekrar üretilebilir ve işlem personelinin döküm hızına bağlı değildir. Daldırma yöntemi kolayca yüksek üretim dökümhanelerinden birine uyarlanabilir (Spengler ve Briggs, 1972). Şekil 3.6 daldırma yöntemini gösteriyor.



Şekil 3.6 Küresel grafitli dökme demir üretiminde daldırma yöntemi (Brown,1994).

- **Gözenekli Tapa:** Gözenekli tapalı bir pota kalsiyum karbür ile metali kükürt giderme için kullanılır ve işlem alaşımı sonra gözenekli tapa ile metal hala karıştırılırken

ilave edilir.

- **Konvertör:** Bir bölmede Mg metalini içeren özel konvertör potası kullanılır. Pota sıvı demir ile doldurulur, sıkıca kapatılır ve Mg metali demirin altında kalacak biçimde döndürülür.
- **Kalıp İçinde İşlem:** MgFeSi alaşımı yolluk sistemi içine kalıplanmış bir bölme içine yerleştirilir; Demir alaşım üzerine akar gibi sürekli işlem görür (Brown, 1994).
- **Enjeksiyon:** Küresel grafitli dökme demir üretimi için, ince metalik magnezyum parçaları pota içindeki metalin içine itilir (Spengler ve Briggs, 1972).
- **Basınçlı Pota:** Bu yöntemde işlem potası sızdırmazlığı sağlanmış bir bölmeye yerleştirilir ve bölmenin basıncı yaklaşık 30 atmosfere çıkarılır. Sonra metalik magnezyum işlem potasındaki erimiş metale daldırılır. Basınçtan dolayı, magnezyum metali etkili karıştırılır (Spengler ve Briggs, 1972).
- **Akış içinde ve Flowtret Yöntemleri:** Flowtret çeşidi patenti alınmış bir yöntemdir. Her ikisinde kapalı ortasında bir reaksiyon bölmesi olan refrakterle astarlanmış yatay bir kanal kullanır. Demir üst kenarındaki girişten girer ve karşıt kenardaki alt açıklıktan işlem görmüş demir olarak çıkar. Yöntem çeşitli işlem alaşımları ile gerçekleştirilebilir fakat %9MgFeSi çeşidi çok yaygın kullanılır. Rapor edilen Mg kazanımları oldukça iyidir ve işlem pratik olarak temiz bir yöntemdir (Karsay, 1976).
- **Çekirdekli Tel:** Bu küresel grafitli dökme demir üretiminde son gelişmelerden biridir. Uygulamada, tel normal olarak saf magnezyum ve magnezyum ferro-silisyumun bir karışımı ile doldurulur ve kontrollü bir hızda kapaklı pota içine beslenir (Foundry Trade Journal, 2001).

Bütün yöntemler avantajlara ve dezavantajlara sahiptir; basit işlem yöntemleri sadece çok fiyatlı düşük Mg alaşımları ile kullanılabilir. Genellikle yüksek silisyum içerikleri bir sınırlama oluşturabilir. Yüksek Mg alaşımları ve saf Mg kullanmak için pahalı özel amaçlı teçhizata ihtiyaç duyulur bu yüzden yöntem sadece büyük dökümhanelerde kullanılmaya eğilim gösterir (Brown, 1994).

3.2.2.2 Magnezyum İçeriğinin Kontrolü

Magnezyum işleminin bütün yöntemlerinde ilave miktarı ve işlem görmüş metalin ağırlığının tam ölçüsü esastır. Demirde baştaki S içeriği ve işlem sıcaklığı dahi bilinmelidir. Çünkü onlar son magnezyum içeriğini etkiler. Magnezyumun kazanımı aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\%Mg \text{ Kazanımı} = (\%Son \text{ Mg içeriği} / (\%ilave \text{ edilen Mg-3/4\%Baştaki S içeriği})) * 100 \quad (3.1)$$

Reaksiyon tarafından üretilen magnezyum sülfid potanın üstünde cüruf içine akar ve çaydanlık pota kullanarak ya da üstünden cürufu alınarak kaldırılır. 1450°C işlem sıcaklığında kazanımın tipik değerleri

Potada ilave edilmiş %16 Ni-Mg alaşımı için %50

Sandiviç işlemi kullanarak ilave edilmiş %9 Mg ferrosilisyum için %40

Sandiviç işlemi kullanarak ilave edilmiş %5 Mg ferrosilisyum için %60

Konvertörde ilave edilmiş olan saf magnezyum için %50

Kalıp içinde ya da Flotret işlemi için %45tir.

Magnezyum işlemi esnasında genellikle metal sıcaklığında 35-50°C arasında bir azalma vardır (ASM Handbook, 1992).

3.2.3 Aşılama

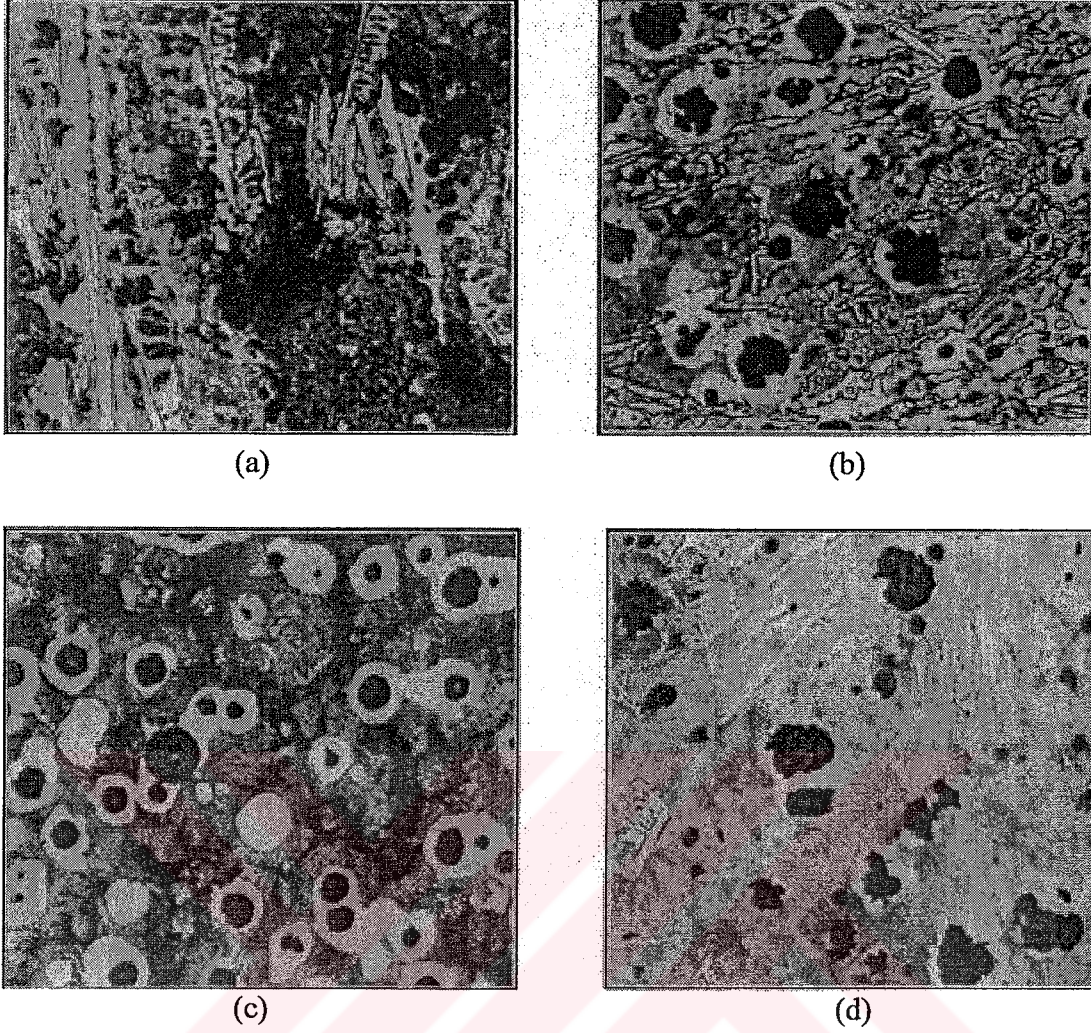
Yüksek kaliteli dökme demirin üretimi için aşılama işlemi kesin önemlidir. Aşılamanın temel işlevi grafit ötektiğinin büyümesini teşvik ederek ve yapıda sert ötektik karbür oluşumunun riskini en aza indirerek ve aşırı soğumayı azaltarak çekirdeklenmeyi artırmaktır. Bir aşılama sonrası katılaşma esnasında grafitin çekirdeklenmesi için uygun bir faz sağlayacak dökümden hemen önce sıvı demire ilave edilen bir malzemedir. Geleneksel olarak aşılama grafit, ferro silisyum ya da kalsiyum siliside dayandırılmıştır. Bugün çok yaygın aşılama Al, Ba, Ca, Sr ve Zr gibi elementlerin küçük miktarlarını içeren ferro silisyumdur. Çizelge 3.2 küresel grafitli dökme demir için bazı ferrosilisyum esaslı aşılama ajanlarını gösterir.

Küresel grafitli yapılar üretmek için dökme demire magnezyum ve seryum ilavesi güçlü bir karbür teşvik edici etkiye sahiptir. Aşılama küresel grafitli dökme demirin karbon ve silisyum içeriği yüksek olsa bile bu etkiyi karşılamak için gereklidir. Aşılama küresel grafitli dökme demirde küresel grafit sayılarını da artırır (Skjeggstad ve Skaland, 1996).

Çizelge 3.2 Küresel grafitli dökme demir için bazı ferrosilisyum esaslı aşılایıcıların bileşimleri (Labrecque ve Gagne, 1998).

Aşılایıcının Çeşidi	%Si	%Al	%Ca	%Ba	%Sr	%Zr	%Mn	%Mg	%RE
%75 FeSi, Ca destekli	75	0,6-1,25	0,6-1,20						
FeSi-Ba	60-65	1,0	0,8	0,8		6	6		
FeSi-Ba	60-65	0,5-1,7	1,0	9-11					
FeSi-Ba	60-65	1,5	2,0	5-6			9-10		
FeSi-Ba	70-75	0,8-1,20	0,8-1,20	1,75-2,25					
FeSi-Zr	80	1,5-2,5	2,5			1,5			
FeSi-Sr	75	<0,5	<0,1		0,8				
FeSi-Sr	45-50	<0,5	<0,1		0,8				
FeSi-Ce	45	0,5	0,5						
FeSi-Ce	45	0,5	0,5						13(%10Ce)
%45FeSi	45-50	0,8	0,8						3,5(%3Ce)
%45FeSi-Mg	45-50	0,8	0,8					1,25	
FeSi-La	75	1,5							2,0-2,5 La

Aşılama genellikle %75 silisyum içeren ticari Fe-Si ya da genellikle %60-80 silisyum içeren özel alaşımlardan taneli bir aşılایıcı kullanarak pota içinde uygulanır. İlave edilen aşılایıcının miktarı genellikle yaklaşık %0,25- %1 aralığında olacaktır. Magnezyum ilave alaşımı içinde silisyumun çok yüksek yüzdesi daha az aşılamaya izin verir. Aşılایıcı tekrar potaya alma esnasında metal içinde karıştırılarak doldurmadan önce potanın altına yerleştirilir ya da refrakter çan içinde daldırılarak dökümden önce mümkün olduğu kadar geç ilave edilebilir. Verimli karıştırma gereklidir ve bunu başarmanın bir yolu potanın dibinde gözenekli bir giriş kullanarak ergiyik içinden hava ya da azot kabarcıkları oluşturmaktır. Aşılama katılma esnasında aşırı soğumayı azaltır ve özellikle ince kesitlerde yapıdaki karbürlerin oluşumunu önler. Küresel grafitlerin sayısını artırarak homojenliği geliştirir, ferrit oluşumunu ve sünekliliği teşvik eder. Tavlama zamanını ve sertliği azaltır. Bir aşılایıcının etkisi çözüldüğünde en fazladır ve sonra 20-30 dakikalık periyot içinde azalır. Baştaki etki ve azalmanın oranı iz elementlerinden etkilenir. Ca, Al, Ce, Sr, Ba ve Bi gibi iz elementlerini içerir. Metal dökülürken bir aşılایıcının son ilavesi çok verimlidir. Bunun yanında taneli aşılایıcı yerleştirilerek ya da yolluk sisteminde özel bir bölme içinde kalıpta şekillendirilmiş aşılایıcı parçacıklarıyla da başarılabilir (ASM Handbook, 1992). Şekil 3.7 Küresel Grafitli Dökme demir mikro yapılarında aşılamanın etkilerini gösterir.



Şekil 3.7 Küresel grafitli dökme demir mikroyapılarında aşılamanın etkileri(250x). (a) aşılammamış K.G.D.D., (b) yetersiz aşılammış K.G.D.D., (c) iyi aşılammış K.G.D.D., (d) etkisi kaybolmuş aşılama, (Labrecque ve Gagne, 1998).

Küresel grafitli dökme demirin küreselleştirme işlemi kükürt ve oksijen giderici bir prostedir. Yine de, sıvı demirden üst cürufa sülfidleri ve oksitleri uzaklaştırmak çoğunlukla arzu edilmez. Sonraki aşılama esnasında etkili çekirdeklenme elde etmek için reaksiyon ürünlerinin toplanmasını ve yüzmesini engellemek ve demirde mikro parçacıkların ince dağılımını teşvik etmek avantajdır. Böyle mikro parçacıklar katılma esnasında heterojen grafit çekirdeklenmesi için potansiyel yerler olarak davranır. Böylece etkili bir küreselleştirme işlemi, düşük S ve O değerleri ile gerçekleştirilir yani işlemden önce ve sonra S ve O'nin analitik seviyeleri arasındaki fark tercihli olarak düşük olmalıdır.

Magnezyum-ferrosilisyum alaşımları kullanılan küreselleştirme prosesleri daha az şiddetli reaksiyon verir ve böylece ergiyikten potansiyel çekirdeklerin uzaklaştırılması daha azdır. Çilli ve çilsiz bölgelerin görünüşünde ki benzerlikten dolayı küresel grafitli çil test parçasının kırılmasında çil derinliğini ölçmek çok zordur. Bununla birlikte etkili aşılama yapıda grafit

kürelerini karşılaştırılabilir olarak çok sayıda üretir (Skjegstad ve Skaland, 1996).

3.2.4 Küresel Grafitli Dökme Demir Üretiminin Metalurjik Kontrolleri

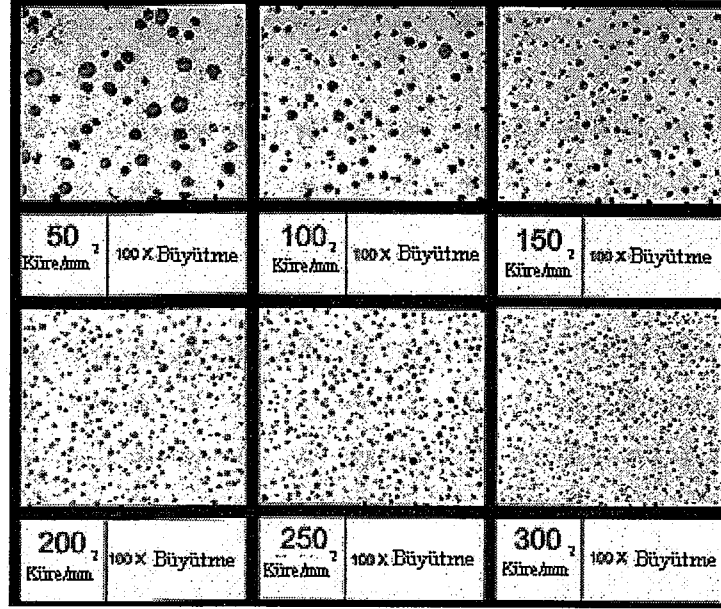
3.2.4.1 Metal Bileşimi

Magnezyum işleminden önce sıvı demirin kükürt içeriği bilinmelidir. Kükürt içeriği spektroskopik analiz için soğutulmuş halka numune alarak belirlenir. Kükürt ve karbon içeriği test halkasından alınan talaşların yakılması ile de hızlı belirlenebilir. Diğer elementlerin spektroskopisi magnezyum işleminden önce veya sonra uygulanabilir. Fakat analiz için uygun tamamen beyaz numune aşılama ya da silisyum içeren magnezyum alaşımının fazla ilavesi yapıldıktan sonra elde edilebilmesi imkansızdır.

Aşılama sonrası en son silisyum içeriği işleminden sonra bir numune dökümden alınan talaşlar ile kimyasal olarak belirlenmesi gerekmektedir. İşlem görmüş küresel grafitli dökme demirde karbonun güvenli belirlenmesi talaş alma esnasında karbon kaybından ve halka içinde grafitin muhtemel varlığından dolayı katı numunelerden elde edilen örneğin halka numuneye tutturulmuş mandallar hariç kimyasal olarak elde edilemez. Karbon eşdeğeri, karbon ve silisyumun hızlı kontrolü gri dökme demir için aynı tavırda metalin ısı analiziyile gerçekleştirilebilir. Bu magnezyum işleminden önce yapılmalıdır. Demirin diğer özellikleri ötektik aşırı soğumasını içeren ısı analizden çıkarılabilir (ASM Handbook, 1992).

3.2.4.2 Küresellik ve Küre Sayısı

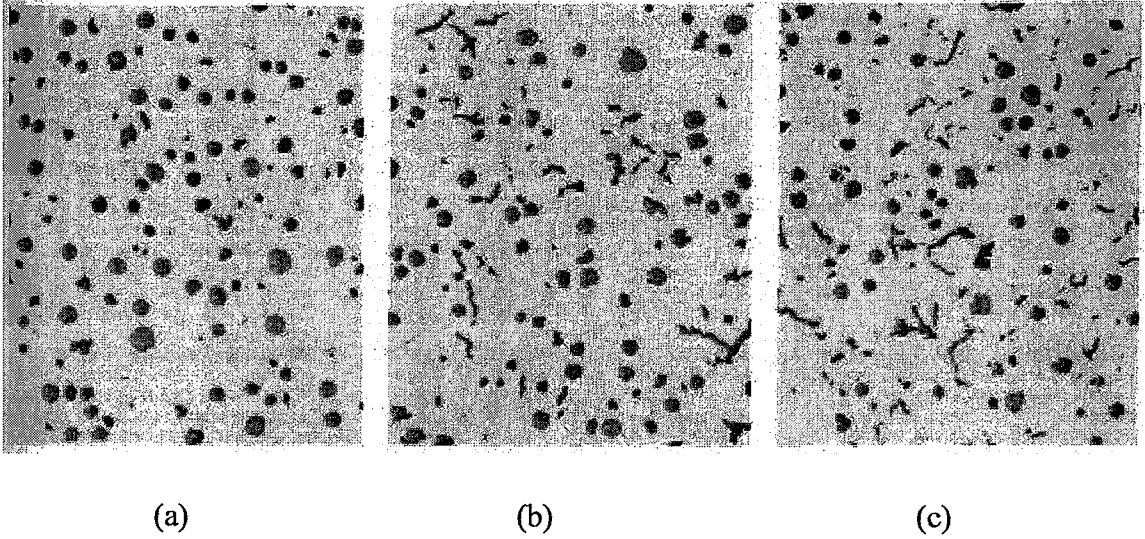
Karbürlerden bağımsızlığı garanti etmek ve doğru özellikler üretmek için iyi küresel grafit yapılı ve yeterli küre sayılı demir üretiminde magnezyum işleminin başarısı, istenmeyen iz elementlerden bağımsızlık ve son aşılama yeterliliği genellikle AFS komitesi 12 K tarafından tavsiye edilen test parçasına dökülerek ve incelenerek hızlı şekilde belirlenir. Kalıp sertleştirilmiş kum içinde yapılır ve iki yanında ayrı iki parça olan merkezi bloktan oluşur. Bu yanlardaki iki parça döküm katılaştığı zaman kırılır. Oda sıcaklığına soğutmadan sonra bir parça ikiye kırılır ya da kesilir ve enine kesit zımparalanır, parlatılır ve mikroskop altında incelenir. Seçenekli olarak metalografik inceleme için seçilmiş dökümlerden ya da kabul edilmiş test çubuğunun diğer çeşitlerinden kesilebilir. Belirtilmiş bir alanda kürelerin sayısı genellikle 100x büyütme kullanılarak hesaplanır. Belirtilen alan görüntünün alanı ya da çizginin belirtilmiş uzunluğu boyunca mm^2 ya da in^2 dir. Şekil 3.8 Standart küre sayılarını gösteren mikroyapıları gösterir.



Şekil 3.8 Standart küre sayılarını gösteren mikro fotoğraflar (Mullins, 2003).

Kürelerin şekli ISO 945 ya da ASTM A247 standartlarının sınıflamasına göre değerlendirilir. Küre sayısı ve şeklinin tamlığı nicel metalografi aletleri kullanarak değerlendirilir (ASM Handbook, 1992). Küre sayıları saymayı kolaylaştırmak için kare ızgaralı bir projeksiyon mikroskobu kullanarak hafifçe dağlanmış parlatılmış numunelerde yapılmalıdır. Her bir numune için en az üç alan sayılmalıdır. Modern görüntü işlemci teknikleri küresel grafitli dökme demirlerde küre sayısının ölçülmesinde çok etkili olduğu kanıtlanmıştır (Skjegstad ve Skaland, 1996). Çoğu amaç için grafit %85-100 arasında tam küresel şekilde olmalıdır. Şekil 3.9 küresel grafitli dökme demirde küresellik yüzdelerini gösterir.

Dökümlerden ya da test çubuklarından numuneler üretim işleminin genel bir kontrolü olarak üretilen demirin grafit ve matris yapısını doğrulamak, ferrit ve perlit içeriklerini değerlendirmek ve istenmeyen karbürler, kalıntılar ve cüruftan bağımsızlığı doğrulamak için periyodik olarak incelenecektir.



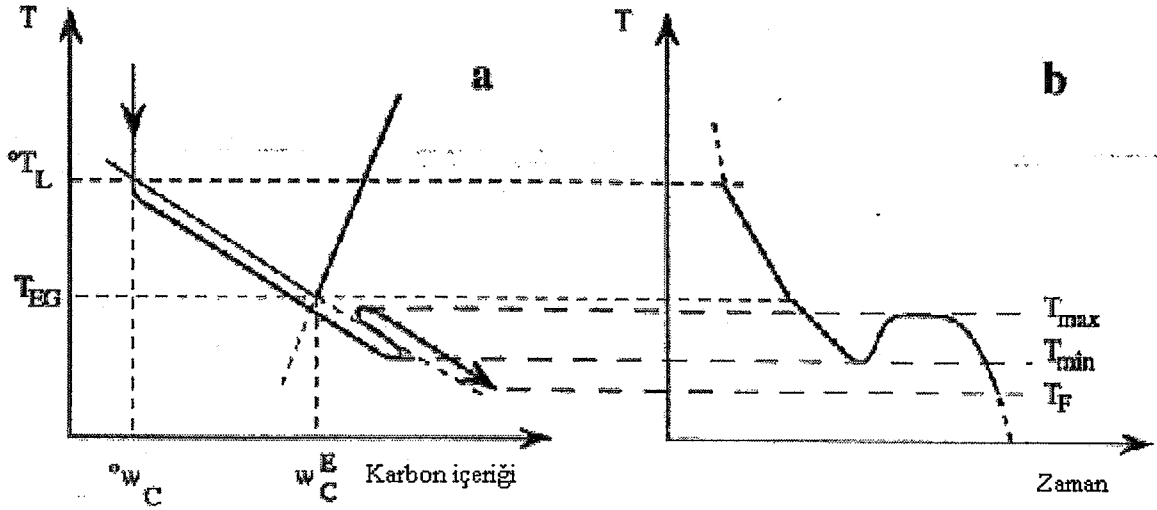
Şekil 3.9 Farklı küresellikte küresel grafitli demirlerin mikroyapısı. (a) %99 küresellik, (b) %80 küresellik (c) %50 küresellik. Hepsini dağlanmamış. 36x (ASM Handbook, 1992).

3.3 Küresel Grafitli Dökme Demirin Katılaşması

Küresel grafitli dökme demir karbon ve silisyum içeriğinin sırasıyla %3,5-3,9 ve %1,8-2,8'e değişen üçlü Fe-C-Si alaşımıdır. Bileşimin seçimini döküm kesit ölçüsü ve hedeflenen mekanik özellikler tarafından belirtilir. C ve Si içeriği bağlılığına rağmen, küre oluşunu; sonradan kontrol edilemez, fakat alaşımın saflık derecesi ve küreleştirici malzemelerinin ilavesinin bir sonucudur. Bununla birlikte metalik fazda gömülen grafitin miktarı (i) C ve Si içeriği ve (ii) soğuma parametreleriyle kontrol edilir. Denge şartları altında C ve Si etkisi üçlü faz diyagramından çıkarılabilir (Labrecque ve Gagne, 1998).

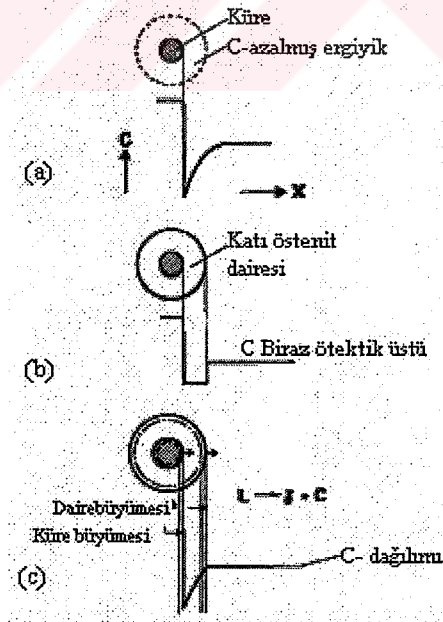
Çekirdeklenme ve büyüme hareketleri Fe-C-Si faz diyagramı ilişkili termodinamik itici güçlere bağlıdır. Pratik uygulamalar için dökme demirin katılaşması üçlü Fe-C-Si denge faz diyagramları kaynağıyla tanımlanabilmektedir.

Alaşımın türü bileşimin ötektik hattına göre konumuna göre ötektik altı, ötektik ve ötektik üstü olarak temsil edilir. Ötektik altı alaşım durumunda katılaşma sırası Şekil 3.10'da gösterildiği gibi devam ediyor. Demir ergiyiğinden östenitin çekirdeklenmesi ve büyümesi için önemli engel olmadığı için, östenit dendritleri sıcaklık ortalama sıvılaşma sıcaklığı $^{\circ}T_L$ 'nin altına düştüğü zaman görüldüğü varsayılır. Soğuma esnasında, γ dendritleri büyür ve sıvı bileşimi östenit sıvılaşma eğrisini takip eder(Şekil 3.10(a)) (Lesoult vd, 1998).



Şekil 3.10 Ötektik altı küresel grafitli dökme demirin katılaşma sırasının şematik gösterimi. (a) silisyumun eş düzlem kesitinde katılaşmanın yolu, (b) soğuma eğrisi (Lesoult vd, 1998).

Ötektik sıcaklığı T_{EG} ' ye ulaşıldığında grafitin çekirdeklenmesi başlar. Grafit parçacıkları bir östenit kabuğu tarafından çevrelenmeden önce kısa bir süre için sıvıdan serbest olarak büyümektedir. Ötektik kürelerin daha fazla büyümesi östenit kabuklarının içinden sıvıdan grafit kürelerine doğru karbon difüzyonu ile kontrol edilir (Şekil 3.11).

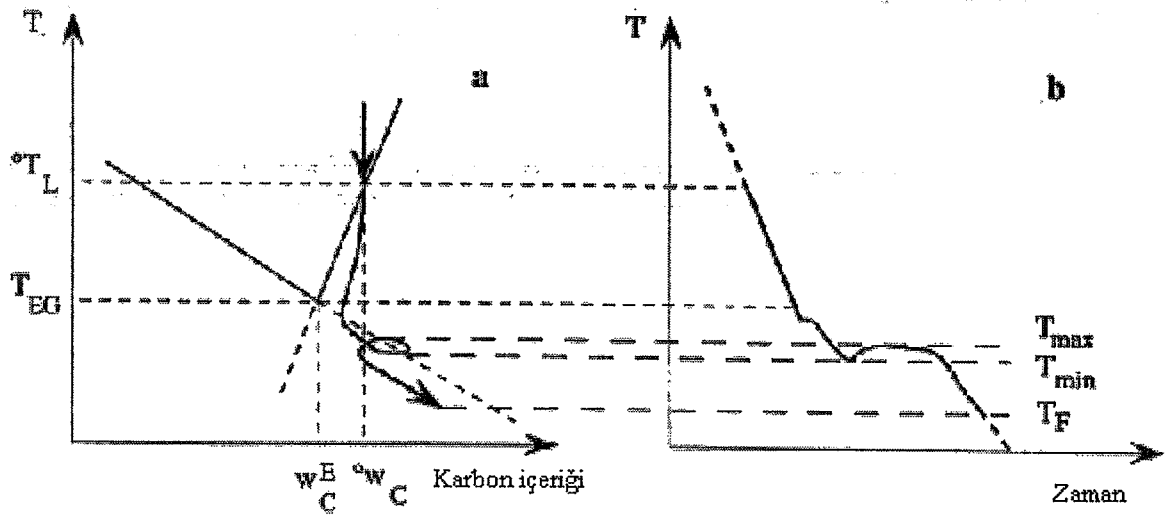


Şekil 3.11 Katı bir daire içinde kürenin eşsıl büyümesi ve bir düzgün arayüzeyle halenin büyümesi (a) ötektik öncesi faz katılaşması: sıvı ile temastaki kürenin büyümesi (b) ötektik katılaşma: hale çevrelemesi, (c) katı hale içinde kürenin büyümesi (Labrecque ve Gagne, 1998).

Bunun sonucu, katılaşma olayı gri dökme demirinkine nazaran daha yavaş olmakta ve ötektik katılaşma aralığı 49 °C kadar olabilmektedir. Küresel grafitli dökme demirde sıvı metal, gri dökme demire nazaran daha geniş bir sıcaklık aralığında ve daha düşük sıcaklıklarda mevcut olabilmektedir (Çavuşoğlu, 1981).

Bu büyüme prosesi yavaştır ve katılaşan metal, kalan sıvı grafit sıvıgenine göre çok ve çok aşırı doyurulmuş olduğu, T_{EG} altında östenit sıvıgen hattının ekstrapolasyonu boyunca ve böylece östenit dendritleri daha fazla geliştiği şartta soğumaya devam eder. T_{EG} altında T_{min} sıcaklığında ötektik kürelerinin sayısı ve onların büyümesi için itici güç bütün ötektik reaksiyonun daha hızlı ilerlemesi için yeterince yüksektir. Bu ötektik reaksiyonun etkili başlangıcıdır. O bir maksimum sıcaklığa (T_{max}) kadar bir parlama ya neden olmak için yeterli şiddettedir. Bu ısıl analiz esnasında ötektik durmaya öncülük eder(Şekil 3.10(b)). Katılaşma T_{min} 'den genellikle daha düşük T_F sıcaklığında tamamlanır.

Ötektik üstü bir demirin katılaşma sırası Şekil 3.12 'de gösterilir. O ergiyikten grafit parçacıklarının çekirdeklenmesi ve serbest büyümesi ile başlar. Bu iki proses zordur ve dengeden biraz sapma ile ilerler. Bundan dolayı, grafitin ötektik öncesi çökmesi ile ilgili katılaşma yolu grafit sıvıgenin biraz aşağısında yerleştirilir(Şekil 3.12(a)). Onun tam yeri soğuma hızına ve ergiyik hazırlamaya(küreselleştirme ve aşılamaya) bağlıdır. Grafit çökmesinin safhası ısıl analiz esnasında soğuma eğrisinde görülemez çünkü grafitin içerilen miktarı gerçekten küçüktür. Katılaşma yolu östenit sıvıgeninin yarı kararlı ekstrapolasyonunu kestiğinde östenit ergiyikten çekirdeklenebilmektedir. Katılaşmanın sonra ötektik altı dökme demirde olduğu gibi katılaşma yolunun östenit sıvıgenine yapıştığı şartlarda ilerlediği düşünülür. Yoğun ötektik reaksiyonu ötektik kürelerinin sayısı ya da onların büyümesi için itici güç çok küçükse eğer geciktirilebilir. Metal parlamasının başladığı T_{min} sıcaklığına soğumaya devam edebilmektedir(Şekil 3.12(b)) (Lesoult vd, 1998).



Şekil 3.12 Ötektik üstü küresel grafitli dökme demirin katılaşma sırasının şematik gösterimi. (a) silisyumun eş düzlem kesitinde katılaşmanın yolu, (b) soğuma eğrisi (Lesoult vd, 1998).

3.3.1 Çekirdeklenme

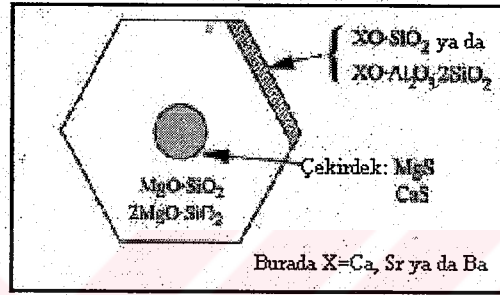
Sıvı içinde küresel grafitli dökme demirin katılaşması üstünde bugüne kadar bir çok teori rapor edilmiştir. Onlar kabaca iki gruba ayrılır. Birisi heterojen çekirdeklenme teorisi ve diğeri kabarcık teorisidir. Heterojen çekirdeklenme teorisi küresel grafitin Mg, Ca, ya da toprak nadir elementlerin sülfidi, oksidi, nitridi ve karbürü olabilen heterojen çekirdekler üstünde çekirdeklendiğini iddia eder. Bu düşünce çok yaygındır. Diğer kabarcık teorisi metalurjistler arasında az bilinir (Itofuji, 1996).

Grafit ve östenitin çekirdeklenmesi heterojen bir proses içerisinde meydana gelir ve onların kristalografik yapıları ile uyumlu ilk varolan çekirdeklere ihtiyaç duyulur. Östenit tercihli olarak karbonu azalmış bölgelerde çekirdeklenir; Ti, V ve Al gibi elementler östenitin kristallenmesi için altlık olarak davranan karbürler, nitratlar ya da karbonitratlar oluşturmayla östenit dendritlerinin sayısını artırmada etkilidir. Katılaşma esnasında oluşmuş grafit kürelerinin sayısı bileşimin ve metalin aşırı soğumasının (ya da soğuma hızının) bir fonksiyonudur. Küreleştirme ve aşılama işlemlerinin tipik ürünleri kalıntıların birkaç çeşidi grafit kürelerinin merkezinde tanımlanmıştır (Labrecque ve Gagne, 1998).

Küresel grafitli dökme demirde grafit çekirdeklenme mekanizmalarının yeni temel anlayışında çekirdeklenme yerlerinin ana gövdesinin karışık fakat çok kararlı sülfürler ve oksitler ihtiva ettiği bulunmuştur (Skaland, 1992). Şekil 3.13 küresel grafitli dökme demirde böyle bir çekirdeklenme yerinin örneğini onun faz bileşiminin şematik temsili olarak

gösterir. Geleneksel küresel grafit üretiminde böyle sülfid ve oksit çekirdeklenme yerlerinin elde edilebilirliği metalurjik işlem prosesi ve ilaveleri kadar ana metalin saflığı ve onun ilaveleri, bekleme zamanları ve sıcaklığı tarafından belirlenir (Skaland, 2001).

Geleneksel olarak ticari aşılama için kalsiyum, baryum, stronsiyum, alüminyum, zirkonyum, toprak nadir elementler, vb gibi metalik alaşımları içeren ferro silisyum alaşımlarına dayandırılır. Bu reaktif elementlerin ana amacı demirde sülfür ve oksijen ile birleşmesiyle grafit için potansiyel heterojen çekirdeklenme yerleri oluşturur.



Şekil 3.13 Demirin küreselleştirme ve aşılama sonrası karışık sülfid ve oksit fazları içeren bir çekirdek parçacığının şematik gösterimi (Skaland, 2001).

Östenitin katı durum dönüşümü esnasında grafit çekirdeklenmesi için yeni çekirdeklerin oluşması imkansızdır. Bu reaksiyon esnasında metalin sıcaklığına ve bileşimine bağlı olarak östenit ferrit+grafit ya da ferrit+perlit+ grafitten birine dönüşebilir.

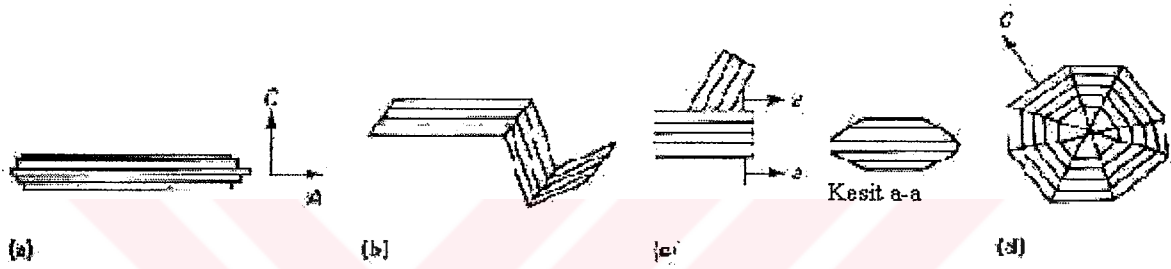
3.3.2 Büyüme

Küresel grafitli dökme demirin büyüme mekanizması üzerinde de bu güne kadar çok sayıda teori rapor edilmiştir. Son teoriler içinde bunlar kabaca iki gruba ayrılır. Birincisi dislokasyon teorisi ve diğeri kabarcık teorisidir.

Dislokasyon teorisi sıvı demir Mg, Ca ve toprak nadir elementlerle işleme tabi tutulduğu zaman vida dislokasyonu ile spiral büyümenin sonucu olarak oluştuğunu iddia eder. Kabarcık teorisinde küresel grafitli dökme demirin büyümesi grafit kristal yapısının doğal büyüme davranışına dayandırılır (Itoufuji, 1996).

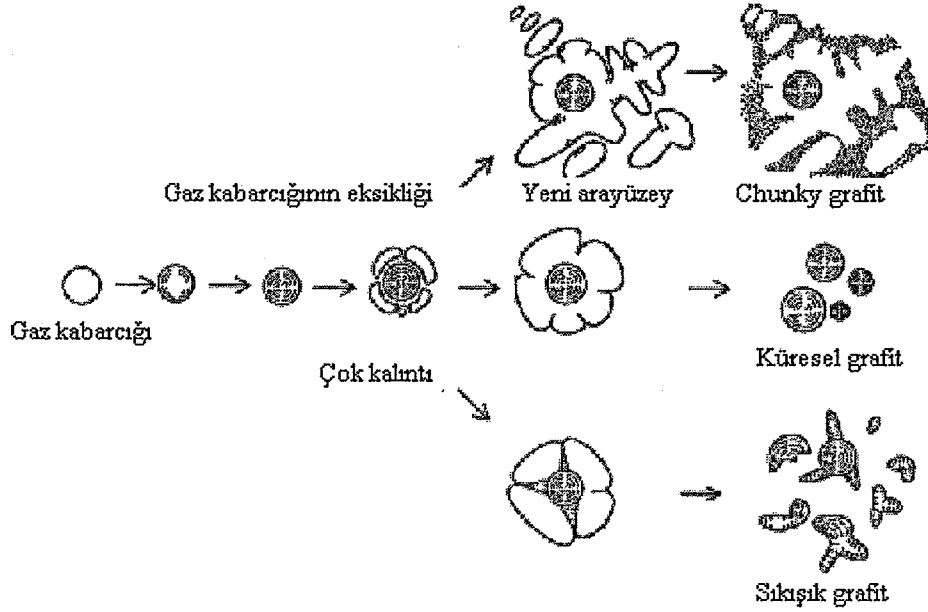
Aynı aşırı soğuma şartlarında grafit ve östenitin büyüme hızı onların farklı büyüme mekanizmalarından dolayı eşit değildir. Grafit parçacıklarının büyüme hızı kristal büyüme yönü ile ve ergiyikteki kalıntı seviyesi ile değişir. Grafit büyümesi farklı sıvı-katı ara yüzey

yapılarının taban ya da prizma düzlemlerinden birinde grafit kristal yapısı içinde birleştirilebilen hız tarafından kontrol edilir. Taban düzlemi $\ll c \gg$ ergiyik ile onun düşük ara yüzey enerjisinden dolayı tercihli büyüme yönüdür. Bu yöndeki büyüme küresel grafit parçacıkları içinde sonuçlanır. Bununla birlikte oksijen, kükürt, kurşun ya da telleryum gibi yüzey aktif elementler ergiyikte varsa onlar yüksek enerji düzlemi (prizma düzlemi $\ll a \gg$) üzerinde adsorblanma eğilimi gösterir. Bu da onun enerji seviyesini $\ll c \gg$ düzleminin altına azaltır. Karışık büyüme şartları heterojen grafit parçacık şekilleri (mercan, sıkışık, patlamış, chunk...) verir. Şekil 3.14 östenit – grafit ötektiğinde meydana gelen şematik grafit çeşitlerini gösterir.



Şekil 3.14 Östenit – grafit ötektiğinde meydana gelen şematik grafit çeşitleri. (a) lamel grafit, (b) sıkışık grafit, (c) mercan grafit, (d) küresel grafit (ASM Handbook, 1992).

Çekirdeklenme ve büyüme teorilerinden kabarcık teorisinin geliştirilmiş çeşidi yer teorisidir. Mg –işlemli sıvı demirlerde oluşan her grafit şekli grafitin çekirdeklendiği ve büyüdüğü yere bağlıdır. Onların büyümesinde hegzagonal grafit kristal yapısının doğal büyüme davranışı diğer faktörler tarafından hiç değiştirilmez. $10\mu\text{m}$ altında küre grafit östenit kabuksuz sıvı demirden direkt olarak çöker, son şekil küresel, sıkışık ve /ya da chunk grafit olmasına rağmen. Küre grafit östenit kabuğu ile sarıldıktan sonra sıvı kanalın durumuna bağlı olarak küresel ve /ya da sıkışık grafit olarak büyür. Küre grafit kalan sıvı demirden ayrılırsa eğer, küresel grafit olarak büyüyecektir. Küresel grafit sıvı kanalından kalan sıvıya temasta ise sıkışık grafit büyüyecek. Diğer taraftan chunk grafit küre grafit ile direkt ilişkiye sahip değildir. Küresel grafitin büyümesi durduğu zaman chunk grafit östenit kabuğu ve östenit dendritleri civarında kalıntı-östenit ara yüzeyinde yeni olarak çekirdeklenir. Bu olay grafit şeklinin grafitin çekirdeklenme ve büyüme yerlerine bağlı olduğunu önerir. Küresel, sıkışık ve chunk grafitin çekirdeklenme ve büyüme prosesi şematik olarak Şekil 3.15'te gösterilir (Itoufuji, 1996).



Şekil 3.15 Küreleştirici ile işlem görmüş sıvı demirde grafit oluşumunun şematik gösterimi (Itoufuji ve Masutani, 2001).

Bir çok model grafit büyüme mekanizmasını açıklamak için geliştirilmiştir. Bununla birlikte onların hiçbiri deneysel verilerle tamamen doğrulanmamıştır.

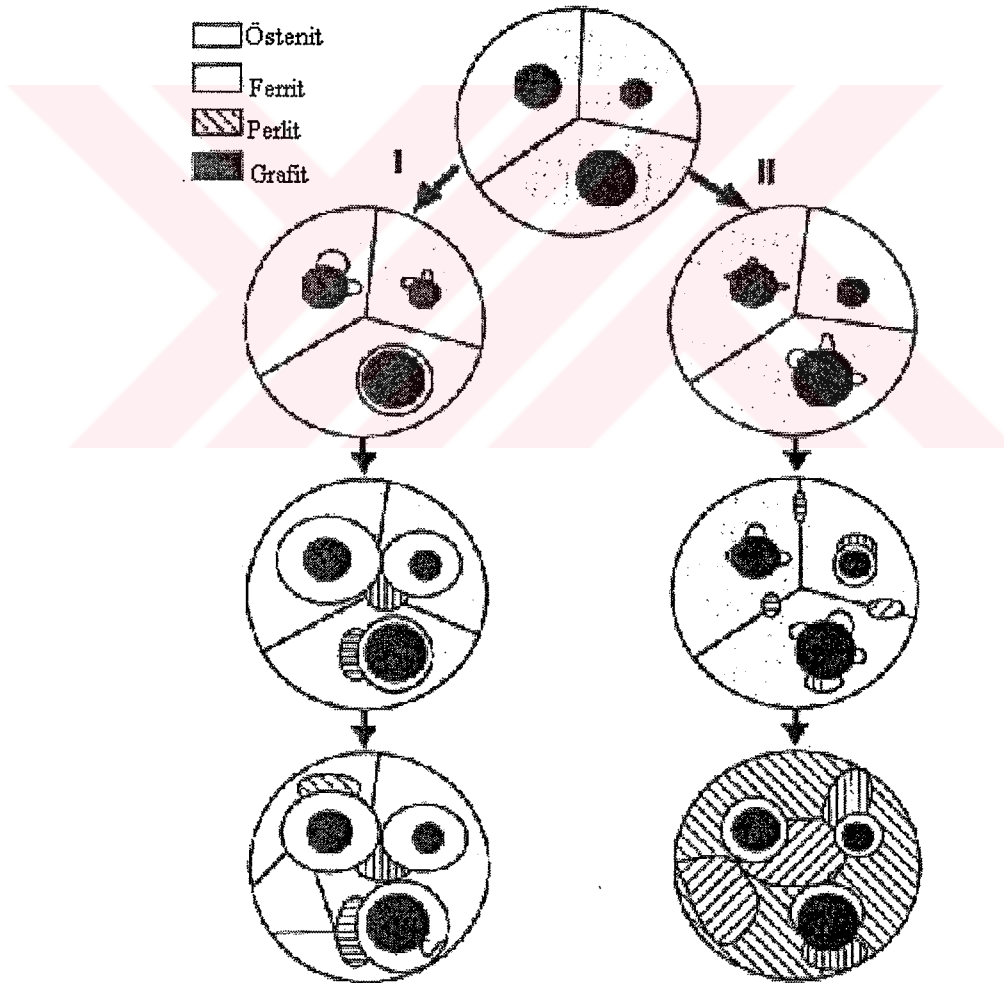
Ötektik reaksiyona benzer olarak ötektoid dönüşümde soğuma hızından etkilenir. Soğuma hızı karbonun difüzyon hızıyla karşılaştırıldığında düşük ise; östenit ferrit ve grafitte dönüşür; karbon atomları grafit parçacıkları için ferrit kabuğundan difüze olur. Üçlü Fe-C-Si sistemlerinde ferrit ve grafit 750 ve 722°C arasında ana fazdan büyür. Ötektoid dönüşüm yarı kararlı ötektoid dönüşüme ulaştığı zaman (yaklaşık 722°C) tamamlanmadıysa eğer perlit ferrit ile birlikte büyür. Endüstriyel dökümlerin üretimi esnasında kalıp bozmadan önce kalıpta izin verilen sınırlı soğuma zamanından dolayı ve alaşım elementlerinin etkisinden dolayı östenit grafit ve perlitte dönüşür (Labrecque ve Gagne, 1998).

3.3.3 Ötektoid Dönüşümün Mekanizması

Literatür verilerine dayanarak küresel grafitli dökme demirin ötektoid faz dönüşüm mekanizmaları aşağıdaki gibi özetlenebilmektedir. Küresel grafitli dökme demirin katılaşmadan sonra yavaşça soğuduğunu kabul ederek denge fazı östenit ve küresel grafitler olmalıdır. Sıcaklık azaldığında, küresel grafitler aşırı doyurulmuş östenit matrisinden çözülmüş grafitin geri çevrilmesinden dolayı büyümeye devam edecektir. Karbon, grafit kürelerinin etrafında karbonu azalmış östenit bölgelerinin oluşumuna neden olarak var olan

küresel grafitlere doğru hareket eder. Bu küresel grafitli dökme demir etrafında zarflar içinde büyüyen ferritin çekirdeklenmesi için tercih edilir yerler sağlar. Ferrit zarfları büyüdüğünde, karbonca zengin bölge ferrit ve östenit arasında ara yüzeyde (ki burada perlit çekirdeklenmesi desteklenir) oluşacaktır. Çekirdeklenmeyi takiben, perlit kolonileri dönüşümün sonuna kadar sürekli olarak büyüyecektir.

Alaşım elementleri ve soğuma hızı ferrit ve perlit reaksiyonlarının kinetiğini etkileyecektir. Perlit teşvik edici elementler dönüşüm sıcaklığını azaltır ve ferrit oluşma hızını azaltır. Sonuç olarak, demirde perlit teşvik eden elementlerin belirli bir seviyesinde, perlit çekirdeklenmesi grafit ve östenit ara yüzeyindeki kadar, östenit tane sınırlarında ve ferrit ve östenit ara yüzeyinde meydana gelir. Dönüşüm işlemi Şekil 3.16 'da özetlenir (Guo and Stefanescu, 1997).



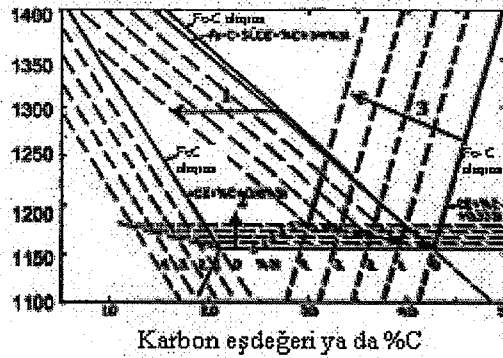
Şekil 3.16 Ötektoid dönüşüm modelleri: (I) α/γ ara yüzeyinde perlit çekirdeklenmesi; (II) γ/γ ve Gr/γ ara yüzeyinde perlit çekirdeklenmesi (Guo ve Stefanescu, 1997).

3.4 Küresel Grafitli Dökme Demirin Bileşiminin Kontrolü

KGDD'in bileşimindeki bütün elementler kontrol edilmelidir.

Karbon: Elektrik fırında ergitme uygulamalarında karbon pik demirden, karbür yapıcılardan ve dökme demir hurdasından gelir. Çelik hurda şarjlarının karbürlenmesi düşük kükürtlü grafit ilavesi ya da grafitlenmiş kokla başarılabilir. Çözelti oranı ve karbon kazanımı kullanılan karbon kaynağının saflığı ile artar. Kupolde ergitmede karbon kok şarjından gelir. Bu element için uygun alan genellikle silisyum içeriğine bağlı olarak %3,4-3,8 dir(ASM Handbook, 1992). Küresel grafitli dökme demirin düzenli ticari kalitelerinde küreler olarak karbon yaklaşık %9 hacim kaplar. Karbon içeriğini artırmak daha büyük küre sayısını teşvik etmektedir. Daha yüksek karbon içeriği metalin akışkanlığını geliştirmeyele dökülebilirliğe fayda sağlar. Karbon hedeflenen alanda küresel grafitli dökme demirin mekanik özelliklerinde küçük bir etkiye sahiptir (Spengler ve Briggs, 1972).

Silisyum: Güçlü bir grafit yapıcı elementtir. Normal bileşim oranlarında silisyum miktarının yükselmesiyle birlikte yapıdaki ferrit oranında artış görülür. Bunun yanında silisyum, çözeltinin dayanımının artmasına ve ferritin sertliğinin yükselmesine katkıda bulunur. Ferrit miktarındaki yükselme, akma ve çekme dayanımını azaltırken % uzama ve darbe dayanımını artırır. Perlitik DDK içinde grafit kürelerinin etrafını saran ferrit akma dayanımını düşürür fakat % uzama ,darbe dayanımını ve yorulma dayanımını yükseltir. Silisyum ferritik DDK'de darbe dayanımını düşürür (Cast irons, 1996).

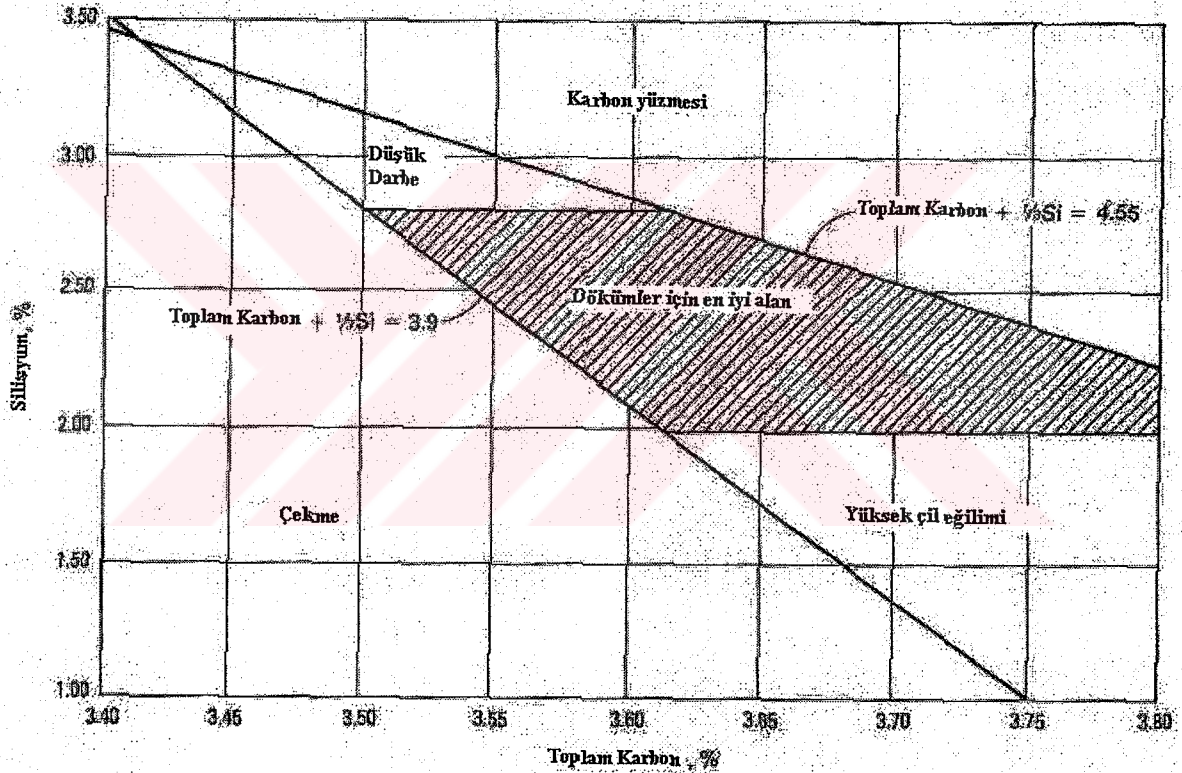


Şekil 3.17 Fe-C-Si katılaşma diyagramının kararlı Fe- grafit ötektik bölgesi (Labrecque ve Gagne, 1998).

Bu şekilden görüldüğü gibi Si aşağıdaki olayla grafit-östenit sistemini destekler; O östenitte karbon çözülebilirliğini azaltır(Şekil 3.17, Ok 1), kararlı ötektik sıcaklığını artırır(Şekil 3.17 , Ok 2), grafitin çökmesini teşvik eder(Şekil 3.17 , Ok 3) ve kararlı ve yarı kararlı ötektik

sıcaklıkları arasında aralığı artırır. Bu son etki özel önemdedir çünkü karbüritik yerine grafitik ötektoid oluşumunu destekler. Si ötektoid sıcaklığını da yükseltir. Bununla birlikte, ferrit içinde katı çözeltide bulunan Si sertliği, en yüksek çekme gerilmesini ve matrisin akma dayanımını artırır fakat uzama ve tokluğunu azaltır (Labrecque ve Gagne, 1998).

Silisyum ham malzemelerden, dökme demir hurdası, pik demir ve ferro alaşımlardan ve aşılama esnasında ilave edilen silisyum içeren alaşımlardan az bir miktar olarak KGDD'e girer. Tercih edilen alan yaklaşık %2-2,8 dir. Silisyum içeriği yükseldiği anda sünek-gevrek geçiş sıcaklığı ferritik demirde artar. Sertlik, akma dayanımı ve çekme dayanımı dahi artar (ASM Handbook, 1992).



Şekil 3.18 Küresel grafitli dökme demirler için tipik karbon ve silisyum alanları (ASM Handbook, 1992).

Karbon Eşdeğeri: Karbon eşdeğeri aslında tüm elementlerce etkilenmektedir. Alaşımların etkisini gösteren CE bağıntısı şu şekildedir:

$$CE = \%C + 0,33\%Si + 0,33\%P + 0,11\%Ni + 0,16 \%Al + 0,13\%Ti + 0,065\%Cu - 0,08\%Mn - 0,33\%Cr - 0,15\%Mo - 0,8\%V \text{ (Dikeç, 1970).} \quad (3.2)$$

Bu bağıntıya rağmen sadece C, Si, ve P içerikleri bir CE değeri ile birlikte dikkate alınabilir. Bu değer demirin akışkanlık ve katılma özelliklerini belirler. Artan CE ile ötektik grafitin hacmi ve sıvı çekmesini desteklemek için grafitin ikinci genişmesi artar. CE yaklaşık 4,2 değerini aştığı zaman birincil grafit dökümün üst yarısına ayrılmaktadır. Grafit yüzmesi, örneğin kesit kalınlığı ile katılma hızı tarafından etkilenir. Ötektik üstü CE değerlerini kullanmak chunk grafit ve cüruf oluşumunu teşvik eder. Genelde CE cidar kalınlığı ve döküm sıcaklığı ile sınırlanır (Henych, 1998). Birkaç tane CE formülü vardır. Onlar döküm özelliklerini ve demirin katılma yapısını değerlendirmede faydalıdır. Karbon eşdeğeri aşağıda verilir:

$$CE = \%C + 1/3(\%Si + \%P) \quad (3.3)$$

CE, 4,3'e eşit olduğu zaman demir tamamen ötektik bileşim ve yapısında olacak ve CE'nin bu değerinden sapma ötektik nispi miktarının bir ölçüsüdür. CE < 4,3 ise dentritlerin bir oranı olacak, CE > 4,3 ise yapıda birincil grafit küreleri olacaktır. Doyma derecesi (Sc) özellikle Alman kaynaklarında ötektik kompozisyona yakınlığı ifade etmek için bazen kullanılır. Sc değeri aşağıdaki eşitlikle belirtilir.

$$Sc = \text{Gerçek } \%C / (4,23 - 0,3(\%Si + \%P)) \quad (3.4)$$

Sc < 1 olduğu zaman demir ötektikaltı ve birincil dentritleri içerecek, Sc > 1 ise eğer yapıda birincil grafit olacaktır. Sc = 1 ise alaşım ötektik tiptedir.

Karbon eşdeğer sıvıgen (CEL) ötektik bileşimde bir minimum değere sahip sıvı sıcaklığının ölçüsüdür. $CEL = \%C + \%Si/4 + \%P/2$ dir. En fazla akışkanlık bu değere varıldığında meydana gelir. CEL Mg işleminden önce işlem görmemiş demir kullanılarak metal bileşimi için bir ısıl analiz testinde rahatlıkla ölçülebilen karbon eşdeğeridir. CEL değerini yaklaşık 4,4-4,5 amaçlamak olağandır. Bundan daha yüksek değerler grafit yüzmesinden kaçınmak için sınırlandırılır. Diğer karbon eşdeğerleri bazen kullanılır ve Şekil 3.18 bileşimin uygun alanı için rehberlik sağlamak için yapılmış bir nomagram örneğidir (ASM Handbook, 1992).

Mangan: Mn kritik üst ötektik sıcaklığını azaltır, grafit/metal ara yüzeyinde ferrit çekirdeklenmesini geciktirir ve ferrit içinde karbonun difüzyon hızını düşürür. Perlit oluşumunu desteklediğinden, çekme ve akma dayanımlarını artırır ve uzamayı azaltır. Bunun yanında tavlamaı geciktirir ve sertleşebilirliği artırır (Labrecque ve Gagne, 1998). Manganın ana kaynağı şarjda kullanılan çelik hurdasıdır. Bu element en fazla süneklilik elde etmek için sınırlı olmalıdır. Normal döküm ferritik dökümlerde %0,2 ya da daha az olmalıdır. Ferritik koşulda ısıl işleme tabi tutulan demirler için %0,5 ya da daha az olmalıdır. Normal döküm

perlitik şartlarında kullanılan demirlerde %1'e kadar var olabilir. Mn istenmeyen mikro ayrışmaya maruzdur. Bu özellikle ağır kesitlerde doğrudur. Ağır kesitlerde Mn düşük sünekliliği, düşük tokluğu ve sürekli perlitini teşvik eden tane sınırı karbürlerini cesaretlendirir (ASM Handbook, 1992).

Magnezyum: Küresel grafit üretmek için gerekli Mg içeriği genellikle %0,04-0,06 arasındadır. İlk başta S içeriği %0,015'in altında ise eğer, daha düşük Mg içeriği (%0,035-0,04 alanı içinde) uygun olacaktır(ASM Handbook, 1992). Onun etkinliği demirin S ve O içerikleri ile ilişkilidir. Çok yüksek Mg içeriği cüruf hatalarını ve karbürü teşvik eder. Bunun yanında, Mg grafit çökmesi için çekirdek oluşumunu destekler. Optimize edilmiş bir Mg içeriği yüksek küre sayısı ve küresellik elde etmek için gereklidir. Yine de Mg genellikle onun küreselleştirme etkisinin güvenilirliğini geliştirmek için toprak nadir elementlerinin küçük miktarı ile bağlantılı ilave edilir (Labrecque ve Gagne, 1998).

Kükürt: Kükürt grafit parçacıklarının çekirdeklenmesi ve büyümesinde esas bir rol oynar. Bununla birlikte S grafit kristalleri tarafından absorbe edilebilen yüzey aktif elementtir. O böylece grafit büyüme mekanizmasını etkiler ve küreler yerine lamel grafit parçacıklarının oluşumunu destekler (Labrecque ve Gagne, 1998). Kükürt şarj edilen metalik ham malzemelerden gelir. Kupolde ergitmede koktan absorblanır. Magnezyum işleminden önce kükürt içeriği tercihen %0,02'nin altında olmalıdır. KGDD'in son kükürt içeriği %0,015'in altındadır fakat Ce bulunuyorsa eğer, demirdeki CeS'in varlığından dolayı daha yüksek olabilir. Aşırı son kükürt içerikleri genellikle MgS cüruf ve atıkları ile birleştirilir. Kupolde ergitilmiş demir kullanıldığı zaman genellikle kireç ya da CaC ile metalde kükürt giderme yapılır. Bu işlem %0,02 ya da daha az seviyeler için Mg işleminden önce sürekli ya da fırın dolusu şeklinde yapılır. Kalıpta ya da metal akıntısındaki işlemler için baştaki kükürt %0,01 ya da daha az azaltılmış olması avantaj olabilir (ASM Handbook, 1992).

Seryum: Ötektik üstü demirde %0,035 seryum miktarı küresel grafitli dökme demir üretecektir. Seryum çok güçlü karbür kararlaştırıcıdır. Seryum ile işlem görmüş demirler %3,80'nin üzerinde karbon içeriğine sahip olmalıdır ve çok fazla ferro silisyum aşılایıcıya sahip olmalıdır (Spengler ve Briggs, 1972). Ce, küresel grafit oluşumunu engelleyen istenmeyen kalıntı elementlerini nötralize etmek ve aşılایmaya yardım etmek için ilave edilir. Ce %0,003-0,01 arasında var olması istenebilir. Ce çok düşük ikincil elementli demirler içinde istenmeyebilir ve özellikle ince kesitlerde kalın küresel olmayan grafiti teşvik edebilir. Kalıntıların kasten ilavesi bu etkiden kaçınmak için gerekli olabilir. Ce grafit yapısını geliştirmek için çoğu magnezyum ilave alaşımları ve aşılایıcıların ikincil unsuru gibi ilave

edilir. Hurda KGDD'in tekrar ergitilmesi esnasında uzaklaştırılır (ASM Handbook, 1992).

Küresel Olmayan Grafiti Teşvik Eden İkincil Elementler

Ana metalde bulunan belirli elementler küre oluşumunda engelleyici bir etkiye sahiptir. Aşağıdaki elementler zararlı olarak bilinir:

Alüminyum: %0.13 üzerinde, Arsenik: %0.09 üzerinde, Bizmut: %0.002 üzerinde

Kurşun : %0.005 üzerinde, Kalay: % 0.04 üzerinde, Titanyum: %0.04 üzerinde

Antimonit, telleryum ve selenyum dahi zararlıdır. Bu elementlerin iki yada daha fazlasının birleşmiş etkisi daha fazla zararlı olabilir. Kalsiyum ile birlikte seryum ve diğer nadir toprak elementlerinin ilavesi engelleyici elementlerin zararlı etkilerinin çoğunu nötralize eder ve çoğu MgFeSi küreselleştirici alaşımları %0.3-1.0 Ce ve diğer nadir toprak elementlerini içerir. %0.5-1.0 Ca dahi genellikle vardır (Brown, 1994).

Perliti Teşvik Eden İkincil Elementler

Ni, Cu, Mn, Sn, As ve Sb'nin hepsi perliti teşvik eder ve artan etkiye göre burada sıralanır. Onlar ham malzemelerin kalıntı elemanı olarak demire girebilir. %0,3'e kadar Cu ve %0,1'e kadar kalay tam perlitik yapılar gerekli olduğu zaman pota ilaveleri olarak kasten kullanılabilir. Hemen hemen bütün kalıntı elementler perlit oluşumunu teşvik eder ve onların etkileri birbirine etkilenir. Bundan dolayı yüksek saflıkta bir şarj normal dökümde tam ferritik yapıları ya da daha az tavlama ferritik yapıları başarmak için esastır (ASM Handbook, 1992).

Alüminyum: Grafit şeklini bozucu olmamasına rağmen, diğer istenmeyen özelliğe sahiptir. Aşılmalı içinde çili önlemek için görev yapsa bile miktarı sınırlandırılmalıdır (Spengler ve Briggs, 1972). Çünkü KGDD'de alüminyumun çok az miktarlardaki varlığı bile yüzey altı toplu iğne boşluk gözenekliliğini ve cüruf oluşumunu teşvik eder. Alüminyumun çok genel kaynakları özellikle hurda otomobil makinelerinden alüminyum pistonları şeklinde çelik ve dökme demir hurdaları içindeki bulaştırıcıdır. Bir başka kaynak alüminyum içeren aşılmalılardır. Son metal akıntı aşılması faydalıdır. %0,01'e kadar düşük alüminyum, magnezyum içeren KGDD içinde toplu iğne boşluklarına sebep olmak için yeterli olabilir (ASM Handbook, 1992).

Fosfor: Grafit oluşumunu teşvik etmesine rağmen, fosfor küresel grafitli dökme demirde zararlı element olarak sınıflandırılır. Fosfor perlit oluşumunu genişletir ve sertlik ve çekme

dayanımını artırır fakat uzamayı azaltır. Fosfor düşük süneklilik ve hataları teşvik ettiği için normalde %0,05 altında tutulur (ASM Handbook, 1992). Bu elementin kontrolü yüksek mekanik özellikleri özellikle darbe direncini başarmak için önemlidir. Tavsiye edilen en yüksek değerler normal döküm ferritik kaliteler için %0,03 ve perlitik kaliteler için %0,05'tir (Labrecque ve Gagne, 1998).

Karbürleri Teşvik Eden İkincil Elementler

Cr, V ve B karbür teşvik edicidir. Mangan dahi bu elementlerin karbür kararlaştırıcı etkilerini artırabilir. Özellikle ağır kesitlerde ayrışma tane sınırı karbürlerini teşvik eder (ASM Handbook, 1992). Karbürler ötektik karbür, dökümlerin içinde ters çil ya da hücre sınırlarında ayrışma karbürleridir. Ötektik karbürlerin sebepleri çoğunlukla yetersiz aşılama, ana metal bileşimi, karbürü teşvik eden elementlerle birleşik olarak yüksek soğuma hızıdır. Karbür oluşumunu önlemek için Cr ve V %0,05'in altında ve B %0,03'ün altında olmalıdır (Henyeh, 1998). Onlar ergitme için metalik ham malzemelerin dikkatli seçimiyle kontrol edilir.

4. ISIL ANALİZ

Verilen bir malzeme soğutulduğu ya da ısıtıldığı zaman yer alan ısı olayların araştırılmasında kullanılan ısı analiz yöntemi çok faydalı bir yöntemdir. Sıvı-katı dönüşümlerinde, bütün katılaşma işlemi soğuma eğrilerinde kaydedilebilir ve analiz edilebilir. Böyle üretilmiş bilgi katılaşma olayını anlamak için nicel yada nitel anlamda kullanılabilir (Fras vd., 1993).

Sıvı metal dışarıdan ısı emilmesi ile soğuduğu zaman, sıcaklık azalır. Sıcaklık, ergiyik içindeki ısı enerjisinin toplam miktarını temsil eder ve atomların kinetik enerjisi ile ilgilidir. Bir ergiyik soğuduğu zaman onun atomlarının ısı titreşimi azaltılır. Bu enerji özgül ısı(kj/kg.°C) olarak ifade edilir. Sıvı sıvıgen olarak isimlendirilen bir sıcaklığa ulaştığında atomlar arasında bağ makro ölçü seviyesinde çok rijit olur. Daha çok enerji sıvı katı duruma dönüşene kadar bırakılır. Bu aşamada bırakılan enerji ergime gizli ısı, ergime entalpisi ya da kısaca gizli ısı olarak isimlendirilir. Gizli ısı kj/kg olarak ölçülür (Novacast, 2002).

Isıl analiz, bir metal ya da diğer malzemelerde olabilecek yapısal değişimleri bulmak ve çalışmak için ısı etkileri kullanır. Bu gibi değişimler katı durumda katılaşma, ergitme ya da faz değişimleridir. Metalin kütesinin soğumada ısı kaybetme ya da ısı kazanma oranı, metal ile çevresi arasındaki sıcaklık farkına bağlıdır. Soğuma ya da ısınmada düzenlenmiş sıcaklık çevresinde (bir fırın içinde gibi) oran sabit sıcaklık farkı ile kontrol edilebilir. Bir faz değişimi meydana geldiği zaman, ilave ısı numune tarafından absorblanır ya da bırakılır. Bu belirlenen ısı denge diyagramlarında ya da diğer metalurjik araştırmalar için ısınma ve soğuma eğrilerinin kullanımının esasıdır. Bu gibi soğuma eğri deneylerinden verilen en az bilgi geçişin sıcaklık aralığı ya da kritik sıcaklığıdır. Bununla birlikte, özgül ısı gibi bir fiziksel özellik dahi eğrilerle direkt ilgilendirilebilmektedir.

Durum değişimleri ya da diğer geçişler iki tarzda oluşur:

1. Gizli kalmış ısıdan oluşan değişimler.

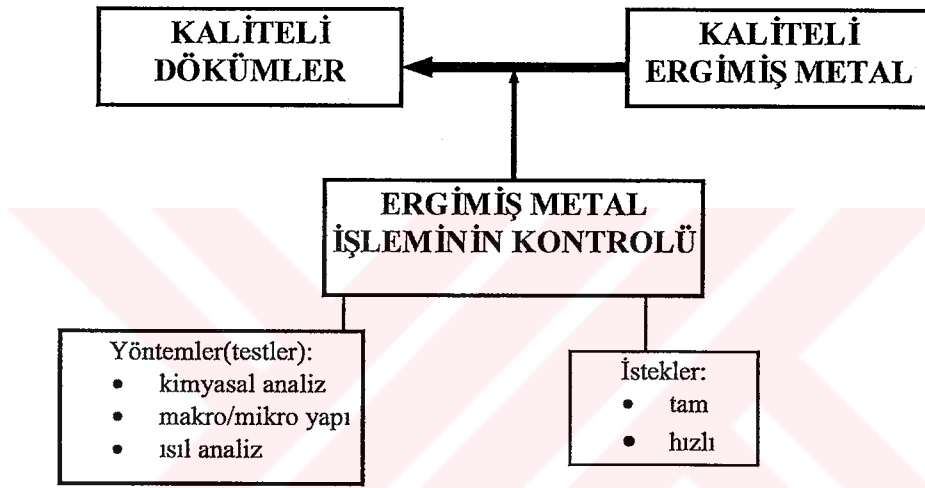
a-) Sabit sıcaklıkta- saf element, bileşik, ötektik vb. için

b-) Katı çözünlüklü bir alaşımın katılaşmasındaki gibi bir sıcaklık aralığı üzerindedir. Bu bazı durumlarda ötektik ya da peritektikten dolayı sabit sıcaklık ile takip edilecek ya da tamamlanacaktır.

2. Kritik nokta için sıcaklık yükselme aralığı üzerinde ilave bir özgül ısıdan oluşan değişimler (Andrews, 1973).

Bu özelliklerden hareketle başlangıçta ısı analiz faz diyagramlarının belirlenmesi için kullanılan klasik bir yöntem olmuştur. Belirli bileşimdeki alaşımı ertir ve soğuturken elde edilen zaman-sıcaklık eğrisinden sıvılaşıma sıcaklığı kolayca tespit edilebilir. Katılaşımanın başlangıç noktası katılaşıma ısısının açığa çıkması sonucu soğuma eğrisi eğiminde görülen değişiklikten anlaşılır. İdeal durum deneysel sıcaklık-zaman eğrilerinde görülmemektedir. Bunun sebebi, kristallerin sıvıda çekirdeklenmeleri ve büyümeleridir (ASM Handbook, 1988).

Daha sonraki yıllarda ısı analiz, ertmiş metalin kalite kontrolü için endüstriyel uygulamada kullanılan ana yöntemlerden bir tanesi olmuştur (Şekil 4.1). Dökümhanelerde ısı analiz, soğuma eğrisi analizi vasıtasıyla uygulanmaktadır (Frost vd., 1992).



Şekil 4.1 Ergimiş metal işleminin kontrol yöntemleri ve istekleri (Frost vd,1992)

Akademisyenler ertmiş metal ürün kalitesini kontrol etmek ve önemli fiziksel ve kimyasal reaksiyonları çalışmak için uzun yıllar bir takım olarak ısı analizi kullanmıştır. Özellikle elektronik sanayiinde ve bilgisayar teknolojisindeki gelişmelerle ısı analiz takımı kullanımı kolaylaşmış ve gelişmiştir.

Yöntem başlangıçta sadece metalin kimyasal analizi ve tane yapısını test etme yönünde geliştirilirken bugün metalin katılaşıma esnasında oluşan tüm faz değişimlerini simule ederek önemli sonuçlar verecek aşamaya ulaşmıştır.

Yöntemin dökme demirde kullanımıyla, metalin kimyasal analizi (%C, %Si, CE=karbon eşdeğeri, Sc=karbon doymuşluğu), çekirdek seviyesi, grafitleşme eğilimi, küresellik, küre sayısı, aşılama önerileri, Mg-işlem önerileri, çekinti sakatına eğilim, gaz ve cüruf sakatına eğilim konularında bilgi sağlanmaktadır (Günay ve Demir, 1997).

Aluminyumda kullanımıyla tane inceltme, silisyum modifikasyonu , bakır ve magnezyum silisidin(Mg_2Si) tane sınırlarında çökmesi ve diğer fazların belirlenmesi sağlanmaktadır.

Bu bilgileri sağlamak için, sıvı metal standart boyuttaki merkezinde ısı çift olan (sabit modül) test kabına dökülür ve zamana bağlı olarak sıcaklık değişimleri bilgisayar ve uygun donanım ile kaydedilir. Kaydedilen veriler ile metalin kendine has soğuma eğrisi, bu eğrinin birinci ve ikinci türevleri çizdirilir. Çeşitli fazların katılaşması esnasında soğuma hızları kadar soğuma eğrisindeki durma sıcaklıkları bir ergiyiği sınıflandırmak ve bir kalıba döküldüğündeki davranışını ilişkilendirmek için kullanılır. Bu eğriler değerlendirilerek yukarıdaki bilgiler elde edilmektedir.

Isıl analizin etkin kullanımı ile metalurjik kaynaklı sakatı düşürmek, işlenebilmeyi iyileştirmek, döküm verimini artırmak, aşılama ve katkı maddelerinden tasarruf yapmak ve optimize etmek, faz değişimlerinin niteliği hakkında bilgi edinmek ve bunun yol açacağı sonuçları önceden görmek mümkündür.

Isıl analiz yöntemi, sağladığı bu bilgiler ve avantajlarla, daha yüksek kalitede üretim yapılmasını sağlamış ve dökümhanelerde kalite kontrol işlemini kolaylaştırmıştır.

4.1 Nicel Isıl Analiz

Soğuma eğrileri örnekte açığa çıkan ısı ve örnekten uzağa taşınan ısı arasındaki dengeyi belirtirler. Genellikle bunu matematiksel olarak ifade etmek kolaydır. Fakat, sıvıdan uzağa ısının taşınması çoğunlukla çok karmaşıktır ve deneysel koşullara bağlı olarak bir çok şekilde tanımlanabilir. Aşağıdaki açıklamada, deneysel düzenden uzağa ısı taşınımını anlatmak için sadece dQ/dt kullanılacaktır. Taşınan ısı örnekte açığa çıkan ısı ile eşit olmalıdır. Katılaşma sürecinden önce ve sonra bu ısı, ısı kapasitesindeki kayıpla dengelenir. Katılaşma sürecinin başlamasından önce analitik olarak şöyle yazılır.

$$\frac{dQ}{dt} = V \cdot \rho \cdot C_p \frac{dT}{dt} \quad (4.1)$$

Burada V örneğin hacmi, ρ sıvının yoğunluğu, C_p ısı kapasitesi ve dT/dt sıvının soğuma hızıdır. Soğuma eğrilerinde dT/dt , eğrinin katılaşma başlamadan önceki eğimidir. Eğimi zamanın bir fonksiyonu olarak değerlendirerek, şayet ρ ve C_p biliniyorsa dQ/dt 'yi deneysel olarak bulabilir ve bunu da sonradan sıcaklık-zaman eğrisinin analizi için kullanabiliriz.

Sıvı, sıvılaşma sıcaklığına soğuduğunda kristaller çekirdeklenerek büyümeye başlar. Eş.4.1'deki ısı dengesi

$$\frac{dQ}{dt} = \left(V \cdot \rho \cdot C_p + \rho \cdot \Delta H \cdot \frac{df}{dT} \right) \frac{dT}{dt} \quad (4.2)$$

halini alır. Burada ΔH katılaşma ısı ve df/dT değişen bir sıcaklıkta oluşan katının hacim oranıdır. Bu durumda sıcaklık-zaman eğrisinin şekli meydana gelen katının hacim oranına bağlıdır. Katının hacim oranındaki artış hızı arttıkça sıcaklık-zaman eğrisinde dT/dt 'nin eğimi azalacaktır. Katının hacim oranı kristallerin sayısı ve büyüme hızlarına bağlıdır.

Kristaller, normal olarak sıvının sıcaklığı, sıvılaşma sıcaklığına veya ötektik sıcaklığa düşünce çekirdeklenirler. Buna rağmen sıvının sıcaklığı düşmeye devam eder. Belirli bir zaman sonra, eğrinin eğimi önce yavaşça sonra daha hızlı azalmaya başlar. Kristal oluşumunun ilk safhalarında büyüyen kristaller (ve ısı açığa çıkışı) küçüktür ve dolayısıyla bütün sıvının sıcaklığı üzerinde büyük etkileri görülmez. Sıvılaşma sıcaklığına yakın düşük aşırı soğuma sebebiyle büyüme hızı da düşüktür. Sıcaklık düştükçe aşırı soğuma artar dolayısıyla büyüme hızı ve kristal alanı artar. Sonuçta daha fazla ısı açığa çıkacak ve sıcaklık-zaman eğrisinin eğimi azalmaya başlayacaktır. Eğimdeki değişiklik daha erken başlarsa hızla ilerleyecektir. Sıcaklık artığında serbest kristallerin büyüme hızları tekrar düşecektir. Fakat, bu safhada büyümüş olduklarından birim zamanda hacimsel büyümeleri de büyük olacaktır. Sonuçta, sıcaklık, kristallerin büyüme hızı ve alanı ısı çıkışını karşılayana kadar artmaya devam edecektir. Büyüyen kristallerin alanı arttıkça büyüme hızı düşecek ve sıvının sıcaklığı sıvılaşma veya ötektik sıcaklığına yakın olacaktır (ASM Handbook, 1988).

4.2 Isıl Analiz Teknikleri

Isıl analiz, enerji, ölçü ve ağırlık değişim parametrelerine göre üç ana grupta sınıflandırılabilir. Bu sınıflandırmada, enerji değişimlerine dayandırılan yöntem çok yaygın kullanılmaktadır. Bunun sebebi bu yöntemden daha fazla bilgi edinilmesidir. Enerji değişimlerine göre ısıl analiz beş farklı yöntemle ayrılır (Fras vd., 1993). Bunlar;

1-Soğuma ya da Isınma Eğrisi (Sıcaklık-Zaman çizimi)

a-) Türetilmiş Soğuma (Isınma) Eğrisi

b-) Ters Oran Eğrisi

2-Diferansiyel Tarama Kalorimetresi (DSC)

3-Diferansiyel Isıl Analiz (DTA)

4-Newtonian Isıl Analizi

5-Fourier Isıl Analizi

4.2.1 Soğuma Eğrileri

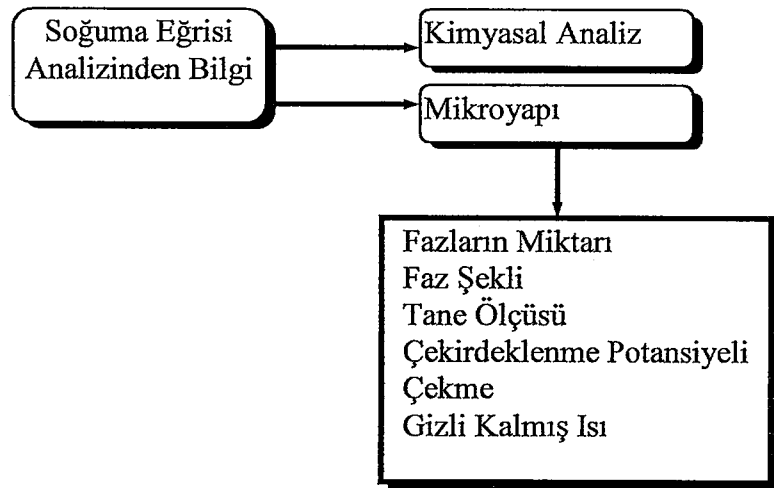
Sadece soğuma eğrilerinin kullanıldığı ısıl analize geleneksel ısıl analizde denilmektedir. Geleneksel ısıl analizde, bir alaşım gerekli sıcaklığa ısıtılır ve sabit oranda soğumasına izin verilir. Sıcaklık zamanın bir fonksiyonu gibi kaydedilir. Soğuma eğrilerinde sadece faz dönüşümüyle birleştirilmiş dönüşümün önemli gizli ısısı varsa eğer bir faz dönüşümü gösterir. Bu teknik ile faz dönüşümünün başlangıç ve son noktalarını belirlemek güçtür (Tuttle, 1985).

Katılaşma bilgisi soğuma eğrisinde içerilmesine rağmen, çok sık ölçülmüş değişimler sadece alaşım bileşimi ve faz değişim sıcaklıkları ile ilişkilendirilir. Soğuma eğrilerinin son şeklini etkileyen iki ana faktör vardır:

- Kalıptan çevresine ısı transferi
- Numune dökümünde meydana gelen faz dönüşümleri

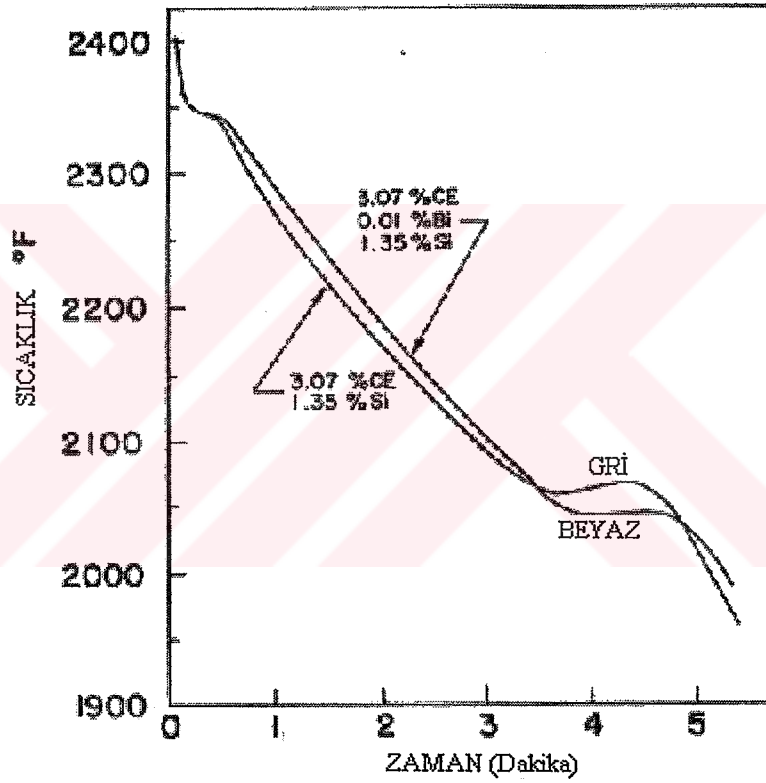
Soğuma eğrisi analizinden elde edilmiş bilgi sadece ergimiş metal işleminin kontrolü için değil hem de katılaşma olayını nicel olarak anlamak içinde kullanılabilir.

Soğuma eğrilerinden elde edilmiş bilgilerin çeşitleri Şekil 4.2 'de özetlenir (Frost ve Stefanescu, 1992).



Şekil 4.2 Soğuma eğrilerinin analizinden bilgisayar vasıtasıyla elde edilebilir tipik bilgiler (Frost vd.,1992)

Soğuma eğrilerinin bu özelliklerinden hareketle, dökümlerde yapının gelişimini incelemek mümkündür. Aynı karbon eşdeğerli ve silisyum içerikli beyaz ve gri dökme demirin tipik soğuma eğrisi Şekil 4.3'te gösterilir. Bu soğuma eğrilerinden sıvıgen sıcaklığı ve ötektik durma sıcaklığı soğuma eğrisinin yüksek ve düşük durmalarından okunabilmektedir. Bu kritik parametreler ve durmanın zaman periyodu ya da aşırı soğumanın derecesi ve/ ya da parlamannın hızı, kimyasal bileşim, demirin çeşidi ve katılaşma işlemi hakkında nitel sonuçları belirlemek için kullanılmıştır. Katılaşma prosesi ile ilgili bütün bilgi soğuma eğrisinde içerilir. Bununla birlikte, bu bilgi eğrinin sadece görsel incelemesiyle çıkarılamaz (Ekpoom ve Heine, 1981).

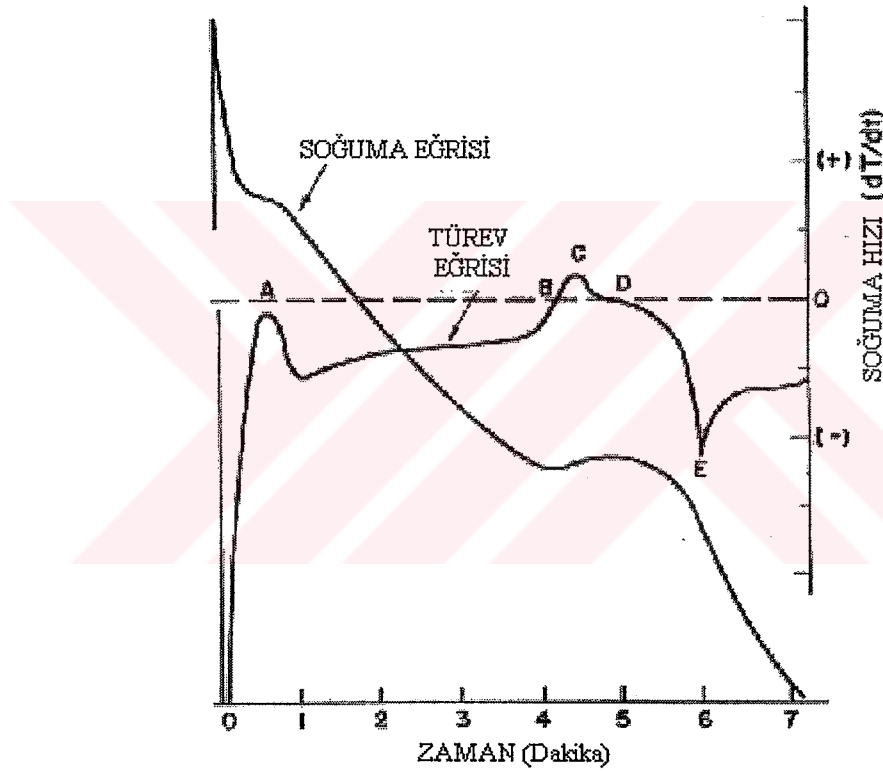


Şekil 4.3 Gri ve beyaz dökme demirin soğuma eğrileri (Ekpoom ve Heine, 1981).

4.2.1.1 Türetilmiş Soğuma Eğrileri

1970'in sonlarında küçük mikro işlemcilerin çıkması ve A/D(analog/dijital) dönüştürücülerin gelişimiyle soğuma eğrilerinin kaydedilebilmesi ve yorumlanabilmesi mümkün olmuştur. Böylece yöntem soğuma eğrilerinden ve türevlerinden yararlanılarak mikroyapı belirleme için yaygın kullanılmaya başlanmıştır. Türevin kullanılması 1970'lerde Backerud tarafından ilk kez gerçekleştirilmiş ve alaşımların katılaşmasındaki oluşan fazlar ile iyi ilişkilendirilmiştir (Backerud ve Sigwort, 1989).

Bu yöntem soğuma eğri verilerinin farkının alınması ile elde edilmiştir. Bu türetilmiş eğriye türev eğrisi ya da soğuma hızı eğrisi de denmektedir. Temper dökme demir bileşiminin beyaz türü için tipik türev eğrisi Şekil 4.4'te verilir. Bu yöntem ile soğuma eğrisinden elde edilen parametrelere ilave olarak soğuma hızı tespit edilir. Bu yöntemle ilgili bir çok çalışma vardır. Çoğu demirin katılaşma tarzını ya da normal döküm yapısını tahmin etmek için kullanılabilen muhtemel kontrol parametresi olarak soğuma eğrisinin bazı özel kısımlarının soğuma hızıyla ilgilenmiştir. Bununla birlikte katılaşmanın ısıl olaylarından başka numunenin soğuma hızını etkileyen, döküm sıcaklığı, numunenin kütlesi ve sistemin ısı transfer özellikleri gibi diğer faktörler vardır (Ekpoom ve Heine, 1981).



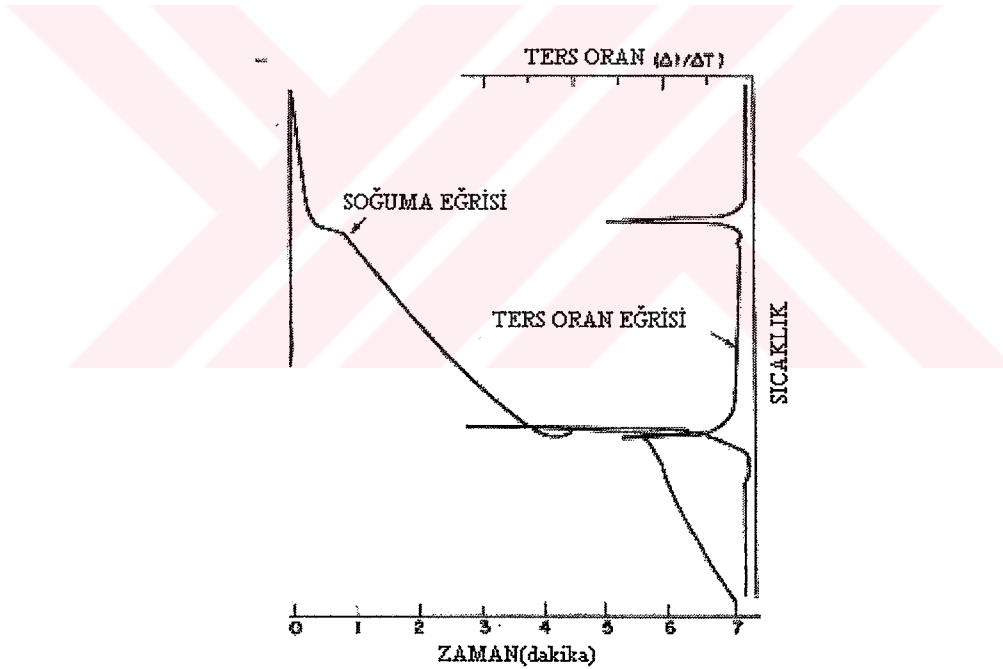
Şekil 4.4 Beyaz temperdökme demirin soğuma eğrisi ve onun türev eğrisi (Ekpoom ve Heine, 1981).

4.2.1.2 Ters Oran Eğrisi

Türetilmiş soğuma eğrisi tekniğinin bir eksikliği, sıcaklık bilgisinin, bu eğrinin çizildiği yoldan dolayı (Soğuma oranı zamana karşı çizilir) direkt belli olmamasıdır. Bu türetilmiş eğri ile orijinal soğuma eğrisinin birlikte çizilmesiyle giderilebilmektedir. Bununla birlikte, ters oran eğrisi olarak isimlendirilen, sıcaklık bilgisini kaybetmeksizin elde edilmesini sağlayan benzer bir analiz yolu vardır. Ters oran eğrisi gibi bilinen teknik Şekil 4.5'te gösterilir. Burada,

soğuma oranının tersi zaman yerine sıcaklığa karşı çizilir. Isıl analizin bu çeşidi orijinal soğuma eğrisinin durma sıcaklıklarını uygun şekilde tanımlamak için kullanılabilir sivri piklerle nitelendirilebilir. Böylece kritik sıcaklıklar türetilmiş eğri ya da soğuma eğrisinden daha çok doğru olarak ters oran eğrisinden okunabilir. Aslında bu teknik faz diyagramlarının çalışılmasında uzun zaman için metalurjistler tarafından kullanılmıştır. Özellikle Fe-C-Si sistemi için uygulanmıştır. Bununla birlikte soğuma eğrisi ve türetilmiş soğuma eğrisi tekniklerinin sınırlamaları ters oran tekniği için uygulanır (Ekpoom ve Heine, 1981).

Bu teknik sadece malzemenin az miktarları dönüşümde içerildiği zaman ya da sadece dönüşümün küçük bir gizli ısıya reaksiyona eşlik ettiği zaman meydana gelen faz dönüşümlerini gösterecektir (Tuttle, 1985). Ters oran soğuma eğrisi analizi, katı durum dönüşümünde meydana gelen küçük ısı olayları değerlendirmek için güvenilir bir yöntemdir ve sonuçları mikroyapısal özellikler için yaklaşık olarak ilişkilendirilebilmektedir (Suarez vd., 2000).



Şekil 4.5 Bir soğuma eğrisi ve onun ters oran eğrisi ile ilişkisi (Ekpoom vd., 1981).

4.2.2 Diferansiyel Tarama Kalorimetresi(DSC)

Diferansiyel tarama kalorimetresi, bir test numunesi ve bir referans malzemeyi aynı sıcaklıklarda tutmak için gerekli elektrik gücündeki farkı kaydeder. Güç farkı, numunede fiziksel ve kimyasal geçişler esnasında yükselme gösterir ve geçiş esnasında absorblanan ya da serbest bırakılan ısı enerjisiyle eşittir.

İki numune kabı (test ve referans malzemeleri için) ayrı ısıtma halkalarında kalıplanır. Bir direnç termometresi her bir kaba tutturulur. Bir kontrol ünitesi her bir halka için sağlanmış gücü düzenler. O, numune ve referans sıcaklıklarının eşitliğini korur ve o, başlangıçta düzgün oranda bu sıcaklıkları yükseltir ya da alçaltır. Numuneler kullanılmadan önce metal folye paketlerine koyulur. Çoğu kez boş bir folye numune tutucusu referans gibi kullanılabilir.

Güç değişimleri doğru bir çizgi üstünde aşırı gösterilmiş pikler gibi grafik kaydedicilerle kaydedilir. Pikin alanı absorblanan ya da yayılan enerjinin miktarına uyar. Onun grafikteki pozisyonu geçiş sıcaklığını gösterir.

Fiziksel geçişler ve numune bozulmasını ayırt etmek için analizler, bir inert gaz atmosferinde uygulanabilir. Bozulmanın ürünleri ısı iletkenlik hücresiyle örneklendirilmişse, diferansiyel tarama kalorimetre grafiğinde ısı değişimlerinden dolayı pik şeklinde bir yardımcı kaydedicide gösterilir (Willard vd., 1965).

Katılaşma ve katı durum faz değişimlerinin nicel ısı analizi çoğu metalurjik sistemlerde diferansiyel tarama kalorimetresi ya da DTA ile yapılmıştır. Bunların vasıtasıyla üretilmiş ısıların büyüklükleri ve sonuç olarak katılaşmış fazların hacim kesirleri kurulabilir.

DSC tekniği faydalı bilgiler sağlamasına rağmen, o numune ve laboratuvar teçizatlandırılmasındaki sınırlamalardan dolayı dökümhanelerde sınırlı kullanılır (Fras vd.,1993).

4.2.3 Diferansiyel Isıl Analiz(DTA)

Bu teknik, bir faz dönüşümü olan bir alaşım ve bir kontrol ya da bir standart numune arasındaki sıcaklık farkını, numunelerin her ikisi de soğutulurken çizer. Platin, nikel ve Al_2O_3 kontrol gibi kullanılabilir.Çünkü onlar tipik çalışılan sıcaklık alanlarında bir faz dönüşümüne uğramaz.

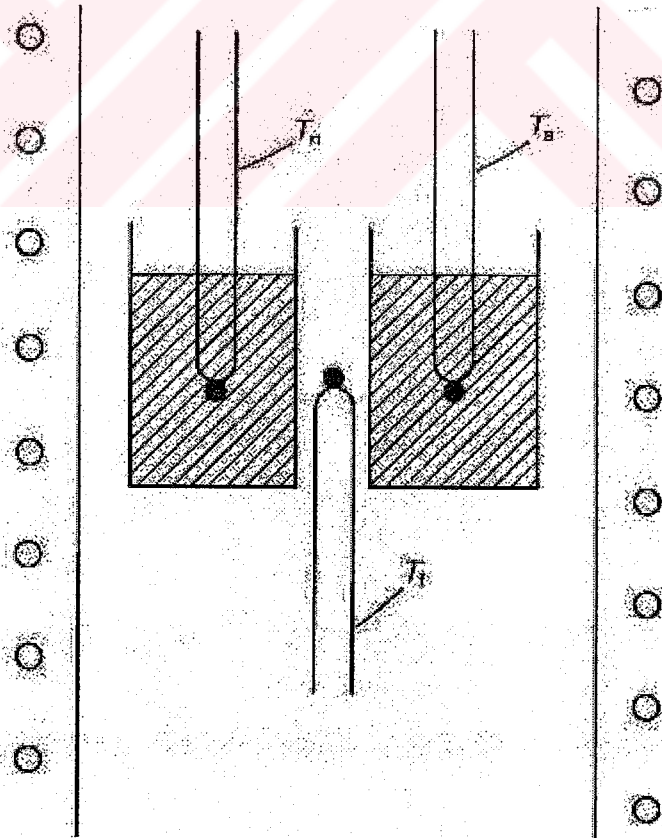
İki ısı çifti kullanılır: bir tanesi numune ve kontrol arasında sıcaklık farkını ölçmek için; ve diğeri kontrolün sıcaklığını ölçmek için. Numunenin dönüşüme başladığı noktada, sıcaklıkta düzenli düşüş geçici olarak durur. Fakat kontrolün sıcaklığında düşüş düzenli olarak devam eder.

Bu yöntem sadece faz dönüşümlerinin ısı olaylarını ölçer ve doğal ısı transferinin ısı olayının etkilerini bertaraf eder. Diferansiyel ısı analizinde, ısı olaylardaki fark ısıtılan ya da

soğutulan bir hacimde birbirine yakın yerleştirilmiş aynı ısıtma ya da soğutma şartlarında numune ve nötr kütlelerin sıcaklık farkına göre ölçülür. Bu prensibin kullanımıyla önceki tekniklerin sınırlamaları tamamen bertaraf edilir. Reaksiyon ısısı ve reaksiyon hızı kolayca hesaplanır (Ekpoom ve Heine, 1981).

Fark sıcaklığına karşı soğuma sıcaklığının çizimi kontrol ve numune arasında soğuma özelliklerinde farklılıklar gösterir ve numunede bir faz dönüşümünü yansıtır. Bu teknik sadece dönüşümün küçük bir gizli ısısına sahip olan faz dönüşümlerini ortaya çıkarabilir (Tuttle, 1985).

Şekil 4.6'da bir diferansiyel ısı analiz düzeneği gösterilir. Analiz edilecek örnek ve standart örnek, her birinde birer ısı çifti ile, aynı ocağa yerleştirilir. Ocağın sıcaklığı ve soğuma hızı da ayrı bir ısı çifti ile ölçülür ve kontrol edilir. Standart örnek ve analiz örneği deneyin başlangıcında aynı sıcaklıklara sahip olmalıdır. Soğuma sırasında örnek ısı veren faz değişimlerine uğrayacaktır. Açığa çıkan ısı sebebiyle tepkime sırasında örneğin sıcaklığı standart örneğin sıcaklığından farklı olacaktır. Ocak sıcaklığı, örnek ve standart örnek sıcaklıkları aynı zamanda kaydedilmektedir.



Şekil 4.6 Diferansiyel ısı analiz cihazının temel yapı şeması. T_n standart sıcaklığı, T_s numune sıcaklığı ve T_f ocak sıcaklığı (ASM Handbook, 1988)

Şekil 4.6'daki deneysel düzenek kullanılarak normal olarak standart örnekle örnek arasındaki sıcaklık farkı belirlenir, ocağın sıcaklığı ölçülmez. Dolayısıyla sadece $(T_s - T_n)$ ve T_s bilinmektedir. Burada T_n standart örneğin sıcaklığıdır.

Katılma hızı normal olarak basit bir matematiksel analizle bulunur. Bu analiz:

$$\left(\frac{dT_s}{dt}\right) \rho \cdot C_p^s \cdot V_s + \Delta H \cdot \rho \cdot V_s \cdot \frac{df}{dt} = \eta (T_s - T_f) \quad (4.3)$$

eşitliği ile tanımlanır. Burada dT_s/dt örneğin soğuma hızı, C_p^s örneğin özgül ısısı, V_s örneğin hacmi, ΔH katılma ısısı, df/dt birim zamanda oluşan katının oranı, T_s ve T_f sırasıyla örnek ve ocak sıcaklığı ve η ısı transferi katsayısıdır.

Eşitlik 4.3'ün sağ tarafındaki ikinci terim katılma başlamadan önce 0'dır. Isı transferi katsayısı η bu safha için dT_s/dt , T_s ve T_f ölçülerek bulunur. Tepkime hızı, df/dt ise bu değer kullanılarak ve katılma sırasında sıcaklık ve birinci zaman türevi yeniden ölçülerek bulunur.

Tepkime hızını hesaplayabilmek için, eşitlik 4.3'teki $(T_s - T_f)$ terimi $(T_s - T_n) + (T_n - T_f)$ ile değiştirilir. Standart örnek için,

$$\eta (T_n - T_f) = \rho \cdot C_p^n \cdot V_n \cdot \frac{dT_n}{dt} \text{ 'dir.} \quad (4.4)$$

Burada dT_n/dt standart örneğin soğuma hızıdır. Bunu eşitlik 4.3'te yerine koyarak:

$$\rho \cdot C_p^s \cdot V_s \frac{dT_s}{dt} + (\Delta H) \cdot \rho \cdot V_s \frac{df}{dt} = \eta (T_s - T_n) + \rho \cdot C_p^n \cdot V_n \cdot \frac{dT_n}{dt} \quad (4.5)$$

Şayet katılma ısısı ΔH biliniyorsa, tepkime hızları, sıcaklıklar ve soğuma hızları ölçülerek hesaplanabilir. Şayet ısı transfer katsayısı biliniyorsa, katılma ısısı eşitlik 4.5'in bütün katılma aralığında ($f = 0$ dan $f = 1$ 'e) integrali alınarak bulunabilir.

Yayınlarda, tepkime hızının ve katılma ısısının bilindiği durumlarda eşitlik 4.5'in basitleştirilmiş şeklinin sık sık kullanıldığına rastlanılmaktadır. Sol taraftaki birinci terim sağ taraftaki sonuncu terime eşit kabul edilerek aşağıdaki bağıntı bulunur:

$$\frac{df}{dt} = \frac{\eta}{(\Delta H).V} (T_s - T_n) \quad (4.6)$$

Eşitlik 4.6 ölçülen sıcaklık farkı ile tepkime hızı arasında doğru bir orantı olduğunu göstermektedir.

Eşitlik 4.6'da $\eta/\Delta HV_s$ terimi sabit olarak kabul edilebilir. Örnek ile normal arasındaki sıcaklık farkı ($T_s - T_n$) ölçülerek, bu farkın sıcaklığın bir fonksiyonu olarak değişimi belirlenir. Sabit ise eşitlik 4.5 $f = 0$ dan $f = 1$ 'e kadar entegre edilerek bulunur. Bu entegrasyon genellikle grafik olarak yapılır.

Eşitlik 4.6'dan diferansiyel ısı analiz verilerini yorumlamak için sık sık yararlanılır. Fakat bu yorumun bir çok hatayı içereceği unutulmamalıdır. 4.5 ve 4.6 nolu eşitlikler mukayese edildiğinde bu hataların olabileceği anlaşılacaktır. Mesela, C_p^s , V_s , V_n ve C_p^n eşit kabul edilmiştir. Bu genellikle böyle değildir. Bu problemin üstesinden gelmek için örneğin kendisi hayali standart örnek olarak kabul edilir. O zaman sıcaklık farkı basit bir bilgisayar analizi ile belirlenir. Katılma ısısını bulabilmek için ısı taşınım katsayısı η , eşitlik 4.5'tekine benzer basit bir seri deneylerle belirlenmelidir (ASM Handbook, 1988).

DTA ile çok sayıda çalışma yapılmıştır. Isınma çevrimi esnasında, birinci dönüşümün başlangıcındaki sıcaklık ötektik sıcaklık gibi alınır, ve dönüşümün sonunda pik sıcaklığı sıvılaşma sıcaklığıdır. Aksine, soğuma esnasında başlayan başlangıç sıcaklığı sıvılaşma sıcaklığıdır, ve ikinci pikten önce başlangıç sıcaklığı ötektik sıcaklığıdır.

Isınma ve soğuma çevrimleri esnasında meydana gelen faz dönüşümleri görülebilmektedir. Aşağıdaki bilgi DTA'dan elde edilir: $\Delta T_L = (T_L)_{\text{ısınma}} - (T_L)_{\text{soğuma}}$ ve $\Delta T_E = (T_E)_{\text{teorik}} - (T_E)_{\text{soğuma}}$.

Isınma çevrimi esnasında, T_L ve T_E , ısınma oranı arttığında artar; soğuma esnasında iken, T_L ve T_E soğuma oranı arttığında azalır. Sapmaları ve hatalı sonuçları minimuma indirmek için, sabit oranda ısıtma ve soğutma yapılır (Apelian ve Cheng, 1986).

DTA tekniği faydalı bilgiler sağlamasına rağmen, onun numunelerde ve laboratuvar aletlemesindeki sınırlamalardan dolayı dökümhanelerde sınırlı kullanılır (Fras vd., 1993). Nötr kütle, küçük numune ölçüsü ve karışık laboratuvar tipi ölçme cihazlarından dolayı dökümlerde katılaşmayı çalışmak için bu tekniğin kullanımı gerçekleşmemiştir (Ekpoom ve Heine, 1981).

4.2.4 Newtonian Isıl Analizi

Katılaşma esnasında ısı akışı (q_s), bir döküm-kalıp sistemi için ısı denge eşitliğinden belirlenebilir.

$$q_s = q_{ac} - q_{tr} = C_v T - q_{su}/M \quad (4.7)$$

ve

$$T = dT/dt \quad (4.8)$$

Burada;

q_{ac} : Metalde toplanmış ısının oranı

q_{tr} : Kalıba transfer edilmiş ısı

C_v : Hacimsel özgül ısı (J/cm^3K)

T : Metal soğuma hızı (K/s)

M : Döküm modülü (cm)

q_{su} : Döküm yüzeyinden etrafına ısı akışı (W/cm^2)

Eşitlik 4.7 aşağıdaki gibi tekrar yazılabilir.

$$q_s = C_v (T - Z_N) \quad (4.9)$$

Burada Z_N Newtonian sıfır eğrisi ya da baz alınan çizgi gibi dikkate alınabilir ve o aşağıdaki gibi verilir:

$$Z_N = q_{su}/C_v M \quad (4.10)$$

Z_N 'i bulmak için çevreye bırakılmış ısı belirlenmiş olmak zorundadır. Bu dökümün şekline bağlı olarak çeşitli yollarda başarılabılır. Nispeten kalın tabaka şekillerinde ve kum kalıplarda q_{su} aşağıdaki eşitlikten tahmin edilebilmektedir.

$$q_{su} = \frac{(T_s - T_m) \sqrt{C_m \lambda_m \gamma_m}}{\sqrt{\pi t}} \quad (4.11)$$

Burada alt indis m kalıbı temsil eder.

T_s : İç kalıp yüzeyinin sıcaklığı

T_m : Başlangıç sıcaklığı

C_m : Özgül ısı

λ_m : Isıl iletkenlik

γ_m : Kalıp yoğunluğu

Newtonian sıfır eğrisi eşitlik 4.10 ve 4.11'in birleştirilmesiyle belirlenebilir ve böylece katılaşma işleminin kinetiği aşağıdaki eşitlikten kurulabilmektedir.

$$f_s(t) = \frac{1}{L} \int_{t_b}^t q_s(t) dt \quad (4.12)$$

Burada ;

f_s : Katı fazın kesri

L: Hacimsel gizli kalmış ısı (J/cm^3)

t_b : Katılaşma başlangıcında zaman

DeneySEL verinin ekstrapolasyon yöntemleri

Bu dENEYSEL yöntem aşağıdakilere dayandırılır:

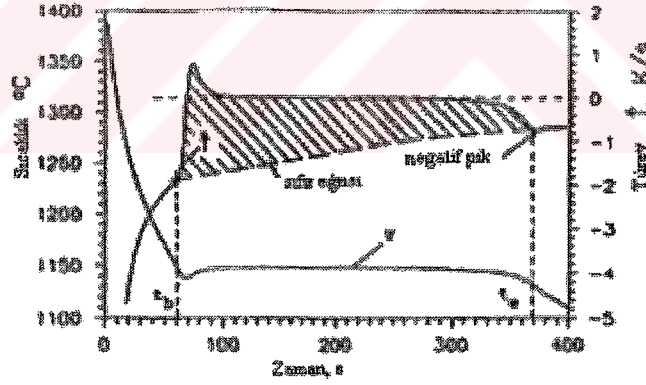
- Bir soğuma eğrisine ilaveten onun birinci ve ikinci zaman türevlerini elde etmek.
- İkinci türevden katılaşmanın başlangıcını ve sonunu tespit etmek. Zaman, t_b , bu türevin işaretinin değiştiği bükülme noktasıyla verilir. Katılaşmanın sonunda, soğuma oranı eğrisinde keskin bir minimum ile tanımlanır (Şekil 4.7).
- Soğuma oranı eğrisinin (Şekil 4.7) başlangıcı ve sonu arasında $T = -A \exp(-Bt)$ tipli bir eğriye ekstrapolasyon ile uydurmak. Bu Newtonian sıfır eğrisini tanımlar ve o katılaşma etkileri hariç tutulduktan sonra soğuma eğrisini temsil eder. A ve B sabitleri katılaşmanın

başlangıcında ve sonunda soğuma oranı eğrisindeki veriden belirlenir.

- t_b-t_e zaman aralığı için soğuma oranı eğrisi ve sıfır eğrisi arasında alanları hesaplamak. Bu alanın özgül ısı ile çarpımı katılaşmanın gizli ısını üretir ve katılaştırılmış fazların hacim kesrinin belirlenmesi için kullanılabilir.

Newtonian yönteminin ana eksiklikleri:

- O dökümde doğan sıcaklık gradyentlerini hesaba katmaz. Genelde, bu gradyent, döküm içinde farklı bölgelerde katılaşmış fazların homojen olmayan hacim kesirleri için yükselme verir.
- Deneysel olarak ,o, sıfır eğrisinin ,soğuma oranı eğrisinin ekstrapolasyonu ile belirlenebilen bir üstel eşitliğe uyduğu keyfi olarak varsayılır. Yine de, bu tahmin katılma kinetiğini kaydetmede hatanın büyük kaynağı için yükselme verebilir (Fras vd., 1993)



Şekil 4.7 Dökme demir için Newtonian sıfır eğrisi: $dT/dt = A \cdot e^{(Bt)}$ den tahmin edilmiş A ve B değerleri (sırasıyla $-2,253^\circ\text{C/s}$, $-0,003^\circ\text{C/s}$)dir (Fras vd., 1993).

4.2.5 Fourier Isıl Analizi

Fourier analizi katılma esnasında sıvı metalin sıcaklık alanlarının ölçümlerine dayandırılır. Bu yöntemde, esas alınan çizginin nispi şeklinde keyfi tahminlerin girişinden kaçınılır.

Isı iletimiyle ısı transferinin metal-kalıp sistemlerinde baskın olduğunu varsayarak, kalıba döktükten sonra metalin sıcaklığı bir ısı kaynağı içeren Fourier eşitliğinden

belirlenebilmektedir. Bu eşitlik aşağıdaki gibi yazılabilmektedir.

$$\left(\frac{\partial T}{\partial t}\right) = \alpha \nabla^2 T + (q_s / C_v) \quad (4.13)$$

Bu eşitlik katılma esnasında üretilmiş ısı (q_s) ile tanımlanabilir.

$$q_s = C_v T - \alpha C_v \nabla^2 T \quad (4.14)$$

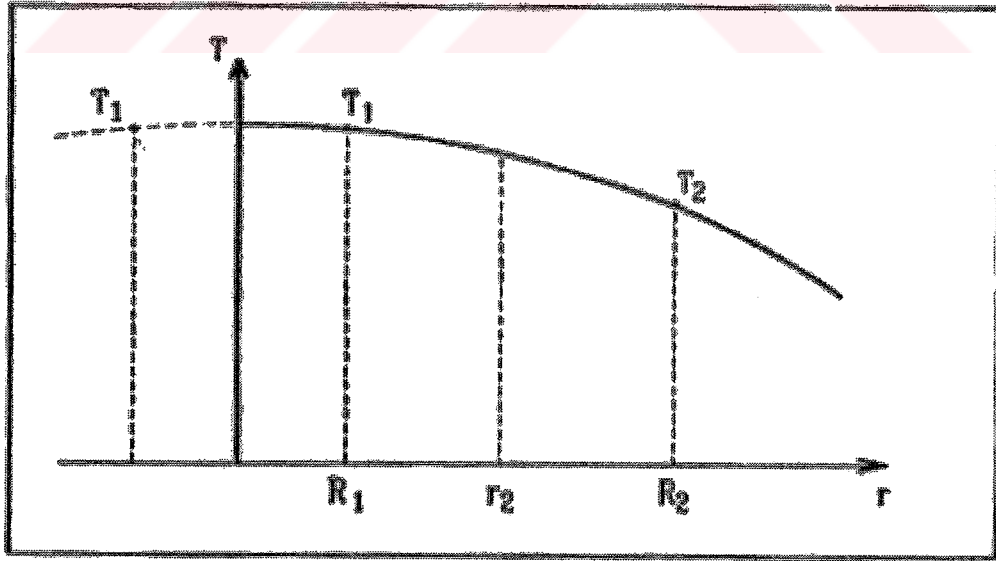
Burada α ısıl yayınlıktır (cm^2/s). Eşitlik 4.14 aşağıdaki gibi tekrar yazılabilir.

$$q_s = C_v (T - Z_F) \quad (4.15)$$

Burada Z_F Fourier sıfır eğrisi yada baz alınan çizgidir ve o aşağıdaki gibi verilir:

$$Z_F = \alpha \nabla^2 T \quad (4.16)$$

Yukarıdaki eşitliklere göre, ısıl yayınlık ve sıcaklık alanı $T(x,t)$, metal içinde bilindiği zaman, değişik ısı oran katılımlarının büyüklükleri kurulabilir. Deneysel olarak, üç sıcaklık noktasının en az bir verisi laplacian $\nabla^2 T$ 'nin belirlenmesi için gereklidir. Yinede, simetrik sıcaklık alanlarında (sistemin dikey eksenine göre) bu veri noktalar (Şekil 4.8'e bak) sadece ikiye azaltılır. Böylece iki ısıl çift kullanılarak, $\nabla^2 T$ 'yi bulmak mümkündür.



Şekil 4.8 $\nabla^2 T$ 'nin belirlenmesi için kullanılan sıcaklık alanının şematik gösterimi (Fras vd., 1993).

Bir silindirik dökümde laplacianın hesabı silindirik koordinatlarda aşağıdaki gibi

yazılabilmektedir.

$$\nabla^2 T = (\partial^2 T / \partial r^2) + (1/r) (\partial T / \partial r) \quad (4.17)$$

Eşitlik 4.17'nin bileşenleri aşağıdakiler vasıtasıyla tanımlanabilir:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} = \frac{\frac{T_2 - T_1}{R_2 - R_1} - 0}{R_1 + \frac{R_2 - R_1}{2}} = \frac{2(T_2 - T_1)}{R_2^2 - R_1^2} \quad (4.18)$$

ve

$$\frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=r_2} = \frac{1}{R_1 + \frac{R_2 - R_1}{2}} \left(\frac{T_2 - T_1}{R_2 - R_1} \right) = \frac{2(T_2 - T_1)}{R_2^2 - R_1^2} \quad (4.19)$$

Böylece eşitlik 4.17'de , eşitlik 4.18 ve 4.19 yerine koyularak, eşitlik 4.20 üretilir:

$$\nabla^2 T = \frac{4(T_2 - T_1)}{R_2^2 - R_1^2} \quad (4.20)$$

Üretilmiş ısı oranının belirlenmesi α ve C_v tarafından dahi etkilenir. Fourier yöntemi birincil fazların , örneğin dendritler(bunlar diğer yöntemlerle belirlenemez, özellikle gri dökme demir ve Al-Si alaşımlarında, birincil östenit ya da α -fazı ötektik bileşenlerden açıkça ayırt edilemez), hacim kesirlerinin nispeten hızlı belirlenmesi için uygulanabilir (Fras vd., 1993).

4.3 Dökme Demirlerin Isıl Analizi

4.3.1 Giriş

25 yıldan fazla zamandan beri soğuma eğrileri küreleştirme ve aşılama işlemlerinden önce sıvı demirin %C, % Si ve karbon eşdeğerinin(CE) bir yerini elde etmek için kullanılmıştır. Sonuçlara göre ana demirin bileşimi tersinmez döküm işlemlerinden önce doğrulanabilmektedir. Literatürde iyi doküman haline getirilen soğuma eğrilerinin bu kullanımı böyle eğrilerden çıkarılabilir diğer demir özelliklerini tanımlamak için bir veri olarak hizmet etmiştir (Labrecque ve Gagne, 1998).

Dökme demir üretiminde, ısıl analiz uygulaması dökme demirlerin(gri ya da küresel) mikroyapısal özellikleri, kimyasal bileşim ve mekanik özelliklerinin tahmininde yardımcı olmuştur. Demirin katılaşma özellikleri ise birleştirilen olayları ortaya çıkarmak için ısıl

analiz kabiliyeti dökme demir dökümhaneleri için online kalite kontrol takımı olarak yaygın olarak kullanılmıştır. Bir taraftan kritik sıcaklıklar genelde önemli bir kalite kontrol takımı olarak kabul edilirken diğer taraftan soğuma eğrisinin şekli çok nitel esasta dökme demir karakterizasyonu için uygulanılır.

Son on yılda istatistik esaslı modeller sadece kimyasal bileşimde kritik sıcaklık bağımlılığını belirtmek için değil aynı zamanda demir kimyasına dayandırılan mekanik özellikleri, metal penetrasyonu, çekme ve çil eğilimleri ve ötektik hücre sayısını tahmin etmek için de geliştirilmiştir. Humphreys (1961) tarafından yapılan çalışmalardan, durma sıcaklıkları üzerinde ortalama karbon, silisyum ve fosfor etkileri soğuma eğrileri vasıtasıyla çalışılmıştır. Bu araştırmada sıvıgen sıcaklığı ötektik altı, ötektik üstü ve ötektik alaşımlar için karbon silisyum, ve fosfor içeriklerinin doğrusal bir birleşimi için ilişkilendirilmiştir. Ondan beri birçok yazar kritik sıcaklıklar(örneğin sıvıgen durma sıcaklıkları, ötektik sıcaklıkları v.b. ve demir kimyasal bileşimi) arasında ilişkinin istatistiksel analizine dayandırılan soğuma eğrilerini kaydetmek için bir teşebbüs içinde farklı modeller geliştirmiştir. Bununla birlikte bu yöntem için doğal olan ana bir problem vardır. Üretim yöntemleri ile ilgili sayılamayacak kadar değişkenler, şarj malzemeleri, v.b. sadece özel dökümhanelerde ya da üretim hatlarında bile uygulanabilir modellerde sonuçlanır. İlave bir engel farklı dökümhanelerde deneyler arasında bire bir karşılaştırmaya izin verecek standart bir ısıl analiz yönteminin eksikliğidir. Gerçekten farklı ısıl çift kap çeşitleri onların farklı ısı iletim özelliklerinden dolayı kritik sıcaklıkların farklı gruplarını oluşturur. Sonuç olarak verilen kap çeşidiyle değerlendirilmiş bir model farklı kap çeşidi ile elde edilmiş verinin analizi için uygun olmayabilir (Suarez, 2000).

Var olan olumsuzluklara rağmen birçok çalışma soğuma eğrilerinden çıkarılabilen ilave bilgileri tanımlamak için uygulanmıştır. Örneğin döküm özellikleri için soğuma eğrileri ile ilgili uzman sistemler işlemi kontrol etmek ve istenilen son özellikli dökümlerin üretilmesini garanti etmek için kullanılabilen akıllı veri tabanı oluşturularak geliştirilmiştir. Bununla birlikte böyle veri tabanları bir dökümhaneden diğerlerine değiş tokuş yapılamaz ve iyi kontrollü ve tekrar üretilebilir işlemler dökümhanelerde güvenle kullanılabilir (Labrecque ve Gagne, 1998). Soğuma eğrileri tekniğiyle ölçülen değişim sıcaklıkları fiziksel öneme sahiptir. Bunun yanında soğuma eğrilerinin özelliklerinde bileşim, döküm çeşidi, işlem şartları ve parametrelerinin (aşılama, küreselleştirme, modül v.b) etkisinin iyi analiz edilmesi gerekmektedir. Bu da soğuma eğrilerinin güvenli bir şekilde elde edilmesi, bu eğrilerin matematiksel olarak analizi(eğri ile ilgili türevler, integraller vb) ve analizde elde edilen sonuçların döküm yapısı ile ilişkilendirilmesiyle başarılabilir.

4.3.2 Metal Bileşiminin Isıl Analiz ile Kontrolü

Alaşımız dökme demirlerin karbon ve silisyum içeriği ısıl analiz vasıtasıyla dökümhanede hızlıca belirlenebilmektedir. Ergimiş demirin örneği reçine bağlı kumdan yapılmış ve numunenin beyaz katılaşmasını garanti etmek için telleryum ile kaplanmış standart harcanabilir test kalıbı içerisine dökülür. Test kalıbı bir sıcaklık kaydedicisine bağlı bir ısıl çift içerir. Telleryum grafit oluşumu için iyi bilinen bir engelleyicidir. Sonuçlanan beyaz dökme demir iki belirgin sıcaklık üretir. Numune katılaşırken sıcaklık kaydedici numune ilk katılaşmaya başladığı zaman sıvıgen durması (TAW:Beyaz östenit sıcaklığı) ve sonra katılaşma tamamlandığı zaman ötektik durmayı (TEW:Beyaz ötektik sıcaklığı) gösteren bir soğuma eğrisi çizer. Sıvıgen durması karbon eşdeğer sıvıgen değerini (CEL) ölçer. CEL aşağıda verilir:

$$CEL = \%C + \%Si/4 + \%P/2 \quad (4.21)$$

CEL, $CEV(\%C + (\%Si + \%P)/3)$ ile aynı değildir. Düşük %P 'lu bir alaşımız demirde ötektik durma sıcaklığı demirin silisyum içeriğinin bir ölçüsüdür. Böylece iki durma sıcaklığından karbon ve silisyum içeriği hesaplanabilmektedir. Basit hesap makineleri %C ve %Si okuyabilmeyi gerçekleştirmek için elde edilebilir ya da dijital metreler %C ve %Si'ü direkt olarak göstermek için elde edilebilir. Karbon içeriği $\pm\%0,05$ hassasiyetle belirlenebilmektedir; silisyum ölçümü yaklaşık $\pm\%0,15$ hassasiyete sahiptir. İyi sonuçları başarmak için:

Numune iyi tanımlanmış bir sıvıgen durması vermek için yeterince yüksek sıcaklıkta dökülmelidir. Bu numune alma kaşığının önceden ısıtılmış olması anlamındadır. Demir testten önce aşılınmamalıdır ve numune beyaz katılaşmalıdır. (Brown, 1994).

4.3.3 Isıl Analizin Diğer Uygulamaları

Alışılmış ısıl analiz kimyasal bileşimden ayrı farklı dökme demir özelliklerini değerlendirmek için epeyce uzun zaman kullanılmıştır. Ergimiş metal oksidasyonu, çil eğilimi ve küresellik ve küre yoğunluğu bilgisi soğuma eğrisi değişimlerinden çıkartılmıştır. Örneğin küre sayısı ve çil eğilimi aşırı soğumaya $\Delta T = TER - TEU$ ayırt edici bir bakışla tahmin edilebilmektedir. Burada TER, telleryumsuz ısıl analiz kabıyla ölçülmüş ötektik parlama sıcaklığı ve TEU ötektik aşırı soğuma sıcaklığıdır. Diğer bir parametre parlama esnasında oluşan en yüksek soğuma hızı ($^{\circ}C/s$), en dik eğimdir ve her zaman pozitifdir ya da Te kaplı kap için çoğunlukla sıfıra eşittir. Kesit ölçü parametreleri kadar kimyasal bileşim, dayanım, sertlik ve uzama gibi mekanik özellikleri tahmin etmek için kullanılabilir.

Metal bileşimine dayandırılan dökme demir kritik sıcaklıklarını modellemek için farklı yazarlar tarafından önerilmiş regresyon eşitliklerinin çoğu aşağıdaki şekildedir:

$$T = b_0 + b_1 \cdot X \quad (4.22)$$

Burada T örneğin östenit sıvıgeni(TAL), ötektik aşırı soğuma(TEU) ve ötektik parlama(TER) gibi kritik sıcaklıkları temsil eder ve $b_1 \cdot X$ toplamdır:

$$b_1 \cdot X = \sum_i b_i \cdot X_i \quad (4.23)$$

Burada $i = C, Si, P$ ya da özel sıcaklıkta önemli etkisi olan her hangi bir elementtir; X_i alaşımdaki içeriği; ve b_i çoklu regresyon analizi ile elde edilmiş ilgili parametredir. Araştırmacıların bir kısmı TAL, TEU ve TER'in belirlenmesi üzerinde yoğunlaşırken diğer bir kısmı Te kaplı kapları tercih etmiştir (Suarez ve Loper, 1997).

4.3.4 Dökme Demirlerin Soğuma Eğrilerinin Kaydedilmesi

4.3.4.1 Soğuma Eğrilerinin Tipik Özellikleri

Ötektik altı dökme demirin katılaşması esnasında oluşan birinci katı faz, östenittir ve soğuma hızına bağlı olarak iki ötektik fazın biri ya da bir kombinasyonu tarafından yani demirde östenit ve grafitten oluşan gri dökme ve/ya da östenit ve demir karbürden oluşan beyaz dökme demir tarafından takip edilir. Örneğin gri dökme demir yavaş soğuma hızında katılaşma kararlı grafit ötektik sıcaklığının altında ve yarı kararlı demir karbür ötektik sıcaklığının üzerinde meydana geldiği zaman Şekil 4.9(a)'da gösterildiği gibi oluşur. Beyaz dökme demir hızlı soğuma hızlarında katılaşma tamamen yarı kararlı demir karbür ötektiğinin altında meydana geldiğinde, Şekil 4.9(b)'de gösterildiği gibi oluşur ve benekli demir (gri ve beyaz dökme demirin bir kombinasyonu) ara soğuma hızlarında katılaşma Şekil 4.9(c)'de temsil edildiği gibi her iki rejimde meydana geldiğinde oluşur. Bundan dolayı mikroyapısal gelişimi tahmin için anahtar birincil östenit, gri dökme demir, beyaz dökme demirin çekirdeklenme ve büyüme hareketlerinin nicelendirme kabiliyetine ve onların yaygın makroskobik ısı akış şartlarında nasıl etkilendiğine dayandırılır (Maijer vd, 1998).

Grafit ötektik sıcaklığı, TEgri ve demir karbür ötektik sıcaklığı, TEbeyaz olarakta bilinmektedir. TEgri Si'a bağlı olarak aşağıdaki bağıntı ile değişir.

$$TE_{gri} = 1153 + (6.7 \times \%Si) \quad (4.24)$$

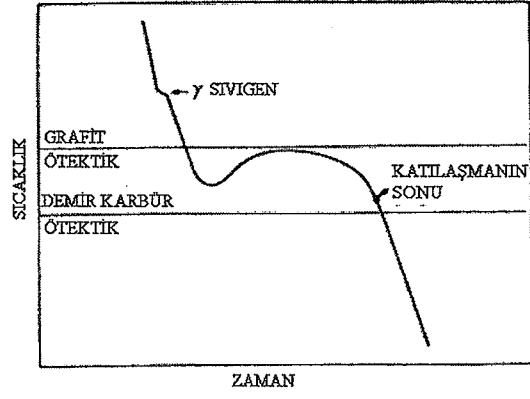
Aslında diğer elementlerde TEgri sıcaklığını değiştirmektedir. Ni, Cu, Co, Al ve Pt TEgri

sıcaklığını artırırken, Cr, V, Ti, Mo, Sn, Sb, W, Mg, P TEgri sıcaklığını azaltır. Dökme demirlerde, demir karbür yapısı istenmediğinden, beyaz(yarı kararlı) ötektik sıcaklığının (TEbeyaz) mümkün mertebe düşük olması istenmektedir. Yarı kararlı demir karbürlerin (Fe_3C) oluşumu, belirli sıcaklıklardaki Si oranına bağlıdır. Bu durum ısı analizinin kullanımında esas olup, C ve Si oranlarının belirlenmesinde kullanılan bir yöntemdir. Demir karbürün katılma sıcaklığı, esas olarak Si ve P'un bir fonksiyonudur. Bu yüzden bir bağıntı geliştirilmiştir.

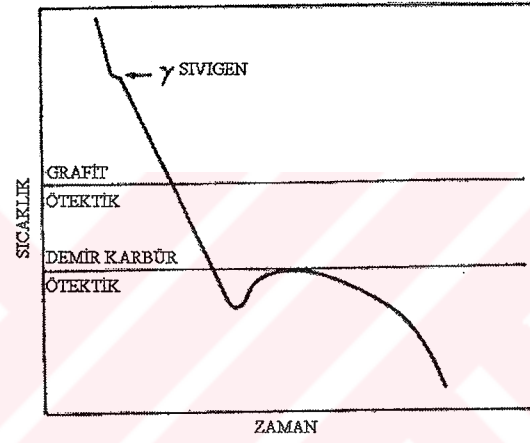
$$TE_{beyaz} = 1147 - (12x\%Si) \quad (4.25)$$

Beyaz ötektik sıcaklığı üzerine daha bir çok elementin etkisi vardır. Cr, V, Ti, Al ve Pt beyaz ötektik sıcaklığını yükseltirken, Si, Ni, Cu, Mn, Sn, Mo, Sb, W, Mg ve P beyaz ötektik sıcaklığını düşürmektedir (ATAS, 1994).

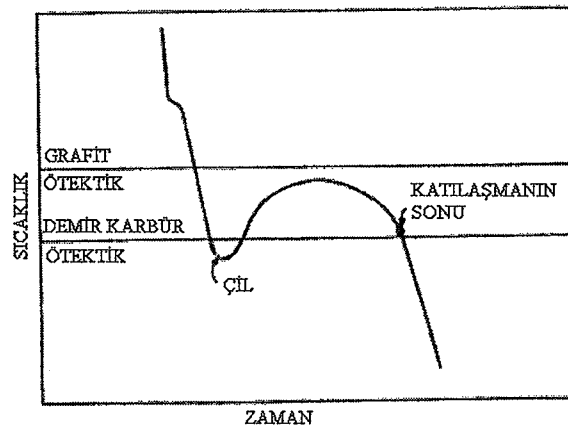




(a)



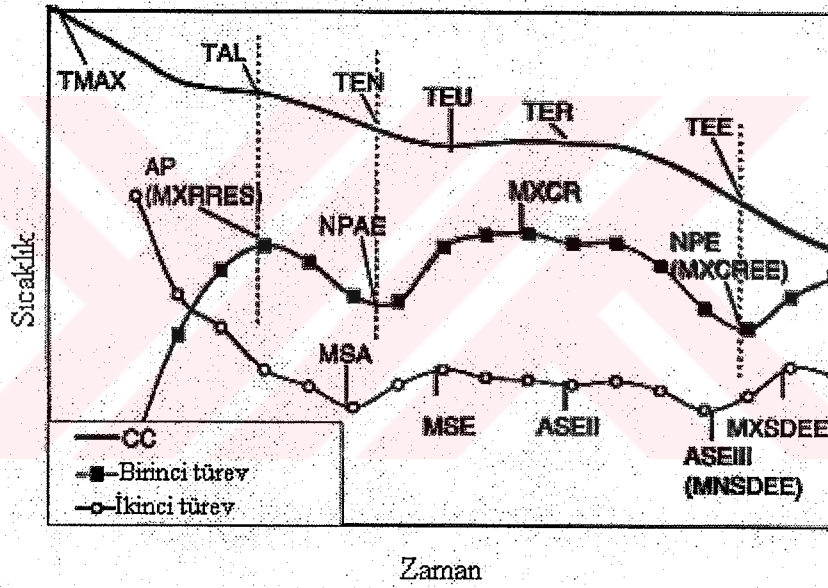
(b)



(c)

Şekil 4.9 (a) gri dökme demir, (b) beyaz dökme demir ve (c) benekli dökme demir için tipik soğuma eğrileri (Maijer vd, 1998).

Soğuma eğrisi tipik sıcaklıklar bazı yazarlarca tanımlanmıştır; yine de terminoloji ve eğriler üstünde kritik noktaların seçimi bile standart değildir. Çizelge 4.1’de literatürde bulunan kritik sıcaklıkları veren çeşitli gösterimler ve onların tanımları özetlenir. Bazı kritik noktalar demirin bir çeşidi için özeldir. Örneğin grafit sıvıgen sıcaklığı (TGL) ötektik üstü demirde vardır fakat ötektik altı demirde yoktur. Soğuma eğrilerinin birinci ve ikinci türevleri için tanımlar Çizelge 4.2’de listelenmiştir: birinci türev soğuma hızı olarak ve ikinci türev soğumanın ivmelenmesi olarak dikkate alınabilir. Şekil 4.10 Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.2’de tanımlanmış çok tipik noktaların bir şematüğünü sunar (Labrecque ve Gagne, 1998). Şekil 4.11 ötektik küresel grafitin ve Şekil 4.12 ve Şekil 4.13 ötektik üstü küresel grafitli dökme demirin soğuma eğrilerini gösterir.



Şekil 4.10 Tipik ötektik altı demirin soğuma eğrisi ve onun türevleri (Labrecque ve Gagne,1998).

Çizelge 4.1 Soğuma eğrisi tipik sıcaklık noktaları (Labrecque ve Gagne, 1998).

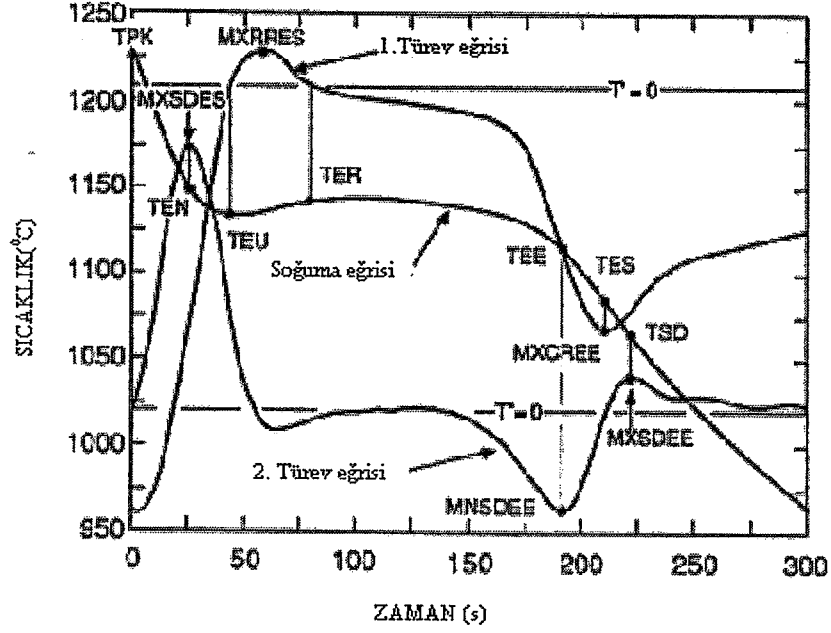
İsim ya da Kısaltma	Fiziksel Değeri
Tmax(TPK)	Maksimum sıcaklık. Özel fiziksel değeri yok.
TAL	Ötektik altı ve ötektik demirlerde birincil östenit katılma sıcaklığı
TGL	Ötektik üstü demirlerde birincil grafit katılma sıcaklığı
TEN(TEU)	Ötektik çekirdeklenme sıcaklığı(ya da ötektik başlama sıcaklığı)
TEU	Ötektik aşırı soğuma sıcaklığı
TE	Ötektik sıcaklığı(ya da ortalama ötektik sıcaklığı)
CET	Te kaplı kap ile ölçülmüş karbür ötektik sıcaklığı
TER	Ötektik tutulmanın maksimumu
TEE(TEU)	Birinci türevin bir minimumu NPE'ye uyan ötektik katılmanın sonu sıcaklığı
TS	Katıgen sıcaklığı
TEN-TEU	Ötektik aşırı soğuma
TER-TEU	Ötektik Parlama

Parantezler alternatif terminolojiyi belirtir. Yaygın bir liste değildir.

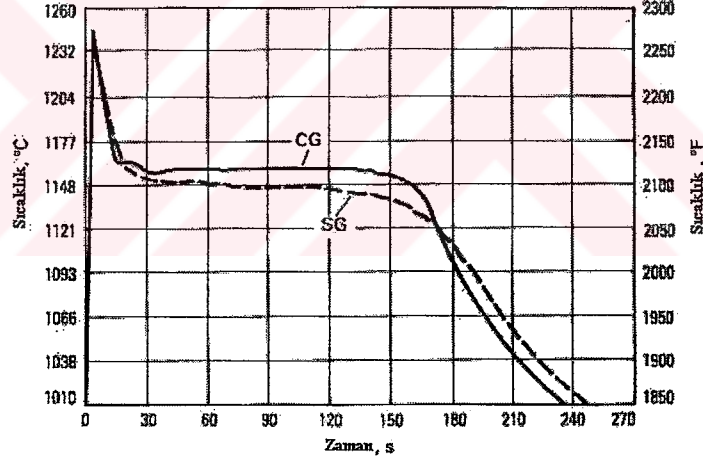
Çizelge 4.2 Soğuma eğrilerinin birinci ve ikinci türevlerinin tipik noktaları(Labrecque ve Gagne,1998)

İsim ya da Kısaltma	Fiziksel Değeri
	Birinci Türev
AP (MXRRES)	Östenit piki, bu pikin altındaki alan östenitin katılma esnasında üretilen ısıyı temsil eder.
NPAE (NPES)	Östenit ile ötektik katılma arasındaki negatif pik, katılma östenitten ötektikğe değişir.
MXCR	Parlamanın maksimum hızı
NPE(NPEE) (MXCREE)	Ötektikten sonra negatif pik. Ötektik katılmanın sonu TEE'ye uyar.
EP	Ötektik plato
FPE	Ötektik platoda birinci pik
FDE	Ötektik platoda birinci süreksizlik
SPE	Ötektik sonrası eğim
	İkinci Türev
MXSDES	İkinci türevin maksimumu, ötektik çekirdeklenmeye uyar.
MSA	Östenit pikinin minimum eğimi
MSE	Ötektik pikinin maksimum eğimi. MSA ve MSE arasındaki süre ötektik parlamanın hızını temsil eder.
ASEII	II. safhadaki ötektik pikinin ortalama eğimi.
MXSDEE	Ötektik katılmanın sonunda ikinci türevin maksimumu katılmanın sonunun ivmelenmesi ile ilgilidir.
ASE III (MNSDEE)	III. safhada ötektik pikinin ortalama eğimi

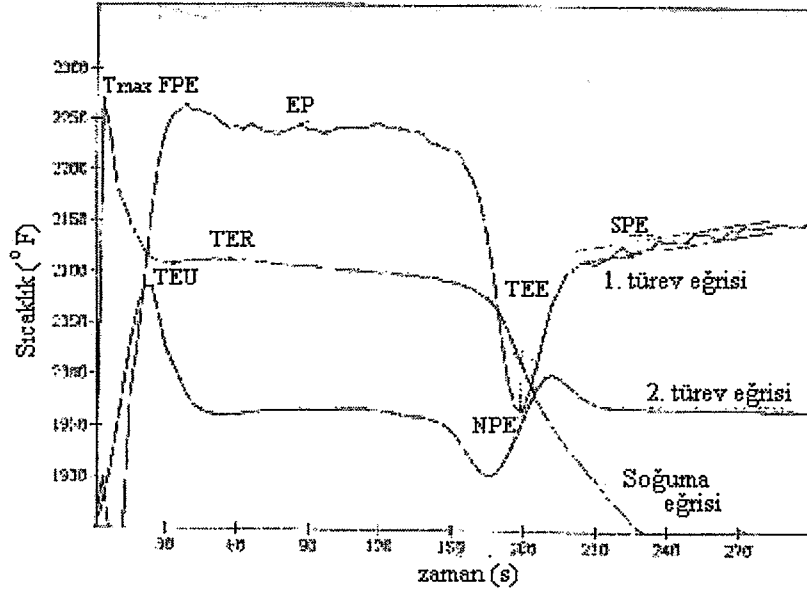
Parantezler alternatif terminolojiyi belirtir. Yaygın bir liste değildir.



Şekil 4.11 Tipik ötektik küresel grafitli dökme demir soğuma eğrisi ve türev eğrileri (Fung vd., 1990)



Şekil 4.12 Ötektik üstü küresel grafitli dökme demirin(SG) ve sıkışık grafitli dökme demirin(CG) soğuma eğrileri (ASM Handbook, 1992).



Şekil 4.13 Ötektik üstü dökme demir için soğuma eğrisi ve onun 1. ve 2. türevleri (Chen ve Stefanescu, 1984).

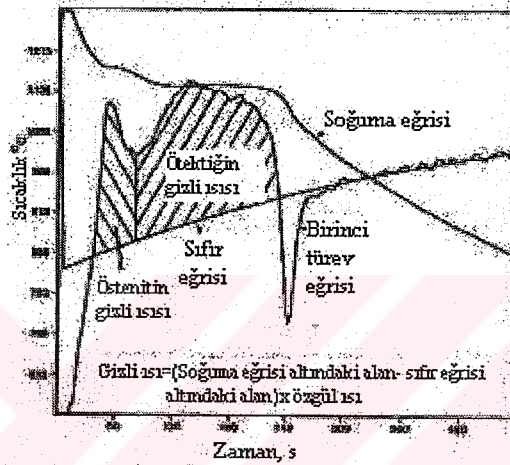
4.3.4.2 Bilgisayar Destekli Diferansiyel Analiz(CA-DTA)

Bilgisayar destekli soğuma eğri analizi soğuma ya da ısıtma eğrilerinde ısıl olayların direkt olarak numunede meydana gelen faz dönüşümleri ile ilişkilendirilmesi basit gerçeğine dayandırılır. Böylece bir soğuma eğrisi, eğrisi elde edilmiş özel bir döküm ya da numunenin katılaşma geçmişini kapsar. Analizin yapısına bağlı olarak deneysel işlem, katılaşma olayının nicel anlayışı için kullanılacak farklı bilgi üretimine yardımcıdır. CA-CCA'nin tipik uygulamaları işlem kontrolü(kimyasal analizin ve fazların miktarının tahmini), metal ve alaşımların termo fiziksel özellikleri için veri tabanının gelişimi ve katılaşma modellemidir.

DTA sınırlamalarının üstesinden gelmek için daha basit bir yol ısıl çift donatılmış basit yuvarlak çubuk şekilli döküm dökülmesiyle elde edilen soğuma eğrisi verisini almaktır ve bu veriyi bilgisayarda depolamaktır. Analiz sonra faz dönüşümlerinin tam kaydı için sonra kullanılabilir soğuma eğrisinin birinci ve ikinci eğrilerinin hesaplanması ile yapılır. Böylece DTA'ya benzer nicel analiz sonra nötr referansı(sıfır eğrisi) benzetmeyle mümkündür. Bu dönüşümün etkilenmediği türev eğrisinin kısımlarının kullanımıyla ve dönüşüm bölgelerinde interpolasyon yaparak yapılır.

Çeşitli araştırmacılar çeşitli başarı dereceleri ile analizin bu yöntemini kullanmıştır. Ekpoom ve Heine(1981) faz dönüşümüne sahip olmayan soğuma eğrisinin parçasını doğrusallaştırarak zamana karşı nispi sıcaklık eğrisinde hesaplamalar yapmıştır. Chen ve Stefanescu (1984)

dökme demir katılaşmasını çalışmak için ve yapı ve grafit şeklini ve küreselliği tahmin etmek için bilgisayar destekli DTA tekniğini kullanmıştır (Upadhyaya vd, 1989). Böyle bir eğrinin örneği Şekil 4.14’ te gösterilir. Prensip verilen bir numune için elde edilmiş soğuma eğrisinin doğrusal kısmını kullanarak nötral hacmin (yani faz dönüşümü olmayan) soğuma eğrisini modellemektir. Nötral hacim ve birinci türev eğrisi arasındaki alanın integrali numunede fazların oluşmasıyla üretilmiş ısıdır. Bradley ve diğerleri (1990) çeşitli ısı transfer modellerinin etkisini değerlendirmiştir ve nötral hacim simulasyonu için(sıvı ya da katı durumdan birisi) doğrusal kısmın seçiminin hesaplanmış ısı eğrisini etkilediğini göstermiştir.



Şekil 4.14 Ötektikaltı bileşimde ısı hesaplaması için CA-DTA'nın örneği (Labrecque ve Gagne, 1998).

Her bir fazın katılaşmasının gizli ısısı farklı yazarlar tarafından değerlendirilmiştir. Uygun matematik işlem ve kalibrasyon ile, o ısı eğrisini kullanarak oluşmuş fazların(%birincil östenite karşı %ötektik(karbür ya da grafit)) yüzdelerini değerlendirmek mümkündür. Çünkü sementit ve grafit, saf demirden oluşumun daha yüksek gizli ısısına sahiptir. Bir dökme demirin oluşumunun gizli ısısı karbon içeriği ile artar. Bununla birlikte katılaşmanın gizli ısısı oluşan grafit parçacıklarının(sıkışık, küresel ya da lamel) şeklini belirlemek için yeterli değildir. İlave kriterlerle bile, çatışan sonuçlar soğuma eğrileri ile grafit parçacıklarının şeklini tahmin etme becerisine göre rapor edilmiştir (Labrecque ve Gagne, 1998).

4.3.4.3 Katılaşma Isısı ve Gizli Isının Hesaplanması

Katılaşma ısısının hesaplanmasında kullanılan teorik prensipler Newtonian soğumasına dayandırılır ve zaten literatürde sunulmuştur. Hesaplama yöntemi, (i) katılaşmadan önce önemli ısıl gradyentin olmadığını, (ii) Biot sayısının 0,1'den küçük olduğunu ve (iii) numunenin soğumasının aşağıda belirtildiği gibi parça ısı yönteminin prensiplerini takip eder.

$$\left. \frac{dT}{dt} \right|_{CC} = \frac{1}{V\rho C_p} \left[\frac{dQ_L}{dt} - hA(T - T_\infty) \right] \quad (4.26)$$

Burada $\left. \frac{dT}{dt} \right|_{CC}$ soğuma hızı, V kesitin hacmi, ρ yoğunluk, C_p ısı kapasitesi, Q_L katılma ısısı, t zaman h konveksiyon ısı transfer katsayısı, A kesitin soğuma alanı, T sıcaklık ve T_∞ oda sıcaklığıdır.

Katılmanın ısısı aşağıdaki gibi verilir.

$$Q_L = V\rho C_p \int_{t_0}^{t_s} \left(\left. \frac{dT}{dt} \right|_{CC} - \left. \frac{dT}{dt} \right|_{ZC} \right) dt \quad (4.27)$$

Burada t_0 ve t_s sırasıyla katılmanın başlangıcı ve sonunu temsil eder. Diğer taraftan $\left. \frac{dT}{dt} \right|_{CC}$

gerçek kesitin soğuma eğrisinin birinci türevini ve $\left. \frac{dT}{dt} \right|_{ZC}$ faz dönüşümünün dikkate alınan sıcaklık alanında meydana gelmeyeceği yerde gerçek soğuma eğrisinin bir kısmından üretilmiş hayali nötral hacmin soğuma eğrisinin birinci türevini temsil eder (Oliveira vd, 1999).

$$L = \frac{Q_L}{V\rho}$$

$$L = C_p (\text{Soğuma eğrisinin türevi altındaki alan} - \text{Sıfır eğrisinin türevi altındaki alan}) \quad (4.28)$$

Burada L gizli ısıdır (Upadhy vd, 1989).

Yukarıda gösterildiği gibi, dökme demir numunenin katılma esnasında çıkmış ısıdan nötr hacmin katılma esnasında çıkmış ısıdan çıkartılmasıyla katılmanın gizli ısını hesaplamak mümkündür. Bu diferansiyel ısıl analizdir. Bilgisayar kullanarak birinci türev(numunenin katılma esnasında çıkmış ısı) ve sıfır eğrisi(nötr hacmin katılma esnasında çıkmış ısı) arasında integrasyon içinden aynı gizli ısıyı hesaplamak mümkündür. Bu yöntem Chen ve Stefanescu (1984) tarafından bilgisayar destekli diferansiyel ısıl analiz olarak isimlendirilmiştir(CA-DTA).

Katılmanın gizli ısını değerlendirmek için CA-DTA kullanıldığı zaman hatanın birkaç birincil kaynakları vardır. Birincisi, A ve B sabitlerinin belirlenmesidir. Bu sabitlerin doğruluğunu artırmak için katılmanın sonundan mümkün olduğu kadar uzak sabitlerin

hesapları için birinci zamanı seçmek gereklidir. Örneğin katılaşma sonundan sonra 40, 80, 100 ve 160 s sonraki noktalar alınabilir. Açıkça bunu yapmak kolaydır.

Hatanın ikinci potansiyel kaynağı gizli ısının hesaplanmasında kullanılan özgül ısının değeridir. Bu değer sabit bir değer alınır. Sıcaklık alanı ergime sıcaklığına yakın olduğundan gerçek özgül ısıyı ölçmek zordur ve elde edilebilir veri yoktur. Farklı kaynaklarda belirtilmiş özgül ısı değerlerinde ayrılıklar vardır ve özgül ısı farklı karbon içerikleri ile dahi değişir.

Hatanın diğer muhtemel kaynakları aşağıdakiler gibidir:

- 1) Döküm sıcaklığında değişim.
- 2) Numunenin ve kum kap sisteminin bağlayıcının yandığında kabın cidarlarından kumun düşme eğiliminden dolayı ısı transfer katsayısının değişimi.
- 3) Kabın içine dökülen demirin miktarında uyumsuzluk.

Üç faktör katılaşmanın gizli ısısının değerini etkiler görünür:

- 1) Ötektiğin yapısı yani beyaz ya da gri
- 2) Gri dökme demirde grafitin miktarı yani karbon eşdeğeri (ötektik altı, ötektik, ya da ötektik üstü)
- 3) Grafitin şekli (Chen ve Stefanescu, 1984).

Geleneksel olarak nötral hacim katılaşmanın sonundan hemen sonra yerleştirilen soğuma eğrisinin 50,75 ya da 100 noktanın seçiminden oluşturulur. Bununla birlikte ısıl analiz kabının soğuma eğrisi durumunda katılaşmanın hemen sonrasında keskin dar bir vadi vardır. Bu hayali nötral hacmin soğuma eğrisinin üretilmesi için çalışılan yöntemin fonksiyonunda sonuçları zayıflatır. Chen ve Stefanescunun (1984) yöntemi nötral hacmin daha dik soğuma eğrileri ve bundan dolayı da katılaşmanın ısısı için daha yüksek değerler verir.

Bir alternatif olarak aynı sayıda nokta katılaşmanın sonu ve ötektoid reaksiyonun başlangıcı arasında bir bölgede seçilebilir. Çünkü orada gerçek kesitin soğuma eğrisinin birinci türevinde açık bir platoyu temsil eder. Diğer taraftan noktalar bu dar vadiden sonra seçilirse hayali nötral hacim oluşturmak için kullanılan nokta sayısı ve yerin etkisi çok önemli değildir. Yinede bu yöntem Chen ve Stefanescu'nun (1984) uygulamasıyla elde edilmiş olandan %50 daha düşük olan sonuçlar verir. Yinede bu sonuçlar çok uygundur. Basamaklı dökümün kullanımı gerçek kesitin soğuma eğrisinin birinci türevinde katılaşmanın sonunda ani geçişin

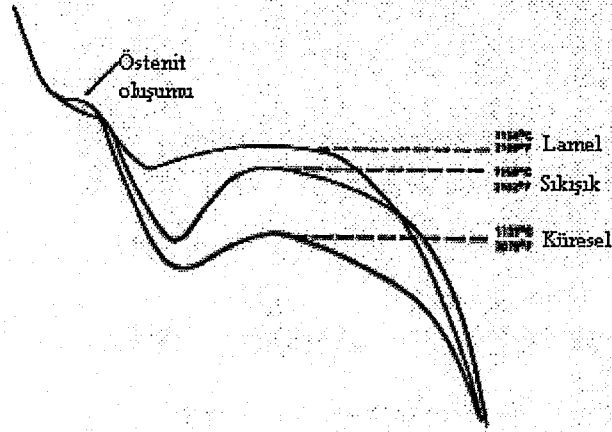
yokluğundan dolayı son mikroyapının tahmininde daha yüksek bir potansiyel sunduğu görünür (Oliveira vd, 1999).

Yukarıda belirtilen yöntemlere alternatif olarak bende yeni bir yöntemle ergime gizli ısını hesapladım. Bu yöntemde yeni bir sistem ve yeni kap çeşidi ile soğuma eğrisinin birinci türev eğrisinde katılma sonrası ve ötektoid reaksiyon öncesi bölgeden ve ötektoid reaksiyon sonrası bölgeden alınan noktalar vasıtasıyla sıfır eğrisinin belirlenmesidir. Bu noktalar bilgisayar programı vasıtasıyla belirlenmektedir. Böylece sıfır eğrisi daha doğru olarak bulunmaktadır ve hesaplanan gizli ısı değerleri literatürdeki değerlere yakın çıkmaktadır. Bu yöntem deneysel çalışmalarda detaylı olarak verilecektir.

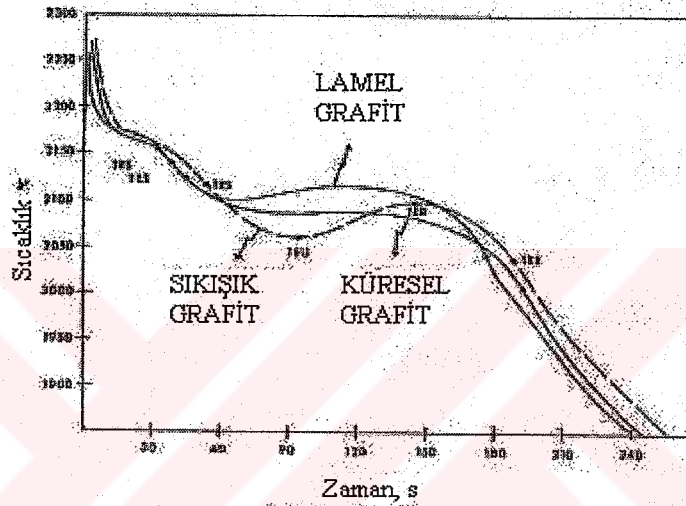
4.3.5 Soğuma Eğrilerinde Demir Özelliklerinin Etkileri

4.3.5.1 Grafit Parçacık Şekli ve Küresellik

Farklı dökme demirlerin soğuma eğrileri arasında gözlenen farklar soğuma eğrisinden dökümlerin son özelliklerine kadar verileri ilişkilendirme çabalarına kılavuzluk etti. Bir çok makale grafit şekli(sıkışık, lamel, küresel....) ve soğuma eğrisi üzerinde ölçülen kritik noktalar ve/ ya da ısı gelişimi arasında bir ilişki kurmak için adanıldı. Mutlak tipik sıcaklıklar(TEN, TEU, TER, NPAE.....), ötektik parlama, ötektik aşırı soğuma, parlama hızı ve katılmanın gizli ısını grafit parçacıklarının şeklini ve küreselliği tanımlamak için kullanılan parametreler arasındadır (Labrecque ve Gagne,1998).



(a)



(b)

Şekil 4.15 İki kaynaktan, (a) Monroe ve Bates (1982), (b) Chen ve Stefanescu (1984), alınmış gri, küresel ve sıkışık grafitli dökme demirler için şematik soğuma eğrileri (Labrecque ve Gagne, 1998).

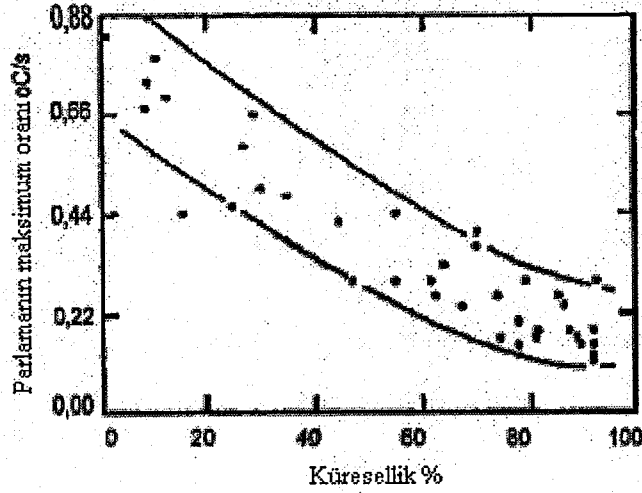
Demirin üç çeşidine uyan eğrilerin örnekleri Şekil 4.15'te sunulur. Farklı kaynaklardan benzer demirler için elde edilmiş eğriler karşılaştırıldığı zaman tipik noktaların mutlak sıcaklıkları kadar onların genel görünüşünün farklı olduğu görülür. Çizelge 4.3 dökme demirlerde bulunan grafitin tipini belirlemek için ölçülen bazı tipik sıcaklıkları ve katılmanın gizli ısısını listeler. O kullanılan detaylı deneysel işlemleri belirtmeksizin ayrılmış verileri kaydetmenin güçlüğüne gösterir.

Çok sayıda soğuma eğrilerinin analizinden sonra Chen ve Stefanescu (1984) soğuma eğrisinden ve onun türevinden grafit şeklini tahmin etmenin mümkün olduğunu çıkardı. Üstelik, küresellik ötektik altı ve ötektik demirler için tahmin edilebilmektedir. Bununla birlikte, onlar hatanın belirli bir sınırının deneysel sonuçlarda döküm sıcaklığı, küre sayısı ve CE deki değişimlerden dolayı dikkate alınmak zorunda olduğunu belirttiler. Şekil 4.16'da

gösterildiği gibi artırılmış küresellikli bir ötektik altı küresel grafitli dökme demir parlamının azaltılmış maksimum hızıyla refakat edilir. Ötektik üstü demirde küresellik ve soğuma eğrileri arasındaki ilişki böyle kesinlikte gözlenilmemiştir (Labrecque ve Gagne, 1998).

Çizelge 4.3 Soğuma eğrisinin tipik noktaları, sıvı demirin işlemi, CE ve demir çeşidi arasındaki ilişkiler (Labrecque ve Gagne, 1998).

	Ötektik altı demir (CE<4,26)	Ötektik üstü demir (CE>4,26)
Mg işlemsiz ve aşılmasız(Gri ve Beyaz Demir)	TER Gri > TER Beyaz L Beyaz=90 cal/g.°C TEU<1121°C ve CE=3,07 ise Beyaz demir TAL Gri~TAL Beyaz TAL CE=%4,26nın altında vardır. TEU ve TER CE ve %Si ile artar.	TGL CE>%4,6 için vardır. TEN CE>%4,6 için yoktur. CE>%4,6 için TER-TEU~0 TEU ve TER>1137,8 °C ise karbür yoktur.
Mg işlemlili aşılmasız	TAL Mg işleminden etkilenmez. NiMg ile işlem yapıldığında TER~TEU dur.	TAL işlem görmemiş demire göre 38 °C azalır. TGL işlem görmemiş demire göre 100 °C azalır. TEN-TEU~22 °C TER-TEU~8 °C
Mg işlemlili ve aşılansız	TEU ve TER<1115 °C ise Beyaz TEU ve TER>1142 °C ise sonra grafit ötektik CE=4 L SG=81 cal/g.°C CE=4 L CG=86 cal/g.°C CE=4 L LG=103 cal/g.°C 1130°C<TE<1135°C sonra SG	TER-TEU ve TEN-TEU aşılansız demire göre azalmıştır. CE=4,68 için L SG=102,6 cal/g.°C



Şekil 4.16 CE=3,87-4,06'lı ötektik altı dökme demirler için parlamanın maksimum oranı ve küresellik arasındaki ilişki (Labrecque ve Gagne, 1998).

4.3.5.2 Ergiğin Oksidasyon Durumu

Sıvı demirin oksidasyon durumunun ergiğin çekirdeklenme kapasitesinde bir etkiye sahip olduğu ve daha çok muhtemel dökümlerin son özelliklerini etkilediği görülür. TAL ve CET %Si ve %C'yi tahmin etmek için kullanılan anahtar sıcaklıklardır. Heine (1995) tarafından belirtildiği gibi, TAL ergiğin oksidasyon durumundan etkilenir. Aşağıda verilen ampirik eşitlikler sıvı demirin ergitildiği atmosferi dikkate almak için çıkarılmıştır.

$$\text{TAL(Deokside edilmiş Ar atmosferi 1482 °C)}=\text{TAL}$$

$$= 1569-97,3(\%C+1/4\%Si+1/2\%P) (\text{°C}) \quad (4.29)$$

$$\text{TAL(oksitleyici yüksek üst ısı 1593 °C)}=\text{OTAL}$$

$$= 1594,4-102,2(\%C+1/4\%Si+1/2\%P) (\text{°C}) \quad (4.30)$$

$$\text{TAL(azaltılmış ya da düşük üst ısı)}=\text{HTAL}$$

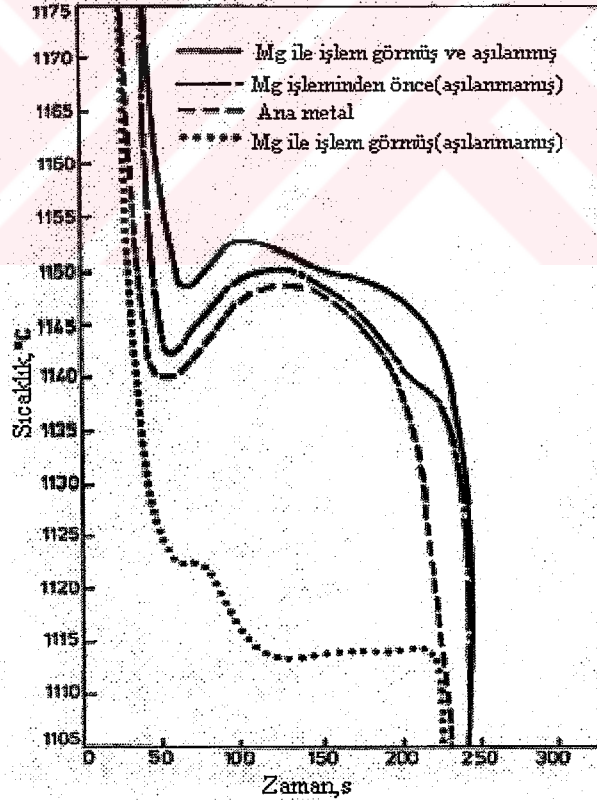
$$= 1540-92,06 (\%C+1/4\%Si+1/2\%P) (\text{°C}) \quad (4.31)$$

Birinci eşitlik genellikle karşılaştırma noktası olarak kabul edilir ve Fe-C-Si faz diyagramının östenit sıvılaşma sıcaklığına uyar. Eşitlik 4.30 ve 4.31 farklı ergiyik koşulları altında TAL sıcaklık alanının sınırını tanımlamak için geliştirilmiştir. Birinci ilişkiden sapmalar ergitme işlemi değiştirildiği zaman yükselir. Sonuç olarak bu Strong (1983) tarafından tanımlandığı

gibi demirin oksidasyon durumunda ergiyik değişkenlerinin(ergiyik sıcaklığı, şarjdaki çelik, pota transfer uygulaması, oksidasyon) etkisini ölçebilir (Labrecque ve Gagne, 1998).

4.3.5.3 Küreselleştirme ve Aşılama

Soğuma eğrilerinde küreselleştirme ve aşılama işlemlerinin etkisi Şekil 4.17’de gösterilir. Farklı işlem adımlarından sonra soğuma eğrilerinde değişim açıkça gözlemlenebilir. Knothe (1987) işlemin tamamında TEU değişimlerini göstermiştir. Örneğin ana demirin TEU’su magnezyum işleminden önce ki demirinkinden daha düşüktür çünkü ergiyik bu iki ölçüm arasında oksitlenmiştir; böylece çekirdeklenme potansiyeli artırılır. Magnezyum işleminden sonra TEU önemli ölçüde azalır çünkü magnezyum ergiyikteki oksijen ile reaksiyona girmiştir. Son olarak aşılama işleminden dolayı çekirdeklenme potansiyelindeki artış diğer işlem basamaklarının etkisini bastırdığı için çok güçlüdür. TEU ve diğer sıcaklıklar ergiyiğin çekirdeklenme potansiyelinin ve sonuç olarak ötektik katılma esnasında bir grafit genleşmesiyle östenitin hacim büzülmesine karşılık vermek için sıvı metalin kapasitesinin temsilcisi olduğunu açıkça gösterir.



Şekil 4.17 Ergitme ve işlem proseslerinin her bir aşamasından alınmış soğuma eğrileri (Labrecque ve Gagne, 1998).

Stefanescu ve diğeri (1982), TER ve TEU üstünde magnezyum işlemi (%2,5FeMgSi; %5Mg) ve son aşlamadan (%0,4FeSi%85) sonra bekleme zamanın etkisini değerlendirmiştir. Bekleme zamanı uzatılırsa eğer, ergiyiğin magnezyum içeriği azalır ve sonuç olarak grafit yapısı küreselden sıkışığa ve sonuçta lamelle değişir. Bu değişimler ötektik aşırı soğuma ve TER vasıtasıyla ortaya çıkarılmıştır.

Zhu ve Smith (1995) benzer demirler(aynı işlem ve CE) için fakat farklı küreleştirici alaşımlarla elde edilmiş soğuma eğrilerini çalışmıştır. Onların çalışmasında küreselden sıkışığa kadar grafit parçacıklarının bozunması TER ve TEU arasında artırılmış bir fark ile özellikle birleştirilmemiştir. Diğer parametreler küreselleştirici içinde nadir elementler ve demirde artık kükürt soğuma eğrisinin şeklini etkileyen olarak tanımlanmıştır. TEU ile ilişkilendirilen çil eğilimi, küreselleştiricinin her bir çeşidi grafit parçacıklarının büyüme şartını etkilediğinden değişmiştir. Grafit yapısında, aşırı soğuma ve ötektik parlamanın birleşiminin etkileri Çizelge 4.4'te listelenir.

Çizelge 4.4 Soğuma eğrileri tipik sıcaklıklarında küreleştirici etkileri hakkında Zhu ve Smith' in sonuçlarının özeti (Labrecque ve Gagne, 1998).

NiMg ile işlem görmüş ergiyikler için küreleştirici ve ergiyik şartları	TEU* °C	TER-TEU °C	TER °C	Sonuçlanan Grafit Yapısı
Ötektik altı ve ötektik ergiyik, küreleştiricide özel ilave yok	>1155		1158-1160	Grafit yapısı sadece bu sıcaklıklar ile tahmin edilemez. Kükürt içeriği bilinmek zorundadır.
Küreleştiricide nadir elementler	~1145 1135-1145 <1140	<6 >6 <6	~1150 ~1145 ~1140	Lamel Sıkışık Küresel
Ötektik altı ve ötektik ergiyik, Küreleştiricide +%0,01Bi ilavesi, Mg>%0,04	~1132	>10	>1140	Sıkışık

* Düşük TEU yüksek çil eğilimi anlamındadır.

Aynı yazarlar ısıl analiz ölçümlerinin grafit morfolojisinden küreleştirici için daha hassas olduğunu bulmuştur. Onlar NiMg işlemli ergiyikler içinde kükürt içeriğinin fazlası vasıtasıyla sebep olunan grafit morfolojisinin bozunmasını dahi göstermiştir. Böyle ergiyiklerde(ötektik altı ya da ötektik üstü) ötektik parlama ve grafit morfolojisi arasında bir bağ kurmak için bizmutun küçük miktarını içeren test kaplarını kullanma önerilmiştir. Bu element işlem görmüş alaşımlarda büyük TER-TEU (>10°C) üretir. Çünkü Bi karbür kararlaştırıcı ve grafit bozucudur. O TEU'yu azaltır ve TER'i artırır. Etkili bir Mg işlemi için büyük bir parlama elde edilir. Bu yöntem ilginçtir fakat malzemenin karakterizasyonunda ilave bir değişken

eklemiştir.

Yazarlar tarafından belirtildiği gibi son grafit yapıları ile ilişkili ölçülen sıcaklıklar deneysel koşullara bağlıdır. Onların analizinde aslında demirin ötektik altı, ötektik ya da ötektik üstünden biri olması soğuma eğrilerinin özelliklerinin (TEU, TER) belirlenmesinde ana bir rol oynadığı görülmemiştir. Bununla birlikte diğer yazarlar tipik soğuma eğrileri CE değiştirildiği zaman önemli ölçüde farklı olduğunu göstermiştir (Labrecque ve Gagne, 1998).

4.3.5.4 Numune Ölçüsü ve Ölçüm Hassasiyetinin Etkisi

Soğuma eğrileri parametrelerinde numune kabının(şekli ve ölçüsü) etkisi 1990'dan önce açıkça dikkate alınmamıştır. Üstelik numune kabının aynı çeşidi için elde edilen sonuçların tekrar üretilebilmesi detaylı incelenmemiştir. Kabın şekli ve ölçüsünün soğuma eğrileri sıcaklıklarını etkilemesi beklenilir çünkü kapta soğuma esnasında meydana gelen dönüşümler ısı emilme hızına bağlıdır.

Bradley ve diğerleri (1990) beş farklı ticari kaptan aşağıdaki parametreleri karşılaştırmıştır: TER, TES (ya da TEE), MXCREE, MNSDEE ve katılaşmanın ısısı. Kapların üç ölçüsü ve iki şekli değerlendirilmiştir. Onların karşılaştırması listelenmiş parametrelerin her birini etkileyen önemli değişkenleri tanımlayan standart istatistiğe(değişkenin analizi ya da ANOVA yöntemi) dayandırılmıştır. Onlar TER ve TES gibi mutlak sıcaklık ölçümleri kabın çeşidiyle önemli ölçüde etkilenmediğini bulmuşlardır. Bununla birlikte kap çeşidinin ısı transfer hızında numunenin şekli ve ölçüsünün güçlü etkisinden dolayı türevlerin özelliklerinde ana bir rol oynadığı bulunmuştur. Sonunda onlar katılaşmanın toplam ısısının kap ölçüsüyle önemli ölçüde değiştirilmediğini bulmuşlardır.

Aynı demir ve aynı kap kullanıldığı zaman sonuçların tekrar üretilebilirliğine göre 0,3-10,3°C(ya da %0,03-0,9)'lik bir standart sapma TER ve TES üstünde ölçülmüştür. Standart sapmayı kabın her bir çeşidi ve her bir tipik sıcaklık için farklı bulmuşlardır. Kabın çeşidine ve ısı transfer hesabı için kullanılan modele bağlı olarak katılaşmanın ısısı için standart sapma değeri (Bi) 1,7J/g dan 21,4J/g 'a (ya da %1,25-5,6) kadar değişmiştir. Ölçümlerin hassasiyeti böylece verilen uygulama için belirlenmiş olması gereken her bir işlemin tekrar üretilebilirliği için sınırlandırılır.

Soğuma eğrilerinde numune kap ölçüsünün etkisini belirlemek için Suarez ve Loper (1997) demirin kimyası ve numune kap ölçüsü için TAL, TEU ve TER ile ilgili ampirik eşitlikler kurmuştur. Örneğin TAL için elde edilmiş bağıntı aşağıda verilir.

$$TAL=bo+bcXc+bsiXsi+bmgXmg+bsXs+bpXp+bmnXmn+bniXni+aküçükZküçük+abüyükZbüyük+açokbüyükZçokbüyük \quad (4.32)$$

Burada kap ölçüsü küçük olduğu zaman $Z_{küçük}=1$, $Z_{büyük}$ ve $Z_{çokbüyük}=0$ alınmış ve diğer kap ölçüleri içinde aynı tarz uygulanmıştır. Onlar farklı ölçülü üç kap ve yalıtılmış bir kabı test etmiştir. Yalıtılmış kap kullanıldığı zaman bütün Z şartları sifira ayarlanmıştır. Sabitler a ve b doğrusal regresyon analizi vasıtasıyla belirlenmiştir.

Bu bağıntıda ilişki katsayısı 0,9875 bulunmuştur. Bu deneysel veriler ve eşitlik arasındaki mükemmel birlikteliğin göstergesidir. "a" katsayıları pozitif değerlerdir. Sonuç olarak numune kabı yalıtılmadığı zaman kritik sıcaklıklar artar. Bu belirli bir dereceye kadar katılma hareketleri ile aynı yöndedir. Aslında daha yüksek soğuma hızı çekirdeklenme hızını ve soğuma eğrisi sıcaklıklarını artırmalıdır: Bu yalıtılmış ve yalıtılmamış kaplar için gözlenmiştir.

Bununla birlikte kabın ölçüsü dikkate alınırsa eğer "a" katsayıları kabın ölçüsü ile azalır (Çizelge 4.5). Bu durumda artırılmış soğuma hızı(kabın ölçüsünün azalması) tipik sıcaklıkların bir artışı için direkt olarak birleştirilmemiştir. Bundan dolayı, analizde dikkate alınmak zorunda olunan diğer parametreler tanımlanmamıştır.

Çizelge 4.5 Eşitlik 4.32'deki göstergeç değişkenlerin "a" katsayıları (Labrecque ve Gagne, 1998).

	Kap Ölçüsü		
	Küçük	Büyük	Çok Büyük
TAL	13,51	15,10	15,22
TEU	14,99	20,87	25,35
TER	19,39	23,05	28,49

Onlar her bir kap ölçüsü için tipik sıcaklıklar(TAL, TEN ve TER) ve kimyasal bileşim arasında ampirik bir ilişki dahi geliştirmiştir. Onlar TEU ve TER önemli ölçüde kap ölçüsünden etkilenirken TAL'ın kap ölçüsünden sınırlı olarak etkilendiğini gözlemlemiştir. Yalıtılmış kaplarda elde edilen gibi düşük soğuma hızları dahi sıcaklıkların ortaya çıkarılmasında daha büyük değişkenliğe sebep olmuştur (Labrecque ve Gagne, 1998).

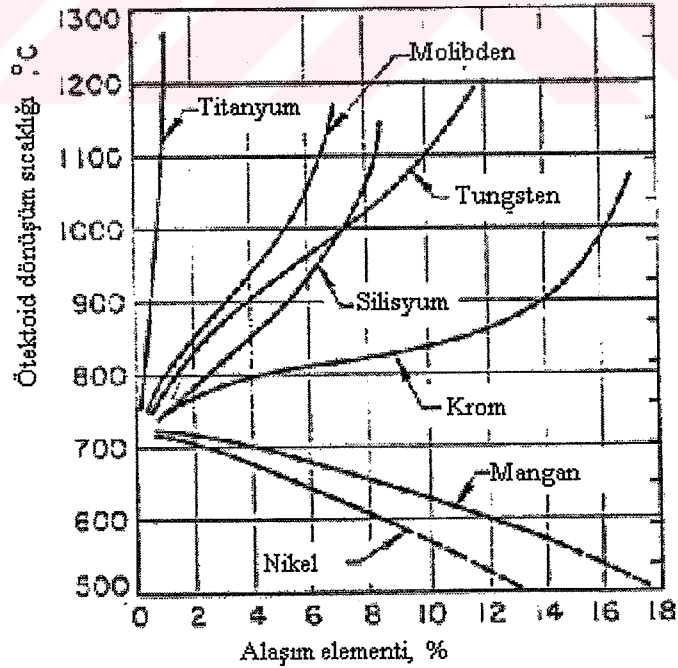
4.3.6 Soğuma Eğrilerinde Ötektoid Dönüşüm Değerlendirmesi

Matris yapısının oluşumu ötektoid dönüşüm bölgesinden soğuma hızı ve çeşitli alaşım elementlerinin varlığı ve miktarı tarafından etkilenir. Dökme demirlerde ötektoid dönüşüm bir sıcaklık aralığında meydana gelir. Bu alanın genişliği silisyuma ve diğer elementlerin varlığına bağlıdır. Düşük soğuma hızı ve silisyum, nikel gibi elementler ferrit oluşumunu destekler. Hızlı soğuma ve bakır, kalay, mangan, krom gibi elementler perlit oluşumunu destekler. Alaşım elementlerinin ötektoid dönüşüm sıcaklığında etkileri Şekil 4.18'de verilir.

Bu elementler var olduğu zaman sonuçlanan mikroyapı verilen bir soğuma hızı için onların miktarına bağlı olarak ferrit, perlit ya da iki fazın karışımından birisi olur. Bu fazların nispi oranları çekme dayanımı, sertlik ve diğer mekanik özellikleri belirler.

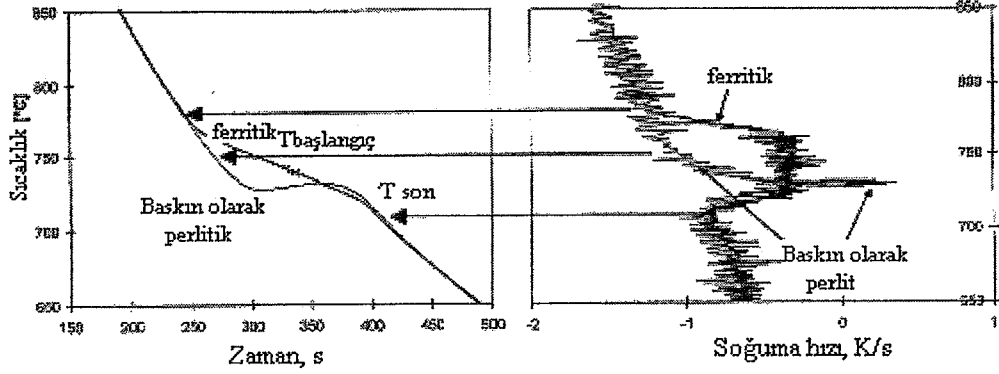
Ötektoid dönüşüm esnasında östenit esasen perlit teşvik edicilerin varlığına ya da yokluğuna ve kritik dönüşüm aralığı (850-700 °C) içinden soğuma hızına bağlı olarak kararlı faz ferrit ve grafit ya da yarı kararlı perlit fazı ya da ikisinin karışımından oluşur (Gowri vd, 1998).

Soğuma eğrilerinin ötektoid dönüşüm bölgesi nadiren kullanılır. Bunun nedeni ölçümün standart kaplarda uzun süre alması ve kabın dağılmasıdır. Dağılmayan küçük modüllü kaplar kullanılmalıdır.



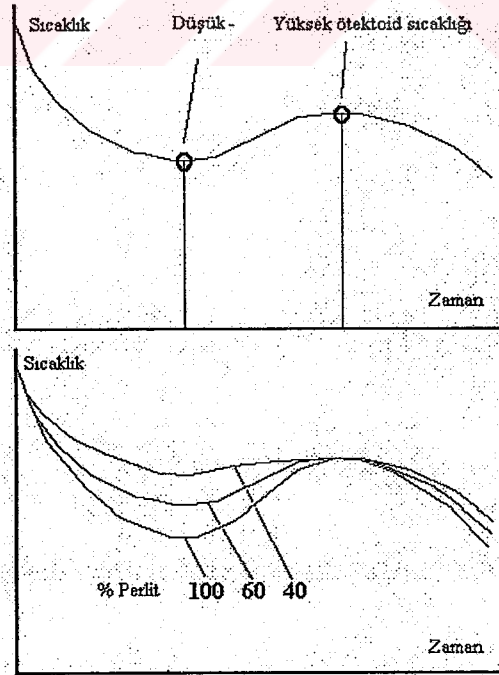
Şekil 4.18 Ötektoid dönüşüm sıcaklığında alaşım elementlerinin etkileri (Gowri vd, 1998).

Şekil 4.19 aynı soğuma hızında ferritik ve baskın olarak perlitik küresel grafitli dökme demirin ölçümlerini gösterir. Perlitik demir daha düşük dönüşüm sıcaklığı ve bir parlama gösterir, ferritik demir daha yüksek dönüşüm başlangıç sıcaklığına sahiptir ve eğri sürekli aşağıya eğimlidir (Bauer, 1998).



Şekil 4.19 Küresel grafitli dökme demirin ötektoid dönüşümünün soğuma eğrileri ve gradyent ΔT (işlemden önce) (Bauer, 1998).

Perlit miktarını ve Brinell sertliğini tespit eden ısıl analiz sistemleri geliştirilmiştir. Örneğin ATAS, Processlab vb. Ötektoid dönüşüm reaksiyonu %perliti ve Brinell sertliğini belirler. Bırakılan gizli ısı tam tahmine izin verir. Şekil 4.20 ötektoid dönüşümün perlit miktarı ile ilişkisini gösterir.

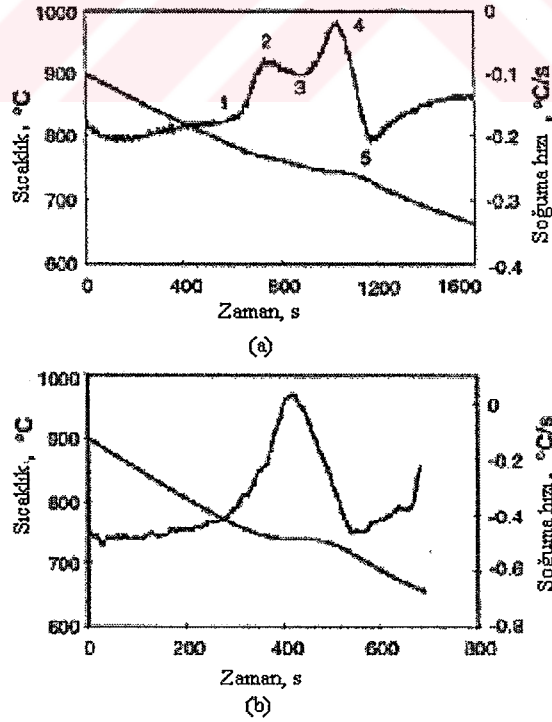


Şekil 4.20 Ötektoid dönüşümün perlit miktarı ile ilişkisi (ATAS, 1998)

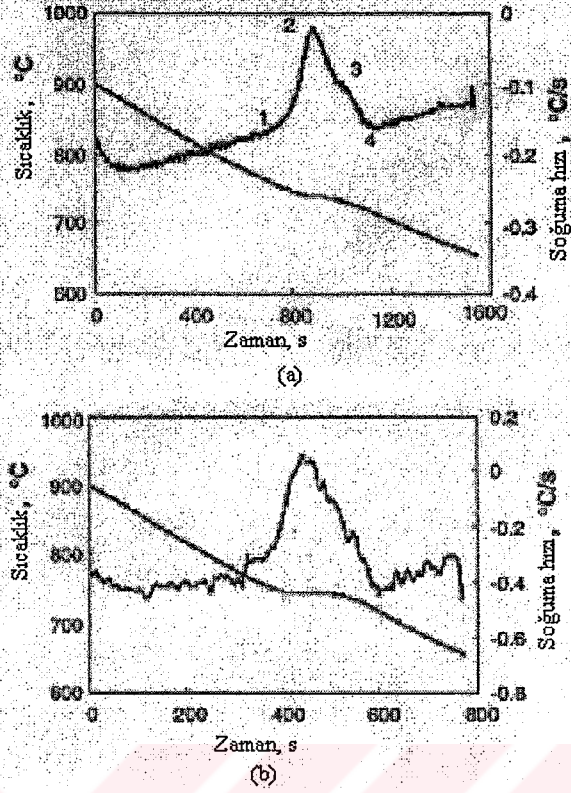
Guo ve Stefanescu (1997) soğuma eğrileri ve mikro yapısal analizi kullanarak küresel grafitli dökme demirin ötektoid dönüşümünde soğuma hızının ve kimyasının etkisini çalışmıştır. İki soğuma hızı iki KGDD bileşim(biri ferritik ve diğeri perlitik) için 1000-600°C sıcaklık aralığında test edilmiştir. Onlar katı durum dönüşüm alanında soğuma eğrisinin şeklinde soğuma hızının etkisini açıkça kanıtlamıştır ve soğuma esnasında meydana gelen özel olaylarla ilişkilendirmişlerdir.

Şekil 4.21a' da görüldüğü gibi birinci türev eğrisinde iki maksimum vardır: birincisi grafit küreleri etrafında ferrit kabuğunun büyümesine uyar, ikincisi (750 °C) östenit/ferrit ara yüzeyinde perlitin büyümesi ile ilişkilendirilir. Soğuma hızı 0,4 °C/s'ye artırıldığında, ferritik reaksiyon engellenir ve sadece perlit piki soğuma eğrisi türevinde görülür(Şekil 4.21b). Bu değişim perlitik numunede görülmemiştir(Şekil 4.22).

Mekanik özelliklerin tahmini için katı hal dönüşüm bilgisi önemlidir. Bundan dolayı dökümün kesit ölçüsünden ya da numune kap ölçüsünden tahmin edilebilen soğuma hızı soğuma eğrileri özelliklerini etkileyen önemli bir değişkendir (Labrecque ve Gagne, 1998). Bu noktadan hareketle değişik modüllü kaplardan oluşan bir sistem oluşturarak küresel grafitli dökme demirlerde soğuma eğrileri ve mikroyapılar arasındaki ilişkiler ortaya konmaya çalışılmıştır.



Şekil 4.21 İki farklı soğuma hızında soğutulmuş ferritik küresel grafitli dökme demirin soğuma eğrileri ve birinci türevleri, (a) 0,2°C/s , (b) 0,4°C/s (Guo ve Stefanescu, 1997).



Şekil 4.22 İki farklı soğuma hızında soğutulmuş perlitik küresel grafitli dökme demirin soğuma eğrileri ve birinci türevleri, (a) 0,2°C/s , (b) 0,4°C/s (Guo ve Stefanescu, 1997).

4.3.7 Soğuma Eğrileri Örnekleri

4.3.7.1 Sertlik Tahmini

Döküm özelliklerinin tahmini ısı analizinin son konusudur. Soğuma eğrileri özelliklerinin kaydedilmesine ilaveten seçilmiş model sonlu elemanlar analiz tekniğiyle uygulanabilir dökümün birkaç yerinde zamanın fonksiyonu olarak sıcaklıkları hesaplamak zorundadır. Böyle bir yaklaşım kullanarak Louva ve diğerleri (1991) soğuma eğrilerinin özellikleri ve demirin kimyasının fonksiyonu olarak basit bir dökümün sertliğini hesaplamıştır. Eşitlik 4.33' te sunulduğu gibi bir kriter fonksiyonu kurulmuştur:

$$HB = A + BxV_{900} + CxV_{650} + Dxt_v + Ext_{sol} + FxMnE + GxCE + HxMg + JxSi \quad (4.33)$$

Burada $MnE = 1,5Ni + 0,5Cu + 4Cr + 10V$

$V_{900} = 900^\circ\text{C}$ 'de ölçülen soğuma hızını temsil eder

$V_{650} = 650^\circ\text{C}$ 'de ölçülen soğuma hızını temsil eder

$t_v = 900^{\circ}\text{C}$ ve 650°C arasındaki zaman

t_{sol} = katılaşma zamanı.

Bu eşitliği elde etmek için on tane ötektik üstü küresel grafitli dökme demirin (işlem görmüş ve aşılınmış) soğuma eğrileri ölçülmüştür. Her bir ergiyik için farklı ölçülü Y blokları ve basamak bloklarını dökmüş ve her bir dökümün soğuma eğrilerini kaydetmiştir. Onlar nümerik yöntemlerle sertlikle ilgili çok önemli soğuma eğrileri özelliklerini izole ederek eşitlik 4.33'i geliştirmiştir. Model için 0,95'lik bir ilişki katsayısı elde etmişlerdir. Onlar yöntemlerini geliştirmek için ardışık olarak kullanılabilir biri katılaşma diğeri katı hal dönüşümü için iki model oluşturmayı önermiştir.

Sertlik esasen perlit yüzdesi ve küre sayısı gibi dökümün mikroyapısal özelliklerine bağlıdır. O direkt olarak bu özelliklerle ilişkili olmalıdır. Louva ve diğerlerinin (1991) belirttiği gibi, mekanik özelliklerin tahmini katılaşma ve katı dönüşüm olayının bilgisi ile çözülebilir. Çok hassas modeller dönüşüm esnasında katı durum dönüşümü ve ısı geçişi arasında ilişki daha iyi anlaşılabilirse geliştirilebilir (Labrecque ve Gagne, 1998).

Perlitin çekirdeklenmesi ve büyümesinden dolayı oluşan ısının ölçüsü olan aşırı soğuma ΔT 'nin kullanımı %P tahmini için kullanılmıştır. Aşırı soğuma maksimum ötektoid sıcaklığı ve minimum ötektoid sıcaklığı arasındaki sıcaklık farkıdır. Aşırı soğuma arttığında dönüşümün itici gücü artar. Bu yüzden o dönüşüm ürününün miktarının bir ölçüsüdür. Sertlik yapıdaki perlitin miktarından hesaplanır. %Perlit aşırı soğuma ΔT ile doğrusal olarak uydurulduğunda düşük ilişki katsayısı ($R^2=70$) gösterir.

$$\% \text{Perlit} = 41,48 + 4,78 \Delta T \quad (4.34)$$

ΔT değerleri perlit miktarı kadar alaşım elementlerinin etkilerini içerir ve bundan dolayı sadece perlit ile sabit belirlenmiş basit bir ilişki çok doğru olmayabilir. Sertlik perlit ilişkisi numuneden bulunmuştur ve soğuma eğrileri parametrelerinden bağımsızdır. 38mm kalınlığındaki numune içinde aşağıdaki bağıntı ile verildiği bulunmuştur (Gowri vd, 1998).

$$\text{BHN} = 1,4489\% \text{Perlit} + 132,6 \quad (R^2=97) \quad (4.35)$$

4.3.7.2 Çekme Eğilimi Tahmini

Küresel grafitli dökme demir katılaşması sık sık çekmeye neden olan karışık bir mekanizmadır. Yalnız ergiyik bileşimi dökümlerdeki çekmeyi açıklamak için yetersizdir. Küresel grafitli dökme demir üretiminde ergitme, bekleme, işlem ve aşılama proseslerinin değişimleri küresel grafitli dökme demir katılaşığı zaman derin bir etkiye sahip olmaktadır.

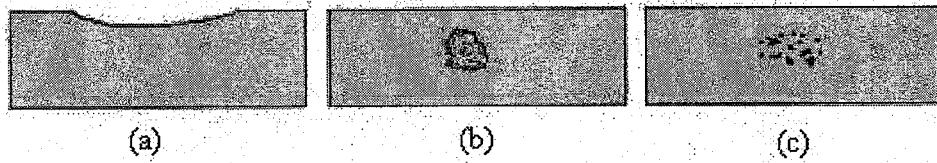
Küresel grafitli dökme demirde çekme hatalarının bir çoğu emme, makro çekme, mikro çekme ve gözeneklilik şeklinde olabilmektedir.

Emmeler ince bir tabakanın oluştuğu katılaşma başlangıcında meydana gelir. Bu tabaka büyük katılaşma basınçlarına dayanmak için yeterli dayanıma sahip değildir. Beslenen metalin bir eksikliği varsa, katılaşma basınç farkları kalıcı bir plastik şekil değişikliğine sebep olur. Katılaşmış metal beslenen metalin çekmeyi beslemek için mahrum edildiği yönde eğilecektir.

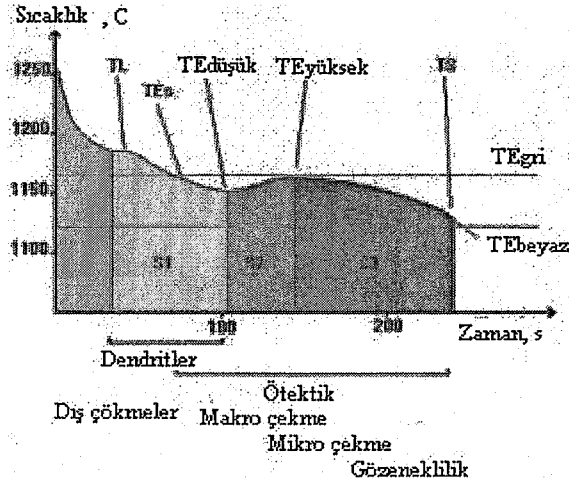
Makro çekmeler katılaşma nispeten kalın bir tabakaya sahip olduğunda ötektik katılaşma başlangıcında ve esnasında oluşur. Makro çekmeler ilk besleme durduğu zaman oluşur.

Mikro çekme/ gözeneklilik katılaşmanın sonuna yakın meydana gelir. Mushy bölgesi ve onun son grafit genişlemedeki etkisi, ikinci çekme ve katılaşmanın sonunda gaz oluşumu hatasız dökümler için önemlidir. Çekme çeşitleri Şekil 4.23'te gösterilir.

Bu çekme mekanizmaları soğuma eğrisinin farklı bölgelerinde katılaşma esnasında ısıl modeli etkiler ve proses değişkenleri ile etkilenir (Bhaskaran ve Wirth, 2002). Şekil 4.24 çekme çeşitlerinin soğuma eğrisi üzerindeki bölgelerini gösterir.



Şekil 4.23 Çekme çeşitleri, (a) dıştan çökme, (b) makro çekme, (c) mikro çekme ve gözeneklilik (Novacast, 1997).



Şekil 4.24 Soğuma eğrisi üzerinde çekme çeşitlerinin oluşum bölgeleri (Sillen, 2002).

Ableidinger ve Raebus (1986) küresel grafitli dökme demirin besleme özelliklerinin aşağıda verilen kriterler karşılandığı zaman en uygun hale geleceğini iddia etmiştir:

$TER > 1152^{\circ}C$, $TES > 1109^{\circ}C$, $MXCREE < -4,0^{\circ}C/s$, $MNSDEE < -0,40^{\circ}C/s^2$ ve $Q_{top} > 250 J/g$

Onlar yukarıdaki beş ısıl analiz parametresinin bir kombinasyonunu MEGK çekme indeksi olarak tanımlamıştır. Bu eşitlik 4.6'da verilir:

$$MEGK = 0,0575(TES - 1096) + 0,033(TER - 1145) + 0,11(MXCREE) - 2,0(MXSDEE) + 0,02875(Q_{top} - 232) \quad (4.36)$$

Yazarlara göre, $MEGK > 2,8$ ise iyi besleme davranışı ve minimum çekme özel bir alaşım için gözlenir (Fung vd, 1990). Sonunda, Q_{top} katılaşmanın toplam ısıdır; Ne kadar fazla grafit oluşursa o kadar fazla özgül ısı üretilir ve katılaşma esnasında daha fazla hacim genişmesi meydana gelir. $Q_{top} > 250 J/g$ uygun kaliteli bir demirin temsilcisi olmalıdır (Labrecque ve Gagne, 1998).

Küresel grafitli dökme demirlerin çekmesi üzerine AFS tarafından yapılan bir araştırmada ısıl analiz parametrelerinin çekme ile ilişkisi de ortaya konmuştur. Elde edilen sonuçlar aşağıda verilir. Genelde, çekme ve yüzey çekmesi şaft kovan göbek levhasından seçilmiş ısıl analiz parametrelerinde (TAL, TER ve TEU) bir artış ile artmıştır. Isıl analiz parametreleri silisyum ve magnezyum içeriği ile artmış fakat oksijen seviyesinde, magnezyum işleminden sonra bekleme zamanı ya da aşılavıcının ilave yöntemi değişkenlerinden çok etki göstermemiştir. Seryum içeriğinde bir artma, daha yüksek döküm sıcaklığı, özel magnezyum alaşımının ya da kristal grafit kullanımının tamamı TAL, TER ve TEU'da bir azalmaya neden olmuştur.

Kalıpta aşılammış demirde, özellikle Zr içeren aşılammıcılarla TAL, TER ve TEU'nun daha yüksek değerlerini göstermiş ve diğer kalıptaki aşılammıcılarla karşılaştırıldığında daha yüksek çekme içinde sonuçlanmıştır. TAL, TER ve TEU'nun daha düşük değerleri ve azaltılmış çekme eğilimi kalıpta aşılammamış demirler ile birleştirilmiştir. Çekme eğilimi TAL, TER ve TEU değerlerindeki uygun bir artış ile 12,7 ve 3,175 mm kalınlıklı basamaklı plakaların her ikisinde küre sayısında bir artış ile artmıştır (AFS araştırma projesi, 34).

4.3.7.3 Isıl Analiz Yöntemiyle Aşılamanın Optimizasyonu

Endüstriyel dökme demir parçaların üretimi için verimli aşılama bir zorunluluktur. Dökme demirin aşılammması, muhtemelen dökme demir alaşımları için yapılan en yaygın işlemdir. Aşılammmanın amacı yeterli miktarda çekirdeklenme bölgeleri temin etmektir. Böylece sıvı halden katı hale dönüşüm, sınırlı aşırı soğuma ve çok sayıda çekirdeklenme bölgeleri ile kontrollü bir şekilde meydana gelebilir. Bu yüzden aşılama, çökelen karbonun ve meydana gelecek hücrelerin sayısını ve şeklini etkiler. Hücrelerin sayısı alaşımanın mekanik özellikleri ile birlikte dökümden önceki özellikleri üzerine etkilidir. Örneğin gri dökme demirlerdeki çok yüksek çekirdek sayısı mikro çekinti eğilimini artırabilir. Yeterli sayıdaki çekirdek ile, katılaşma düşük bir aşırı soğumada başlar. Böylece çözünmüş haldeki karbon, difüzyon mesafesi kısa olduğu için sementit yerine grafit şeklinde çöker. Bu durumda grafit çökmesi ile meydana gelecek olan hacim değişimi, yüzey merkezli kübik östenit kristallerinin hacim merkezli demir kristallerine dönüşümü sonucu meydana gelen hacimdeki küçülmeyi telafi edecektir.

Aşılama tane sayısını, grafit şeklini, miktarını ve boyutunu etkilediği gibi; sertlik, çekme mukavemeti, yorulma ve işlenebilirlik gibi fiziksel özellikler üzerinde derin bir etkiye sahiptir.

Bir dökümhane için aşılama ile ilgili en önemli problem spesifik bir alaşım ve parça kategorisine göre ne tip bir aşılammıcı kullanılacağına karar vermektir. Diğer problem ise, ne kadar kullanılacağına karar vermektir. Eğer çok fazla kullanılırsa döküm parça yüzeyinde cüruf problemleri ve genleşme hataları ile çekinti meydana gelir. Doğru miktarda aşılammıcı kullanmak sıvı metalin çekirdeklenme durumuna bağlıdır. Sıvı demirin durumunun çekirdeklenme için genellikle sabit olduğu düşünülür. Bu durum kimyasal analiz sabit olduğunda doğru kabul edilebilir. Ancak kimyasal analiz sıvının çekirdeklenme özellikleri hakkında bize her hangi bir şey söylemez. Dökümhaneden dökümhaneye değişen ve kimyasal analize göre kontrol edilen aşılama prosesi, ancak ısıl analiz yöntemi ile belirgin bir şekilde

kontrol edilebilir. Çekirdeklenme özelliklerini veren bir çok parametreden bazıları aşağıdadır:

- Şarj bileşimi,
- Şarjdaki birleşik karbonun miktarı,
- Şarj malzemesinin boyutu,
- Şarj malzemelerinin oksit seviyesi,
- Şarj bileşenlerinin ve diğer katkı malzemelerinin fırına verilmiş sırası,
- Ergitme ve tutma esnasındaki sıcaklıklar ve geçen süre,
- Döküm öncesi aktarma işlemleri

Normal olarak dökümhaneler, bütün bu faktörler üzerinde sınırlı kontrole sahiptir ve çekirdeklenme özelliklerinin ölçümü hakkında fikir sahibi olunmadığından, yukarıdaki faktörlerin döküm parçasını nasıl etkileyeceğinin farkında değildirler.

Dökümden önce yapılan geleneksel kama(çil) testi yöntemi, çekirdeklenme durumunu belirlemede kullanılan doğru bir yöntemdir. Çil eğiliminin ölçülmesinde oldukça duyarlıdır ancak çok daha detaylı bilimsel yaklaşım için sınırlı değerlere sahiptir. Kararlı sisteme göre katılan numunelerin ısı analizi, çekirdeklenme özelliklerinin belirlenmesini sağlar. Bu işlem, aşılama yönteminin optimizasyonuna izin verir. Optimizasyondaki amaç verimli ve ekonomik aşılama kullanmaktır (Sillen, 1998, Aypek, 1999).

4.3.8 Soğuma Eğrilerini Etkileyen Faktörler

Soğuma eğrilerini etkileyen bir çok faktör vardır. Literatürden elde edilen bilgilere göre aşağıdaki değişkenler soğuma eğrilerini etkilemektedir:

- Ergiyiğin Sıcaklığı
- Ergiyiğin Oksidasyon Durumu
- Magnezyum İşlemi
- Aşılama İşlemi
- Bekleme Zamanı
- Demirin Kimyasal Bileşimi
- Numune Kap Ölçüsü
- Numunenin Soğuma Hızı

Bazı genel eğilimler yukarıdaki değişkenlerden çıkarılabilir. Bütün diğer değişkenleri sabit tutarak, ergimiş demirde çözültide daha yüksek oksijen içeriği, daha yüksek östenit sıvı gen sıcaklığıdır. Çünkü östenitin çekirdeklenmesi kolaylaştırılır. Küreselleştirme işlemi ergiyiğin O ve S içeriğini azaltır; sonuç olarak soğuma eğrileri sıcaklıkları çekirdeklenme bölgeleri sayısının azalmasından dolayı azalır.

Aşılama işlemi çekirdek potansiyelinin yükselmesiyle karşıt etkiye sahiptir. Küreleştirici ve

aşıl原因cı alaşımların farklı kimyasal bileşimleri soğuma eğrisinde farklı etkilere sahiptir. Çeşitli elementlerin konsantrasyonları soğuma eğrileri ile ilişkilendirilmiştir. %C, %Si, %P ve CE nin belirlenmesi iyi şekilde saptanmıştır ve bu elementler örnekleme yöntemi kontrol altında ise dar hata sınırları ile soğuma eğrisi sıcaklıkları ile kolayca değerlendirilir. Soğuma eğrilerinde diğer elementlerin tekil etkileri detaylı değerlendirilmemiştir fakat çoğu elementin etkilerini içeren ampirik modeller özel uygulamalar için tanımlanmıştır.

Numune kap ölçüsü soğuma eğri sıcaklıkları ve katılma ısısının ölçülmesini etkilediği görülür. Maalesef, birkaç belirtilmiş uyumsuzluktan dolayı literatürden genel bir eğilim çıkarılmamıştır. Bununla birlikte numune kap ölçüsü azaltıldığında soğuma hızı arttı, sıcaklık ölçümlerinin hassasiyeti geliştirilmiştir. İşlem parametreleri ve soğuma eğrileri özellikleri arasında ilişki kurulduğu zaman özel olması güçtür çünkü bir çok değişken aynı durumda soğuma eğri parametrelerini etkileyebilir (Labrecque ve Gagne, 1998).

Önceki çalışmalardan bir dökme demirde karbon eşdeğeri ve grafit şeklinin dökme demirlerin soğuma eğrilerini etkileyen yegane faktörler olmadığını göstermiştir. Bundan dolayı unutmamak gerekir ki; grafit yapısı soğuma eğrisinin yapısını belirlemede temel rolü oynarken, diğer proses parametreleri soğuma eğrisinin çok küçük detayları üzerindeki sınırlı etkileriyle değişiklik yapabilirler. Ara sıra ortaya çıkan etkilerden bazıları, yetersiz küreleştirici ilavesi, dökme demirin yüksek kükürt içeriği, yetersiz aşıl原因cı kullanımı, eser elementler ve hatta yetersiz işletme yöntemleridir. Aynı grafit yapısı elde edilse dahi, bütün bu parametrelerin soğuma eğrisi üzerinde aynı etkiye sahip olduğu yorumu yanlıştır.

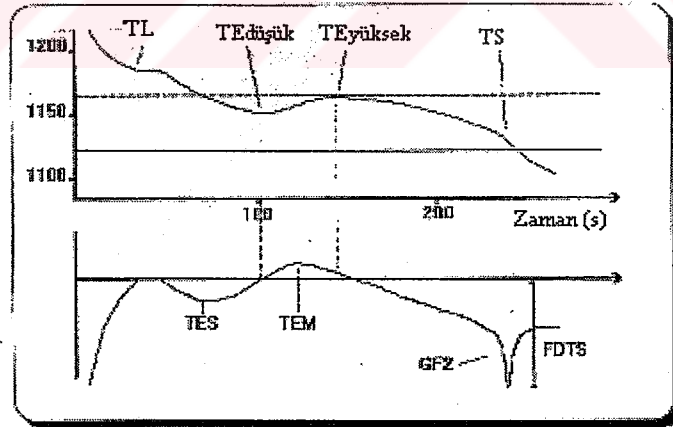
Daha düşük döküm sıcaklıkları, daha yüksek soğuma hızlarına sebep olduğu için, ölçülen sıvıgen ve katıgen sıcaklıklarının her ikisinde de bir düşüş gözlenmiştir. Benzer şekilde, numunelerin boyutlarının küçük olması aynı etkiyle sonuçlanacaktır. Numune kaplarının ısı iletkenlik gibi bazı özelliklerinin de soğuma eğrisi üzerinde etkisi olduğu kabul edilir. Bu yüzden belirli tarzda, daha önce işçilerin kullandığı deney şartlarını tespit etmeksizin, özellikle doğru olmayan döküm sıcaklıkları ile yapılan ölçüm sonuçlarının yanlıştır kabul edilir.

Termodinamik açıdan bakıldığında, bileşimdeki her bir elementin az veya çok denge diyagramı ve çekirdeklenme kinetiği üzerine etkisi olduğu için ısı analiz sonuçlarını etkilemesi beklenmelidir. Dökme demirlerde yaygın olarak bulunan elementlerin ısı analiz üzerindeki etkilerini görmek için bir çok araştırma yapılmıştır. Küresel grafitli bir dökme demirdeki Ce'un etkisi, kükürt giderme ve karbür oluşumunu engellemektedir. Diğer bir

etkisi ise sıvıdaki zararlı eser elementleri nötrale etmektedir. Ötektik durma sıcaklığının Ce ilavesiyle orantılı olarak azaldığı önceden bulunmuştur. Bizmut, kurşun, antimonit ve titanyum, küresel grafitli dökme demir üretiminde zararlı elementler olarak bilinirler. Grafit yapıları üzerindeki etkilerini tespit etmek için bir çok araştırma yapılmaktadır. Ancak bu elementlerin, küresel grafitli dökme demirlerin soğuma eğrileri üzerindeki etkileri hakkında bilgi yetersizdir (Zhu ve Smith, 1995, Aypek, 1999).

4.3.9 Uygun Soğuma Eğrileri

Soğuma eğrisi 0.75cm' lik bir modül için alaşımın katılaşma davranışını yansıtır. Davranış alaşımın döküm ve fiziksel özelliklerini belirler. Soğuma eğrisinin kendisi kadar onun türevleri ve ilgili sıcaklıklar ve hesaplanmış göstergeler bundan dolayı alaşımın katılaşmasını tahmin etmek için kullanılabilen modellerdir. Uygun soğuma eğrisi farklı şekillerden dolayı farklı dökümler ve kalıp kararlılığı v.b. den dolayı kalıp malzemesinin çeşitli tipleri için değişir. Bundan dolayı uygun değerler her bir dökümhanede uygulama ve isteklerle ilişkilendirilmelidir. ATAS alaşım veritabanında maksimum/minimum sınırları yavaş yavaş ince ayar için ve döküm hatası meydana geldiği zaman durumlar kadar uygununu da tanımlamak için durum tabanlı öğrenme yöntemini kullanmak için dökümhaneye izin verir. Şekil 4.25 gri dökme demir alaşımları için uygun soğuma eğrisini göstermektedir.

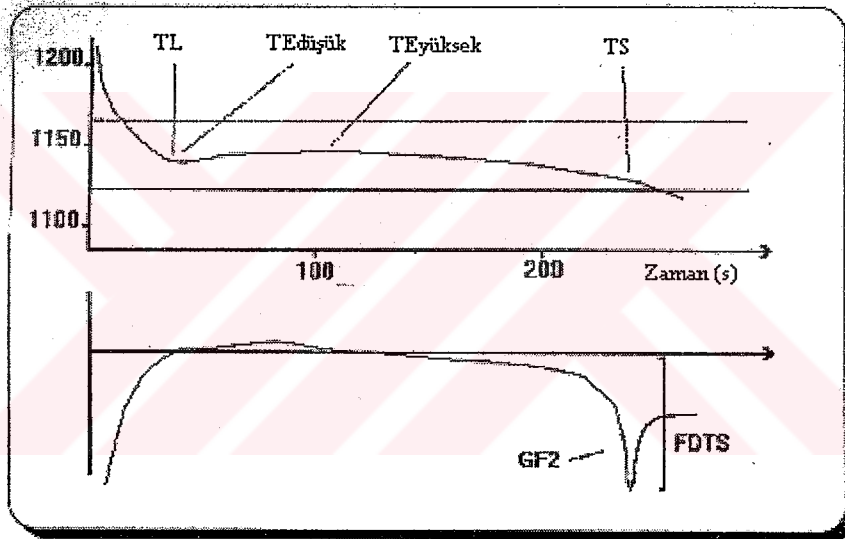


Şekil 4.25 Gri dökme demir alaşımları için uygun soğuma eğrisi ve türev eğrisi(ATAS, 1994).

Bununla birlikte meselenin bazı genel ana hatları belirtilebilmektedir. Ötektik altı alaşımlar için TL dendritik büyümeyi gösteren iyi tanımlanmış bir platoya sahip olmalıdır. Ötektik katılaşmanın başlangıcı TES çok derin olmamalı ve TL ve TE düşük arasında olmalıdır. TE düşük en az 25°C TE beyazın üzerinde olmalıdır. Maksimum parlama hızı(TEM) çok yüksek olmamalıdır ve parlama 2-5°C arasında olmalıdır. Grafit faktörü 1(GF1) en az 50

olmalıdır. Grafit faktör 2 (GF2) 25 için maksimize edilebilmelidir. Katgende birinci türevin derinliği(FDTS) -3.5 'ten daha az olmalıdır.

Küresel grafitli dökme demir gri ya da lamel grafitli dökme demirden farklı bir tavırda katlaşır. Grafit karbonun içinden diffüze olmak zorunda olduğu östenitin bir kabuğuyla çevrelenmiş küreler olarak oluşturulur. Normal olarak küresel grafitli dökme demir ötektik bileşime yakındır ve östenitin birincil çökmesine sahip değildir. Gri ve küresel grafitli dökme demirin farklı şekilleri ısı iletkenlik üzerinde derin bir etkiye sahiptir. İletkenlik lamel grafitli dökme demir için daha yüksektir. Isıl iletkenlikte fark katlaşmanın sonunda özellikle katgen civarında çok etkilidir. Şekil 4.26 küresel grafitli dökme demir için uygun bir soğuma eğrisini gösterir.



Şekil 4.26 Küresel grafitli dökme demir için uygun soğuma eğrisi ve türev eğrisi (ATAS, 1994).

TL ve TE düşük hemen hemen aynı sıcaklıklardır. S1 yüzeyi çok küçük ya da sıfırdır. Parlama oldukça düşük $2-3^{\circ}\text{C}$ olmalıdır. Ötektik zamanı, grafitin kararlı ve eşit bir çökmesini göstererek uzun olmalıdır. Grafit faktörü 1(GF1) tercihen 100'den büyük olmalıdır. Grafit faktörü 2 30'dan az olmalıdır. FDTS -3 'ten az olmalıdır. GF2'nin düşük bir değeri (30'dan az) özellikle FDTS düşükse (<-3) yüksek küre sayısı ve mikro çekinti için düşük bir eğilim gösterir.

Sıkışık grafitli dökme demir için FDTS kadar TE düşük , parlama, TEM, GF1 ve GF2'nin konumu grafit şeklini kontrol etmek için çok önemli faktörlerdir (ATAS, 1994).

4.3.10 Dökme Demirin Isıl Analizinde Artırılmış Güvenilirlik İçin Öneriler

1. Sıvı Demir Örnekleme(düzenlilik ve uyum zorunludur)

- Numune potasında demir ve cüruf olmadığından ve uygulama için potanın yeterince sıcak olduğundan emin olunmalıdır.
- Örnekleme için grafit ya da kil-grafit potaları kullanılmamalı çünkü onlar biraz aşılama etkisi üretmek için eğilim gösterir.
- Örneklenen demirin numuneden numuneye mümkün olduğu kadar aynı sıcaklıkta olduğundan emin olunmalıdır.(not: bu sıcaklık onun bir fırın ya da pota numunesi olup olmamasına bağlı olarak değişecektir).
- Elektrik fırın numuneleri için en iyi sonuçlar fırında 1482.22°C(~2700°F)'lik bir sıcaklığa ulaşıldığı anda genellikle elde edilir.
- Numune potası başka bir potadan doldurulursa eğer, numune dökmeden önce numune potasının doldurup boşaltılması ve sonra tekrar doldurulması tavsiye edilir.
- Kap oturtma düzeneğinin reçine yapısı ve saçılmış demirden korunmalı ve mümkün olduğunca sabit bir sıcaklıkta temiz tutulmalıdır.
- Kap ve oturtma yerinin seviyeleri aynı olduğundan, ucunda olmadığından ve kabın tamamen dolu döküldüğünden emin olunmalıdır.
- Sık numuneler dökülürse(~4-5/saatten fazla) ikinci bir oturtma düzeneği kullanılmalı ve oturtma düzeneğinin fazla ısınmasını önlemek için oturtma düzeneği arasında değişim yapılmalıdır.
- İyi örnekleme uygulaması sıvıgen sıcaklığının en az 50-100°F üzerinde uygun maksimum sıcaklıkta sonuçlanacaktır.
- Son demir numuneleri döküldüğü zaman numune dökmeden önce aşılama işleminden sonra en az 2 dakika izin verilmelidir.
- Gelecek testten önce soğuması için oturtma düzeneğine izin vermek ve reçine yapışmasını azaltmak için analiz tamamlandığında kap oturtma düzeneğinden numune uzaklaştırılmalıdır.
- Düzenli olarak tel fırça ya da diğer vasıtalarla kap oturtma düzeneği ve temasları temizlenmelidir.

2. Cihaz Kalibrasyonu

Kaptan cihaza kadar bütün yol oldukça önemlidir.(IPTS ısı çift standartları arasındaki değişimlerden haberdar olunmalıdır. Kuzey Amerika dökümhane endüstrisi için kaplar 1948 IPTS dir. Kullanılan cihazın 1948, 1968 ya da 1990 IPTS'e göre kalibre edilip edilmediği öğrenilmelidir). Çizelge 4.6 IPTS 68 ve IPTS 48 arasında hataları gösterir ve IPTS 48 ısı çiftleri IPTS 68 cihazı ile kullanılırsa eğer oluşacak sıcaklık farklarını dahi gösterir.

Çizelge 4.6 IPTS 68 ve IPTS 48 arasında hataları ve IPTS 48 ısı çiftleri IPTS 68 cihazı ile kullanılırsa eğer var olacak sıcaklık farklarını gösterir (Shaw ve Blatzer, 2002).

Sıcaklık °F		Cihaz 68/TC 48	
IPTS 68	IPTS 48	Sıcaklık (°F)	T (°F)
2000	1997.3	1995.5	4.5
2100	2097.1	2095.4	4.6
2200	2196.9	2195.1	4.9
2300	2296.8	2294.9	5.1
2400	2396.7	2394.0	6.0
2500	2496.5	2492.5	7.5

3. Kap satın alma, depolama ve görüntüleme

- Bütün kapların aynı üretimden olduğu şartnamesi ile büyük miktarlarda(kullanıma dayanarak) kap satın alınmalıdır.
- Kaplar mümkün olduğu kadar ılık ve kuru bir atmosferde depolanmalıdır. Soğuk bir yerde depolanırsa, kapların kullanımı gelmeden önce sıcaklığının oda sıcaklığına getirildiğinden emin olunmalıdır.
- Yeni bir parti numarası kullanmadan önce önemli farklar meydana gelmediğinden emin olmak için geçerli kaba karşı yeni parti kaplardan elde edilen ısı analiz eğrileri karşılaştırılmalıdır.
- Ergiyik kayıtlarında sağlayıcının parti numarası içerilmeli ve parti numarası değiştiği zaman not edilmelidir (Shaw ve Blatzer, 2002).

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

5.1 Kullanılan Cihazlar

5.1.1 Eritme Birimi

Eritme için “Inductotherm” minimelt 9600 Hz. Frekanslı ve 35 kW gücündeki indüksiyon ocağı kullanılmıştır. Şekil 5.1 deneyde kullanılan indüksiyon ocağını gösterir.



Şekil 5.1 Ergitmede kullanılan indüksiyon ocağı

5.1.2 Yüksek Sıcaklık Isıl Çifti ve Göstergesi

Sıvı metalin sıcaklığı, Siderkemco tarafından üretilmiş 1700 °C'ye kadar ölçüm yapabilen yüksek sıcaklık ısı çifti ile, mikro işlemci vasıtasıyla kontrol edilen Siderport taşınabilir sıcaklık göstergesi üzerinden ölçülmüştür. Aşağıda ısı çifti gösterilir (Şekil 5.2).



Şekil 5.2 Yüksek sıcaklık ısı çifti.

5.1.3 LPG Pota Isıtma Sistemi

Küreselleştirmeden sonra dökümün yapıldığı potanın ön ısıtmasında kullanılan ısıtma sistemidir. Şekil 5.3 pota ısıtma sisteminin fotoğrafını gösterir.



Şekil 5.3 LPG veya doğal gazla çalışabilen pota ısıtma sistemi

5.1.4 Daldırma Çanı Düzenegi

Daldırma çanı grafitten yapılmıştır. Uzunluğu 35cm ve malzeme koyulan çan kısmı 50mm çapında ve 76 mm derinliğindedir. Çan üzerinde belli aralıklarla delikler açılır. Malzeme konulan kısmı metal bir kapakla kapatılarak daldırma yapılır (Şekil 5.4).



Şekil 5.4 Daldırma çanı düzenegi

5.1.5 Bilgisayar ve Deney Düzenegi

Deney sistemi, bilgisayar, A/D dönüştürücü, üçlü kap oturtma düzenegi ve yolluk sisteminden oluşur. Şekil 5.5 deney sisteminin fotoğrafını gösterir.



Şekil 5.5 Deney sisteminin fotoğrafı.

5.2 Kısım I: Al-Si Alaşımı ile Yapılan Deneysel Çalışmalar

Al-Si alaşımları dökme demirler gibi dökümcülükte yaygın kullanılan döküm alaşımlarıdır. Bu noktadan hareketle, dökme demirlerde deneylere başlamadan önce ısıl analiz sisteminin oluşturulması ve test edilmesi amacıyla bir Al-Si alaşımı olan 380 alaşımı temin edilerek ön çalışmalara ve incelemelere başlanmıştır. Böylece işlemler daha kolay gerçekleştirilmiştir. Çünkü bu alaşım daha düşük sıcaklıkta ergimektedir ve daha az donanımla döküm yapılabilmektedir. Bu ön çalışmalar yapılırken diğer taraftan da dökme demir için gerekli donanımlar ve malzemeler hazırlanmıştır. 380 alaşımı ile aşağıdaki kısımlarda detayları ile verilen çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalardan ısıl analiz sisteminin kullanılabilirliğinin yanında yeni sonuçlar da elde edilmiştir.

5.2.1 Giriş

380 alaşımı basınçlı döküm endüstrisinde çok popüler bir alaşımdır. Çünkü bu alaşım hem Al-Cu hem de Al-Si ikili alaşımlarının en iyi özelliklerine sahiptir. Bu alaşım çinko, demir, magnezyum ve mangan gibi diğer elementlere de sahiptir. Kalıntıların ve alaşım elementlerinin miktarına bağlı olarak bu alaşım farklı mikroyapılara sahip olabilmektedir. Bunlara ilaveten soğuma hızı da çok önemli bir faktördür. Alaşım soğuma hızı, yapının inceliğini ve fazların dağılım ve miktarlarını kontrol eder (Gowri ve Samuel, 1994).

Bazı yazarlar bu tip alaşımları farklı yaklaşımlar içinde çalışmıştır. Backerud ve diğerleri (1990) mikroyapı gelişiminde belirli alaşım elementlerinin etkisini değerlendirmiştir. Gowri ve Samuel (1994) iki soğuma hızında değişen alaşım elementlerinin etkisini çalışmıştır. Tenekedjiev ve diğerleri (1995) alüminyum-silisyum alaşımlarının modifikasyonunda bu tip alaşımları çalışmıştır.

Alaşımların bilgisayar destekli soğuma eğri analizi alaşımın bileşimi, katılaşıma gizli ısı, katı kesitinin gelişimi, katılaşılan fazların çeşitleri ve miktarları ve dendrit varlığı hakkında bilgi sağlamaktadır. Dendrit kolları arası uzaklık, alüminyum alaşımlarında modifikasyon ve tane inceltmenin derecesi önemlidir. Dökme demirlerde grafit şekli ve küreselliğin derecesi ve östemperlenmiş küresel grafitli dökme demir yapılar, ısıl işlem çevrimleri soğuma eğrisinin analizi ile belirlenebilir. Dökümhanelerde işlem kontrolü için soğuma eğrilerinin kullanımı çok yaygındır (Barlow ve Stefanescu, 1997).

Bundan dolayı bir Al alaşımının soğuma eğrisini analiz etmeden önce bu alaşımın taban eğrisi çizgisini birinci olarak hesaplamak gereklidir. Tanımla taban eğrisi çizgisi katılaşıma işlemi

esnasında metalurjik reaksiyonlar meydana gelmeden var olan soğuma eğrisinin varsayımsal birinci türevini temsil eder (Kierkus ve Sokolowski, 1999). Bununla birlikte soğuma eğri analizinin kullanımı katılaşmanın diğer alanları için genişletilebilir ancak hesaplanmış değerler oldukça doğru olursa. Hesaplamanın doğruluğu büyük ölçüde sıfır eğrisinin hesaplanmasına bağlıdır. Konu hakkındaki çoğu makaleler sıfır eğrisinin tam tanımını vermekten kaçınır. Sonuç olarak hesaplanmış özellikler tartışılabilir (Barlow ve Stefanescu, 1997).

Geleneksel soğuma eğri analizi tek ısı çiftli bir kum kap kullanır. Newtonian analizi soğuma eğrisinin sonraki analizinde gerekli sıfır eğrisini üretmek için kullanılır (Chen ve Stefanescu, 1984). Son araştırmacılar iki ısı çift kullanmıştır (Backerud vd, 1990). İki ısı çift yapısının avantajı onun analiz çıkışına göre örneğin dendrit uyarlılığı ya da sıfır eğrisini üretmek için kullanılan matematiklere göre örneğin Fourier analizinden birine daha tam bir analize izin vermesidir (Barlow ve Stefanescu, 1997, Fras vd, 1993).

Barlow ve Stefanescu (1997) bilgisayar destekli soğuma eğri analizinin bir özetini sunmuştur. Bu yazarlar taban çizgisini hesaplamak için dört farklı yaklaşım tekrar etmişti. Bu yaklaşımlar aşağıdaki kısımda belirtilmiştir.

Döküm dizaynında modül önemli bir rol oynar. Bundan dolayı modül ile mikroyapıyı ilişkilendiren ısı analiz dizayn mühendisleri için büyük bir değere sahip olacaktır.

Bu çalışmada yeni bir yaklaşım sunulur. İki ısı çift kullanan sistemde aynı kaptan değerler alındığı için bunlar bir birinden etkilenmektedir. Bundan dolayı üç farklı modüllü kap kullanarak onların soğuma eğrileri elde edilir. Burada modül dikkate alındığı için her bir modül ayrı olarak dikkate alınmak zorundadır. Modüllerin farklılığından dolayı eğrilerdeki zamansal değişimin etkisini ortadan kaldırmak için matematiksel eğri yaklaştırması kullanılır. Bundan sonra bunların farkları alınarak bu fark eğrisi sıfır eğrisi olarak kullanılır. Alaşımın gizli ısı bu yeni sıfır eğrisi ile hesaplandı. Sonuç Newtonian analizi ve literatür ile karşılaştırılmıştır.

5.2.2 Soğuma Eğri Analizi

Geçmişte yapılmış analizlerin çoğunda geleneksel ısı analiz, soğuma eğri analizi için veriler elde etmede kullanılmıştı. Bu tekniklere göre veriler aşağıdaki yolla toplanılmaktaydı. Bir alaşımın, test numunesi kabın merkezinde numunenin sıcaklığını kaydeden tek ısı çiftli açık bir kum kalıp içinde katılaşmasına izin verilirdi. Kaydedilmiş sıcaklık sonra soğuma eğrisini

oluşturmak için zamana karşı çizdirilmektedir.

Çok yakın zamanda bu teknik kabın cidarına yakın konumlandırılmış ikinci bir ısı çift ilavesiyle yenilendi. Bu yaklaşımın yandaşlarına göre bu ısı çift vasıtasıyla ölçülmüş ilave sıcaklığı kaydetmek çok doğru ısı analiz sonuçlarına izin vermektedir. Çünkü bu ikinci ısı çiftin ilavesi cidar ve merkez ısı çift arasındaki sıcaklık farkını almaya izin vermektedir. Bu iki sıcaklık arasında en az fark katılan metalin dendrit temas noktasının(DCP) bir göstergesi olarak belirlenmiştir (Backerud vd, 1990). Bu kavram kısmen cidarın çevresinde sadece sıcaklığın ölçüldüğü bir deneyde moment ölçümleriyle desteklenilmiştir.

Son makalede sunulan yeni bir hesaplama diğer yazarlar tarafından kabul edilmiş Newtonian modeline dayandırılır. Burada ölçülen merkez sıcaklık değerleri, sayısal olarak birinci türevi ve en küçük kareler yöntemi kullanarak merkez sıcaklığına göre bir polinom olarak uydurulduğunda hesaplanabilmektedir (Kierkus ve Sokolowski, 1999).

5.2.3 Sıfır Eğrisinin Hesaplanması Yöntemleri

Sıfır eğrisi hesaplanması soğuma eğrisi analizinde çok tartışmalı konulardan biridir. Prensip metalin her hangi bir faz dönüşümünün meydana gelmediği varsayılan metal-kap sisteminin soğuma eğrisinin türevi olmasına rağmen bu tasavvur edilmiş bir eğridir. Alaşımarda gizli ısı ve katı kesrinin hesaplama doğruluğu sıfır eğrisinin hesaplanmasına bağlıdır. Son sıfır eğrisi hesaplama yöntemleri aşağıda listelenmiştir.

- Newtonian analizi
- Ampirik analiz, tek ısı transfer katsayılı
- Ampirik analiz, üç ısı transfer katsayılı
- Fourier analizi
- Tek ve eşsiz fonksiyon kullanmak

Bu yaklaşımların matematik temelleri ve sıfır eğrisi hesaplamak için elde edilebilir yöntemlerin detaylı analizi Barlow ve Stefanescu (1997), Kierkus ve Skolowski (1999)'nin, çalışmalarında sunulmuştur.

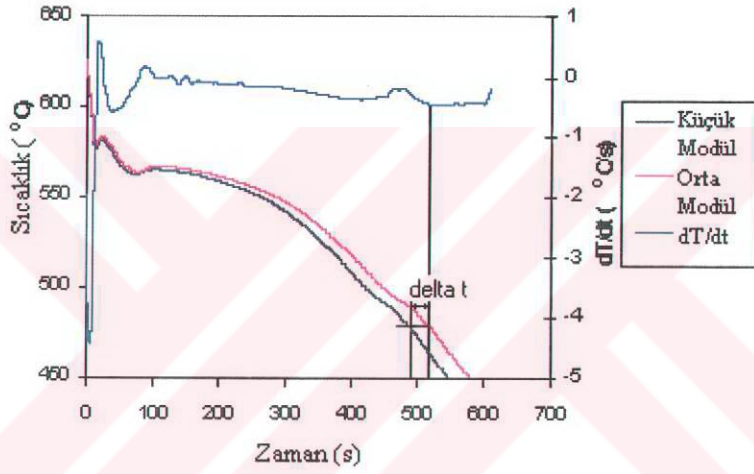
5.2.4 Modül Esaslı Yeni Sıfır Eğrisi

Isıl analiz üzerindeki çalışmalar dökümhane şartlarının dikkate alınmasında daha fazla çalışmaya ihtiyaç olduğunu gösterdi (Zhu ve Smith, 1995). Kalıp malzemesi ve döküm sıcaklıkları gibi dökümhane şartları soğuma eğrilerinin şeklini etkilemektedir. Döküm aşamasında şartları dikkate alarak elde edilmiş bir sıfır eğrisi ısı analizde faydalı olacaktır.

Diğer taraftan özellikle soğuma hızı hassasiyetli alaşımlardan yapılan dökümlerde son

mikroyapı çokça soğuma hızına ve sonuç olarak kesitlerin modülüne bağlıdır. Bu sebepten soğuma eğri verilerini elde etmek için üç farklı modüllü kap kullandım. Bundan dolayı bu kaplardan elde edilmiş alaşımın katılma süreleri ve soğuma eğrileri birbirinden farklı oldu. Daha büyük modüllü kap yavaşça soğuyacağı için, katılmanın sonunda büyük bir zaman farkı her bir katılma eğrisi arasında elde edilmiş olacaktır.

Sıfır eğrisinin elde edilmesinde birinci adım olarak bu zaman farkı aşağıda açıklandığı gibi bertaraf edilmek zorundadır. Küçük ve orta modüllü kapların birinci türev eğrileri faz değişimlerinin zamanı ve katılma sonunu gösteren zamanı elde etmek için kullanıldı. Orta ve küçük kapların katılmasının sonunda zaman farkı, Δt (Şekil 5.6), α katsayısını elde etmek için veri sayısı, n 'e bölünür.



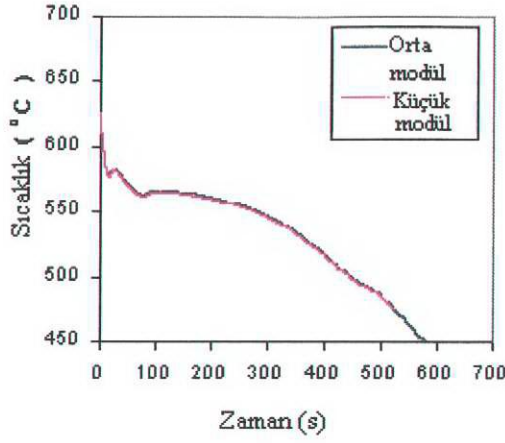
Şekil 5.6 Küçük ve orta modüllü numunelerin soğuma eğrileri ve birinci türev eğrisinden Δt 'nin belirlenmesi.

Bu aşağıdaki eşitlikte gösterilir:

$$\alpha = \frac{\Delta t}{n} \quad (5.1)$$

Bu katsayı her bir veri sayısı ile çarpılmakta ve elde edilen sonuçlar küçük modüllü kabın eğrisinin zamanına eklenerek bu kabın eğrisi için ötelenmiş zaman değerleri elde edilmektedir. Daha sonra Excel 7.0 programından faydalanılarak bu yeni zaman değerlerine karşılık gelen sıcaklıkları orta modüllü kabın soğuma eğrisinden elde edilmektedir. Böylece modülü küçük olan numunenin soğuma eğrisi zamansal olarak modülü büyük olan numunenin soğuma eğrisine yaklaştırılmaktadır (Şekil 5.7). Modüldeki farktan dolayı bu zaman gecikmesi bu yöntemle bertaraf edildikten sonra, küçük modüllü kabın yeni soğuma

eğrisi ve orta modüllü kabın soğuma eğrisi arasındaki fark değerleri çizdirilerek yeni sıfır eğrisi elde edilmektedir. Yeni sıfır eğrisi birimi °C/s olarak varsayıldı.



Şekil 5.7 Küçük modüllü numunenin yeni soğuma eğrisi ve orta modüllü numunenin soğuma eğrisi.

Zamanla katı kesrinin gelişimi kadar katılaşma esnasında oluşan gizli ısının miktarı orta modüllü kabın soğuma eğrisinin birinci türevi ve yeni sıfır eğrisi arasındaki alanın hesaplanmasıyla bulunan değerlerin alaşımın özgül ısısı ile çarpımıyla belirlenmektedir.

Literatür ile karşılaştırıldığında bu yeni yöntem ile elde edilmiş 380 alaşımının gizli ısısının sonucu Newtonian analizinden daha doğru oldu. Üstelik döküm şartları bu yöntem ile dikkate alınmıştır çünkü veri gerçek katılaşma eğrisinden elde edildi. Bununla birlikte, bu yöntemin uygulanması için iki numunenin modülleri arasındaki fark yeterince küçük olmalıdır (bu çalışmada %2'dir).

5.2.5 Modülün Soğuma Eğrilerine Etkileri

Kritik sıcaklıkların kap çeşidine bağlılığı sürpriz değildir çünkü kap malzemesinin ısı transfer özellikleri katılaşan numuneden ısı çekilmesini yani soğuma hızını düzenlemektedir. Üstelik kabın genel şekli Chvorinov'un kuralı tarafından gösterildiği gibi ısı gelişimini değiştiriyor:

$$t_f = C \left(\frac{V}{A} \right)^2 \quad (5.2)$$

Burada t_f V hacminin toplam katılaşma zamanı; C bir orantılılık sabiti; V katılaşan hacim ve A kalıp-metal ara yüzeyinin alanıdır.

V/A oranı dökümün modülü olarak isimlendirilir. Aslında bu kesit modülü her hangi bir

katılaşan döküm metalinde dikkate almak için iyi bilinen bir őkilsel bir parametredir. Verilen bir katılaşma hacmi için daha geniş bir yüzey dökümde daha fazla ısı çekilme hızını teşvik eder. Bundan dolayı kapların farklı őkilleri(prizmatik, küresel, silindirik) farklı soğuma şartları başlatacaktır. Aynısı kesit modülleri örneğın benzer enine kesit fakat farklı yükseklikteki kapların durumunda korunmadığı zaman kabın ölçüsü içinde geçerlidir (Suarez ve Loper, 1997).

Kesit modülü M 'in $M_{kükük} < M_{orta} < M_{büyük}$ eşitsizliğine göre arttığını varsayarak kritik sıcaklık ölçümlerinde bu geometrik parametrenin bir etkisi açıkça vardır. Aslında TAL, TEU ve TER için artan kesit modülleri TAL'ı hemen hemen hiç yükseltmez fakat TEU ve TER'i artırır (Suarez ve Loper, 1997).

Buradan iki genel sonuç çıkarılabilir. Birincisi katılaşma davranışının özelliğı ve böylece sonuçlanan soğuma eğrisinden belirlenmiş çeşitli ısı analiz parametrelerinin büyüklüğü büyük ölçüde kabın çeşidine ve çalışılan örnekleme işlemine bağıdır. İkinci olarak aynı alaşım için elde edilmiş farklı soğuma eğrileri farklı kesit kalınlıklarına sahip bir dökümde farklı yerlerde katılaşmaya uyan soğuma eğrilerinin özelliğının kesit ölçüsüne bağı olarak konumla değışmesinin beklenilmesini ve işlem kontrol amaçları için ısı analizden elde edilmiş soğuma eğrisi test dökümünün katılaşma davranışının temsilcisi olabilir ya da olmayabilir gerçeğini gösterir. Bu nicel yapı ilişkilerini elde etmede güçlüğü gösterir (Bradley vd, 1992).

Numune kap ölçüsünün soğuma eğri sıcaklıkları ve katılaşma ısısının ölçülmesini etkilediğı görülür. Genel olarak numune kap ölçüsü azaltıldığında soğuma hızı artar, sıcaklık ölçümlerinin hassasiyeti geliştirilir. Ancak bu genelleme modülün etkilerini ifade etmek için yeterli değildir. Bundan dolayı modülün etkilerini daha iyi analiz etmek için üç farklı modüllü kaptan oluşan yeni ısı analiz sistemi kullanıldı.

5.2.6 Deneysel Çalışma Prosedürü

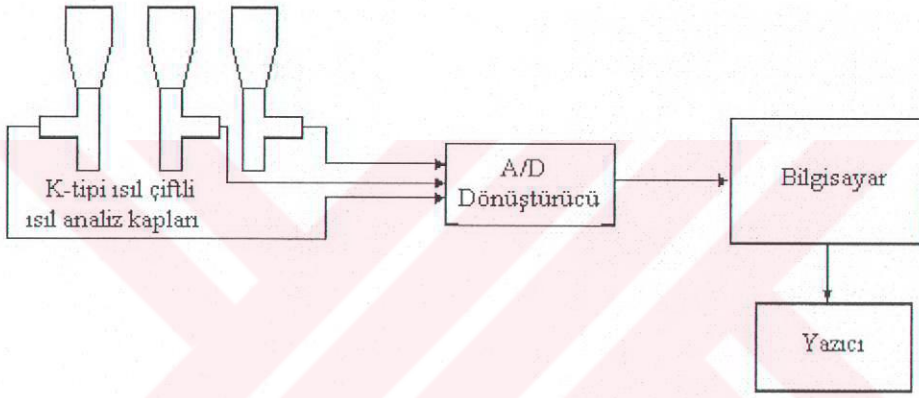
380 alaşımı Çizelge 5.1'de belirtilen kimyasal bileşimde elde edildi. Yaklaşık 0,6 kg şarj malzemesi indüksiyon fırınında ergitildi. Sonra ergiyik tuz tabletleriyle(KCl-MgCl₂-KF ve C₂Cl₆) 730°C'de 2 dakikalık işleme tabi tutuldu. Böylece cüruf yüzeyden temizlendi ve gaz giderildi. Gazı giderilmiş metal farklı modüllere sahip ısı analiz kaplarına döküldü. Bu deney sistemi başlangıçta şunlardan oluşturuldu: Labtech veri elde etme programı, bilgisayar, Dastc kartı ve K tipi ısı çift içeren iki adet standart Quick-Cup pota. Ancak Labtech veri elde etme hızının iki kaptan ölçüm yapıldığında 5 ölçüm/s lik hızlarda kayıt yapabildiğı alüminyum-

silisyum alaşımları üzerinde yapılan deneylerden tespit edilmiştir (Şen, 1998). Daha yüksek hızlarda ölçüm yaparak çok küçük gizli kalmış ısıları üreten fazları ve reaksiyonları tespit etmek amacıyla, yüksek hızlarda ölçüm yapabilen bir program yazılmasına karar verildi. Böylece iki kanaldan 100 ölçüm/s hızda ölçüm yapabilen veri elde etme programı C dilinde hazırlandı. Bu programı kullanarak bir çok deney yapıldı. Ancak burada da veri sayısının artması verilerin analizini zorlaştırdı. Çünkü Excel programında grafik çizdirmede veri sınırlaması vardır. Ayrıca elde edilen verileri yani zamana karşı sıcaklık değerleri kullanılarak çizdirilen soğuma eğrilerinin birinci ve ikinci türevleri çizdirildiğinde gürültü problemi nedeniyle düzgün olmayan eğriler elde edildi. Bunlarda soğuma eğrilerinin analizini imkansız hale getiriyordu. Bu nedenle Axum 6.0 programı veri sınırlaması olmamasından dolayı denendi. Fakat bu programda da smoothing işlemi soğuma eğrilerinin, birinci türevleri ve ikinci türevlerinin gürültülü şekillerini analiz edilebilecek düzeyde değiştirmedi. Bunun üzerine başka programlar denemeye karar verildi. TableCurve 2D ve Peakfit programları satın alınarak kullanıldı. Bu iki programdan TableCurve2D programında veri sınırlaması yoktur ancak Peakfit programında vardır. Peakfit 32000 veriden fazla çizdiremiyordu. Yalnız bu programların avantajı Savitzky-Golay algoritması ile istenilen ölçüde smoothing yapılarak birinci, ikinci ve diğer türevler alınarak çizdirilebiliyordu. Peakfit programı özellikle otomatik olarak doğrusal olmayan tepe noktası ayırımı ve analizi ve sıfır eğrisinin istenilen şekilde çizdirilmesine olanak sağlayan bir programdır. Bu programı kullanabilmek ve aynı zamanda veri sayısının 100 ölçüm/s de çok fazla olması nedeniyle analizi kolaylaştırmak için ölçüm hızı ayarlanabilen bir program tekrar yazıldı. Bu programı 20 ölçüm/s lik hızda kullanarak veriler elde edildi.

Isıl analiz kaplarına saf alüminyum(%99.7Al) dökerek sistem kalibre edildi. Ancak sistemin soğuk bağlantı eksikliği bulunmaktadır. Bunu da programa başlangıçta oda sıcaklığı ilave edilerek giderildi. Bundan sonra iki farklı modülü ısıl analiz kaplarından birinin altına 1cm'lik ilave yapılarak oluşturuldu. Bu ikili sistemle dökümler gerçekleştirerek soğuma eğrilerini, birinci ve ikinci türevlerini ve iki soğuma eğrisinin farkı çizdirilerek analiz edildi. Fark eğrisinden modülün etkisini ve bu eğrinin fark eğrisi olarak kullanılıp kullanılmayacağı araştırıldı. Farklı modüllerde katılaşmada iki modül arasında zaman farkı meydana gelmektedir. Yeni bir yöntem olarak zamanın etkisini ortadan kaldırmak için iki soğuma eğrisinin zamanlarını karşılaştırarak ve sıcaklıklarda herhangi bir değişiklik yapmadan soğuma eğrileri yeniden çizdirildi. Bu eğrilerin farkları alınarak yeni fark eğrisi oluşturuldu. Bu eğrinin sıfır eğrisi olarak kullanılıp kullanılmayacağına bakıldı. Elde edilen sonuçlardan bu eğrinin sıfır eğrisi olarak kullanılabilmesine karar verildi.

Ancak iki modülün soğuma eğrilerindeki modül etkisini çıkarmak için yeterli olmayacağına da karar verildi. Bu nedenle üçüncü modüllü kap ve düzeneği sisteme dahil edildi. Üçlü sistem Şekil 5.8’de gösterilir. Üçlü modül sistemine geçince modülleri de tekrar ayarlamaya karar verildi. Böylece standart kap, %2 modüllü küçülmüş kap ve %4 modüllü küçülmüş kap oluşturduk. Bunlar Şekil 5.9’da gösterilir.

Çok küçük modül değişikliğinin soğuma eğrisini nasıl etkilediği soğuma eğrilerinden açıkça görüldü. Soğuma eğrilerinin analizi metalografi ve faz analizi ile desteklendi. Numuneler ısı çift bölgesinden alındı ve mikro yapı gözlemleri için sırasıyla zımparalama , parlatma ve %0,5HF ile dağlama yapıldı. Numunelerde bulunan fazlar EDX ve XRD vasıtasıyla tanımlandı.

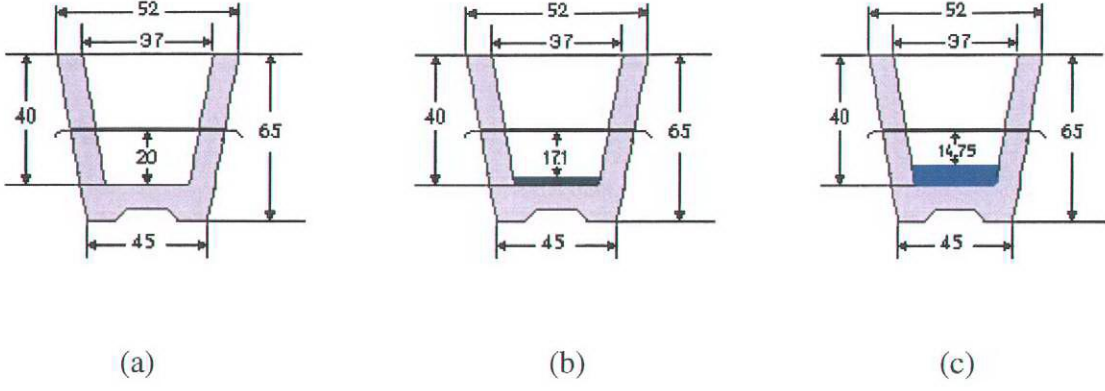


Şekil 5.8 Bu çalışmada kullanılan deneysel sistem.

Çizelge 5.1 Test numune bileşimi.

	%Si	%Cu	%Fe	%Mn	%Mg	%Zn	%Ni	%Ti	%Pb	%Sn
Numune	8.81	3.01	0.681	0.129	0.001	0.658	0.044	0.015	0.228	0.065

Not:Kalanı alüminyum.



Şekil 5.9 Kullanılan üç farklı modüllü kabın enine kesitleri; a) büyük, b) orta ve c) küçük kap.

5.2.7 Sonuçlar ve Tartışma

5.2.7.1 Soğuma Eğri Analizi

Soğuma eğri analizi katılaşma prosesini çalışmada uzun süre kullanılmıştır. Katılaşma esnasında faz değişimini tahmin etmek için soğuma eğrisinin parametrelerini kullanmak mümkündür çünkü soğuma eğrisi faz dönüşümüne uyan bütün veriyi içerir. Üç farklı modül için 380 alışı için kaydedilmiş ısı analiz eğrileri ana eğri üzerinde ilgili türev eğrisi ile birlikte Şekil 5.10, 5.11 ve 5.12'de gösterilir. Türev eğrileri genel olarak katılaşma esnasında faz dönüşümünün sıcaklığını ve zamanını tam olarak belirlemek için kullanılır. Yayınlanmış sonuçlardan (Backerud vd, 1990, Gowri ve Samuel, 1994, Tenekedjiev vd, 1995), reaksiyonlar bu tip alışı için aşağıdaki takip eden sıraya uygun tanımlanır:

- Dendritik ağın gelişimi (α alüminyumun).
- Demir içeren fazların çökmesi, Al_5FeSi ve $Al_{15}(Fe,Mn)_3Si_2$.
- Silisyum ve demir içeren ana ötektik reaksiyon.
- Mg_2Si çökmesi.
- Al_2Cu çökmesi.
- Al_2Cu ve $Al_5Mg_8Si_2Cu_2$ içeren ötektiklerin oluşması.

Bu çalışmada elde edilmiş soğuma eğrilerinden yukarıda listelenmiş reaksiyonların hepsi görülmez. Bu reaksiyonların meydana gelişi başlangıç bileşimlerine, soğuma hızlarına ve numune modülüne bağlıdır. Mg_2Si fazı numunedeki Mg miktarından dolayı oluşmamaktadır.

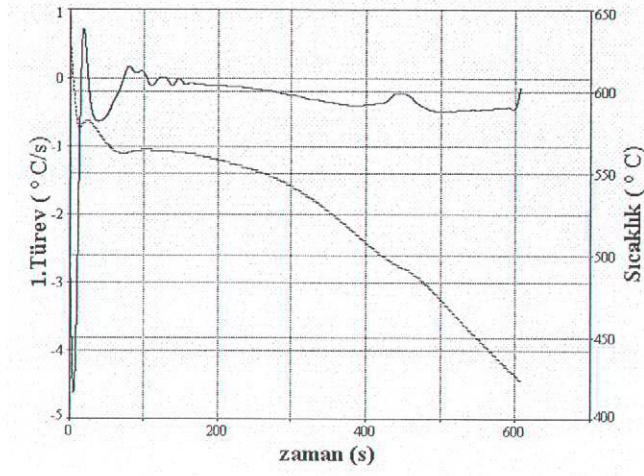
Son reaksiyon sadece düşük soğuma hızlarında yani büyük modüllü numunelerde belirgindir. Orta modüllü numunelerde ise kısmen belirgindir. Üç farklı modülde 380 alaşımının tipik mikroyapıları Şekil 5.13’ te gösterilir. Silisyum ötektik yapısından farklı olarak optik mikroskop, XRD ve EDX ile alaşımda gözlenen fazlar demir fazının iki şekli ve bakır kompleksinin büyük miktarıdır. Çökelen demirin iki şekli Al_3FeSi formülüyle temsil edilen iğneye benzer β fazı ve $Al_{15}(Fe,Mn)_3Si_2$ formülüyle temsil edilen Çin yazısına benzer α fazıdır. Onların görünüş şekli büyük ölçüde soğuma hızına, numune modülüne ve alaşımdaki demir ve mangan içeriğine bağlıdır.

Büyük modüllü numunede soğuma hızı düşük olduğundan $Al_{15}(Fe,Mn)_3Si_2$ fazı dendritik şekle yakın bir şekilde katılaştır. Orta modüllü numunede bu faz Çin yazısına benzer şekilde katılaştır. Küçük modüllü numunede bu faz şeklini orta modüllüden biraz değiştirmiş olarak katılaştır(Şekil 5.13). Ayrıca numune modülü arttıkça demirli fazın soğuma eğrisinde daha belirgin olduğu türev eğrilerinden fark edilebilmektedir.

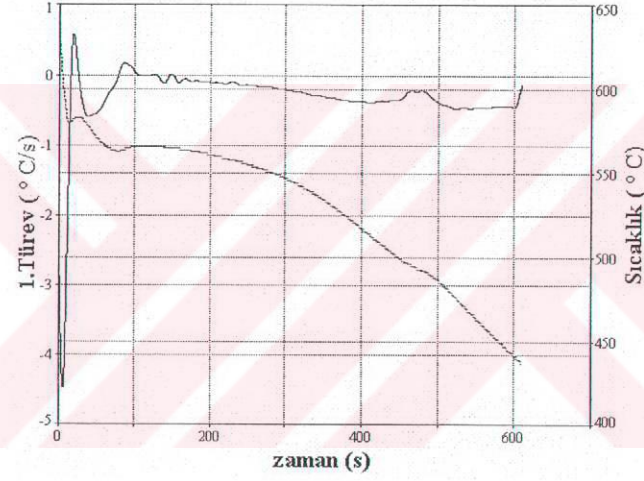
Toplam beş deney üretilmiştir. Çizelge 5.2’de gösterilen reaksiyon sıcaklıkları bu deneylerden elde edilmiş reaksiyonların ortalama sıcaklıklarıdır. Sıcaklıklar üzerinde modülün etkisi Çizelge 5.2’de gösterilir. Modül azaldığında ısıl analiz parametreleri ve reaksiyon sıcaklıkları dahi değişir.

Çizelge 5.2 380 alaşımının reaksiyon sıcaklıklarında modülün etkisi

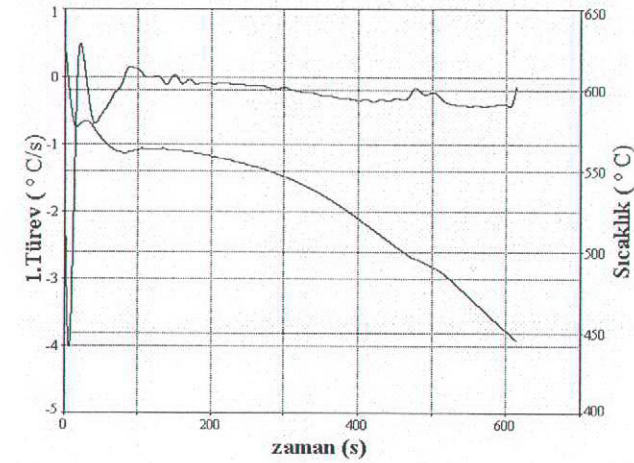
Sıcaklıklar (°C)	Numune Modülü		
	Küçük (0.585 cm)	Orta (0.596 cm)	Büyük (0.609 cm)
Sıvıgen sıcaklığı	582.6	583.06	583.2
Intermetalik faz	570.15	571.32	572
Ötektik	565.86	566.06	566.39
Al_2Cu	493.41	495.41	495.98
İkincil faz	-	492.79	490.12
Katılma sonu	476.6	476.8	477.0



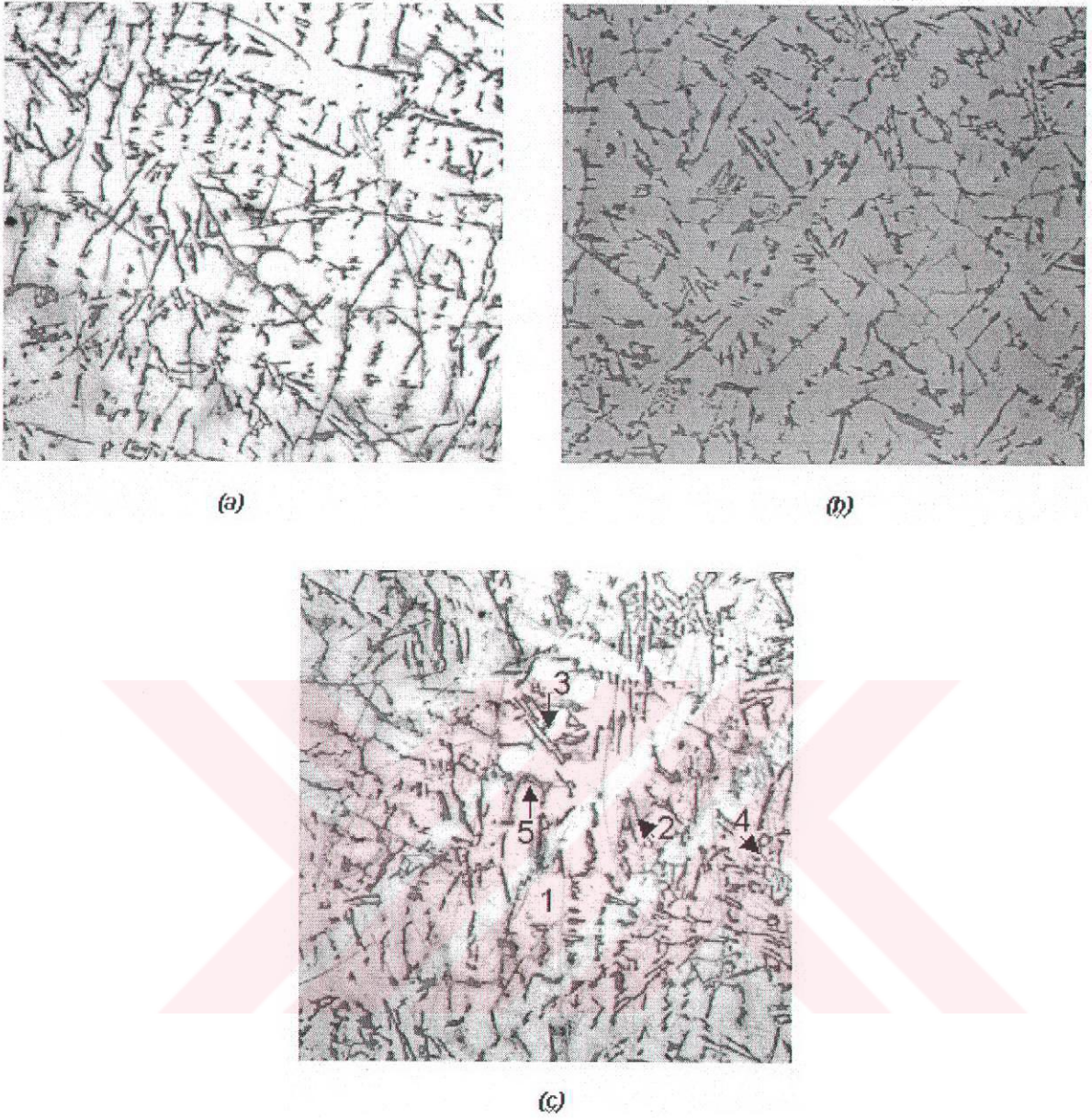
Şekil 5.10 Küçük modüllü kap için soğuma eğrisi ve birinci türev eğrisi.



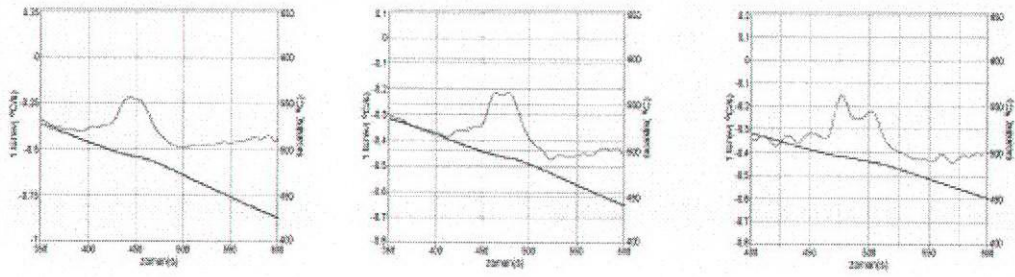
Şekil 5.11 Orta modüllü kap için soğuma eğrisi ve birinci türev eğrisi.



Şekil 5.12 Büyük modüllü kap için soğuma eğrisi ve birinci türev eğrisi.



Şekil 5.13 a) küçük, b) orta, ve c) büyük modüllü numunelerin mikroyapıları; 1) birincil alüminyum, 2) Al_5FeSi , 3) silisyum, 4) $Al_{15}(Fe,Mn)_3Si_2$ ve 5) masif Al_2Cu (100x).



Şekil 5.14 Sırasıyla küçük, orta ve büyük modüle göre odaklanmış ikincil fazlar bölgesi.

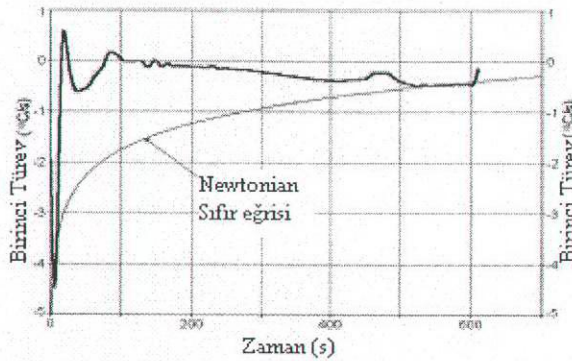
Şekil 5.14'te gösterildiği gibi, numunelerin modülü arttığı zaman, soğuma eğrisi onun şeklini değiştirir. Gerçekten, büyük modülde birinci türev eğrisinde iki pik açıkça görülür, fakat orta modülde birinci türev eğrisinde iki pik açık değildir ve sadece bir pik küçük modülde gözlenir. Genel olarak birinci türevde iki pik farklı aşamalarda meydana gelen iki faz dönüşüm olayı varlığını gösterir. Birinci türevde bir pik sadece bir faz dönüşümüyle ya da iki faz dönüşümlerinden birinin dönüşümde baskın olmasıyla açıklanabilmektedir.

5.2.7.2 Gizli Isı

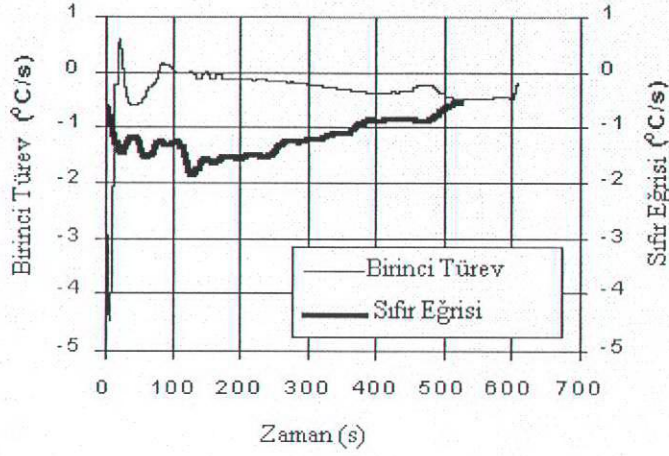
Şekil 5.15 ve Şekil 5.16 sırasıyla orta modüllü numunenin birinci türev eğrisi ile Newtonian sıfır eğrisi ve yeni sıfır eğrisini gösterir. Döküm şartlarını dikkate alan bu yeni sıfır eğrisi alaşımın gizli ısısının hesaplanması için daha doğru görünür. Analizin bu yöntemi ve Newtonian analizi Çizelge 5.3'te karşılaştırıldı. Gizli ısı hesaplamalarında özgül ısı $0,963\text{kJ}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$ alındı. Kullanılan yöntemlerin doğruluğunu değerlendirmek için literatür ve hesaplanmış gizli ısı değerleri karşılaştırıldı. Böylece daha gerçekçi bir katılaşma sıfır eğrisinin önerilmiş yöntemiyle sağlanabilmektedir. Bununla birlikte, bu yöntemin uygulanması için iki numunenin modülleri arasındaki fark yeterince küçük olmalıdır.

Çizelge 5.3. Gizli ısı değerlerinin karşılaştırılması (kJ/kg).

	Newtonian Analizi	Yeni yöntem	AFS Katılaşma 3D Yazılımı	Literatür
380 alaşımı	481.5	487	511	389 (Barlow, 1997) 1574 (Gowri, 1994)



Şekil 5.15 Orta modüllü numunenin birinci türevi ve Newtonian sıfır eğrisi.



Şekil 5.16 Orta modüllü kabın birinci türevi ve yeni yöntemden elde edilmiş sıfır eğrisi.

5.2.8 Sonuçlar

Dökümün modülünü değiştirmek 380 alaşımının soğuma eğrilerini, onların türevlerini ve mikroyapısını değiştirdi. Modülün azalması reaksiyon sıcaklıklarını azalttı. Bundan dolayı karışık döküm yapıları analiz edildiğinde, dökümün farklı kısımlarında modül farkı dikkate alınmalıdır. Üç farklı ölçülü kap ile ısıl analiz dökümün farklı kısımlarında katılma hızının dikkate alınmasında yeni bir yaklaşım olacaktır.

Buna ilaveten döküm şartlarını dikkate alan bu çalışmadan elde edilmiş sıfır eğrisi dökümhane alaşımlarında gizli ısı hesaplamaları için daha iyi değerler ve mikroyapı kontrolü için daha iyi bir takım sağlayabilir.

5.3 Kısım II: Küresel Grafitli Dökme Demirlerle Yapılan Deneysel Çalışmalar

Al-Si alaşımı üzerinde yaptığımız çalışma ile ısı analiz sisteminin yani yazdığımız programın ve donanımın kullanılabilirliği test edilmiş oldu. Ayrıca elde edilen verilerin bilgisayar yardımı ile analiz edilmesinde yardımcı olacak programların ve algoritmaların araştırılıp en uygun olanının bulunması bu ön çalışma sayesinde gerçekleştirildi.

Kısım I'den elde edilen tecrübe ve sonuçlardan ve dökme demirlerin metalurjik değişikliklere daha hassas olduğu bilgisinden hareket ederek deneyde kullanılacak kap sisteminin tekrar dizayn edilmesine karar verildi. Yeni sistemin dizaynı kademe kademe gerçekleştirildi. Al- Si alaşımında işlemler düşük sıcaklıkta olduğundan ve küçük miktarda çalışıldığından farklı modüllü kaplara sırayla döküm yapılması kolaydı. Ancak dökme demirde bu şekilde işlem yapmak zor olacağından ve sıcaklık kaybı olacağından dökümün üç kaba aynı anda dolması için bir yatay yolluk sistemi tasarlandı. Dökme demir ile ilk deneylerimizde farklı modüllü kapları, standart kap, standart kabın tabanına 7.5 mm'lik kum ilavesi ve standart kabın iki yan cidarına 5 mm'lik kum ilavesi ile oluşturuldu. Yapılan ilk 5 deneyden bu yeni sistemde kapların her seferinde eşit miktarda doldurulamadığı ve kap modüllerinin de farklı tarzda oluşturulmuş olması ilişkilerin elde edilmesini ve yorumlanmasını eksik ya da imkansız hale getirdi. Bu eksikliği gidermek için üçüncü kap modülü standart kabın iki yan cidarına 9 mm'lik kum ilavesi ile en küçük modül oluşturuldu ve ayrıca her deneyde kaplara eşit miktarda metal dolmasını sağlamak için kullanılmış kapların taban kısımları eşit kalınlıkta, merkezlerinden delinerek kaplara üst kapak oluşturuldu. Bu kapaklar yapıştırıcı ile kaplara sabitlendi. Böylece kapların her seferinde eşit miktarda dolması sağlandı. Bu yeni sistemin üç deneyde kararlılığı test edildi. İlk aşamada yapılan sekiz deneyin bileşimleri Çizelge 5.6'da verilmiştir. Bu deneylerden yolluğun tam verimli çalışması için 5° eğimli yapılması ve kap oturtma düzeneklerinin etrafına kum konulmasına karar verildi. Bu üç deneyden sonra sistem en son haliyle elde edildi(Şekil 5.17). Sistem son haline gelene kadar aynı zamanda küresel grafitli dökme demirin üretilmesi aşamaları da pratik olarak test edilmiş oldu. Burada karşılaşılan problemler daha sonraki dökümlerde en aza indirildi. Yeni sistem oluşturulduktan sonra aşağıdaki bölümde detayları verilen farklı bileşimlerde 12 döküm üç farklı modüllü(Mküçük=0,43cm, Morta=0,53cm ve Mbüyük=0,60) sisteme döküldü. Böylece 36 numune ve onların ısı analiz verileri elde edildi. Elde edilen veriler bilgisayar vasıtasıyla analiz edildi. Ayrıca her bir numune mikroyapısal olarak optik mikroskop ve görüntü analizi ile incelendi. Isıl analiz sonuçları ve mikroyapısal verilerin ilişkisi kapların modülleri, döküm bileşimleri yani karbon eşdeğeri ve döküm şartlarına göre değerlendirildi.

5.3.1 Ergiyik ve Sistem Hazırlama

Her dökümde ortalama 13 kg'lık şarj, 25 kg kapasiteli yüksek frekanslı indüksiyon fırınında ergitildi. Çizelge 5.4'te bileşimleri verilen yüksek saflıkta demir(Pik), dönüş hurdası, çelik ve karbon verici Çizelge 5.5'te belirtilen yüzdelerde aynı anda fırına şarj edildi. Şarj ergidikten sonra sıcaklık 1530°C'ye ulaştığında ergiyik metal yüzeyinden cüruf perlit tozu ile temizlendi. %2,2 oranında FeSiMg ile küreleştirme işlemi 1520°C'de grafit çanlı daldırma tekniği ile fırında gerçekleştirildikten sonra ergiyik ön ısıtılmış döküm potasına transfer edildi. Transfer esnasında aşılama adımı metal akıntısına %0,5 oranında FeSi75 aşılایıcı ilavesiyle gerçekleştirildi. Ergiyik aşılایıcının tam çözünmesini ve reaksiyonunu garanti etmek için karıştırıldı. Dökümler 1350 ° C üzerindeki sıcaklıklarda yapıldı. Kimyasal analiz için numune aşılama adımından hemen sonra alındı. Küresel grafitli dökme demirin kimyasal bileşimleri Çizelge 5.6'da gösterilir. Üç kap ve yeni bir yolluk sistemi içeren deneysel sistem Şekil 5.17'de gösterilir. Farklı modülleri elde etmek için standart kaplar değiştirildi. Bu kapların üstten görünüşü Şekil 5.18'de gösterilir. Kaplar için dökülen demir miktarında uyumsuzluğu bertaraf etmek için kapların bozulmamış alt kısımları ters çevrilerek ve ortasından delinerek kaplara yapıştırıcı ile ilave edildi(Şekil 5.17).

Çizelge 5.4 Küresel grafitli dökme demir üretimi için kullanılan malzemelerin bileşimi.

	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Mg	%Cu	%Cr	%Ni
K.G.D.D. Hurdası(1)	3.65	2.98	0.19	0.02	0.01	0.047	0.11	0.03	0.02
K.G.D.D. Hurdası(2)	3.75 3.85	2.6 2.7	0.30-0.35	-	-	0.025 0.040	0.40-0.45	-	-
Sorel Piki	4.1	0.013	0.032	0.026	0.000	-	-	0.004	-
Çelik hurdası	0.439	0.232	0.727	0.212	0.212	-	0.33	0.15	0.109
Karbon verici	99.3	-	-	-	0.05	-	-	-	-
Aşılایıcı	-	75	-	-	-	-	-	-	-
Küreleştirici	-	45	-	-	-	4.5	-	-	-
			%Ca	%Al	%Re				
Aşılایıcı2		76.23	0.88	0.46					
Küreleştirici2		45.73	0.88	0.24	0.96	5.96			

Not: Geri kalan demirdir



Şekil 5.17 Bu çalışmada kullanılan deneysel sistem; dökümden önce ve sonraki fotoğraf.



(a)

(b)

(c)

Şekil 5.18 Deneyslerde kullanılan üç farklı modüllü kapların üstten görünüşü: a) $M_{küçük}=0,43\text{cm}$, b) $M_{orta}=0,53\text{cm}$, ve c) $M_{büyük}=0,60\text{cm}$ 'lik kaplar.

Çizelge 5.5 Şarjlarda kullanılan şarj içerik yüzdeleri.

Döküm No	Şarj İçeriği					
	Çelik (%)	Pik (%)	Dönüş Hurdası (%)	Karbon Verici (%)	Küreleştirici (%)	Aşılacağı (%)
1a	12.5	-	87.5	-	2.2	0.5
2a	10	40	50	-	2.2	0.5
3a	-	-	100(2.)	-	2.2	0.5
4a	20	30	50	-	2.2	0.5
5a	20	30	50	-	2.2	0.5
6a	10	40	50	-	2.2	0.5
7a	10	40	50	-	2.2	0.5
8a	10	39	50	1	2.2	0.5
1	10	39	50	1	2.2	0.5
2	10	59	30	1	2.2	0.5
3	10	59.2	30	0.8	2.2	0.5
4	10	59.5	30	0.5	2.2	0.5(2.)
5	10	59.35	30	0.65	2(2.)	0.5(2.)
6	5	59.1	35	0.9	2.2(2.)	0.5(2.)
7	7.5	56.5	35	1	2.2(2.)	0.5(2.)
8	10	59	30	1	2.2(2.)	0.5(2.)
9	10	51.05	37.95(2.)	1	2.2(2.)	0.5(2.)
10	13.8	50.2	35(2.)	1	2.2(2.)	0.5(2.)
11	7	54.05	38(2.)	0.95	2.2(2.)	0.5(2.)
12	8	54.5	36.5(2.)	1	2(2.)	0.75(2.)

Not: (2.) 2.Şarj malzemesinin kullanıldığını ifade eder.

Çizelge 5.6 Dökümlerde elde edilen kimyasal bileşimler ve karbon eşdeğerleri.

Sıra No	%Kimyasal Bileşim														
	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Mo	%Ni	%Al	%Cu	%Mg	%Nb	%Ti	%V	CE
1a	3.33	3.16	0.260	0.025	0.000	0.012	0.009	0.000	0.005	0.193	0.023	0.002	0.008	0.002	4.392
2a	3.81	2.38	0.213	0.026	0.000	0.002	0.002	0.000	0.005	0.093	0.028	0.000	0.006	0.000	4.612
3a	3.87	3.21	0.326	0.018	0.000	0.001	0.007	0.000	0.003	0.490	0.032	0.001	0.006	0.000	4.946
4a	3.41	1.96	0.182	0.011	0.000	0.001	0.000	0.000	0.001	0.131	0.013	0.000	0.000	0.000	4.067
5a	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6a	3.09	2.79	0.198	0.026	0.000	0.069	0.005	0.000	0.008	0.136	0.045	0.004	0.008	0.004	4.029
7a	2.73	2.82	0.2	0.022	0.000	0.102	0.004	0.000	0.012	0.146	0.029	0.005	0.007	0.006	3.677
8a	3.12	3.01	0.199	0.025	0.000	0.121	0.005	0.000	0.014	0.14	0.039	0.005	0.007	0.002	4.132
1	3.54	2.92	0.207	0.022	0.000	0.024	0.004	0.000	0.007	0.136	0.020	0.004	0.006	0.004	4.520
2	3.76	2.25	0.168	0.022	0.000	0.73	0.006	0.072	0.010	0.173	0.029	0.006	0.005	0.007	4.517
3	3.75	2.30	0.175	0.024	0.000	0.027	0.003	0.000	0.013	0.114	0.022	0.006	0.007	0.003	4.524
4	3.24	2.16	0.177	0.032	0.001	0.020	0.006	0.000	0.011	0.104	0.019	0.008	0.009	0.008	3.97
5	3.48	2.51	0.161	0.029	0.001	0.001	0.003	0.000	0.010	0.132	0.044	0.009	0.008	0.005	4.326
6	3.65	2.12	0.135	0.025	0.000	0.014	0.004	0.000	0.007	0.078	0.023	0.007	0.008	0.007	4.365
7	3.63	2.45	0.149	0.032	0.000	0.056	0.004	0.000	0.011	0.075	0.029	0.006	0.008	0.002	4.36
8	3.33	2.63	0.131	0.036	0.011	0.039	0.001	0.023	0.002	0.048	0.055	0.004	0.017	0.006	4.21
9	3.77	2.60	0.219	0.027	0.006	0.000	0.004	0.000	0.009	0.352	0.035	0.005	0.010	0.001	4.64
10	4.15	1.79	0.23	0.022	0.003	0.049	0.010	0.067	0.009	0.251	0.014	0.007	0.008	0.001	4.753
11	3.60	2.31	0.090	0.018	0.008	0.000	0.000	0.000	0.006	0.075	0.036	0.001	0.005	0.000	4.37
12	4.23	2.06	0.005	0.012	0.015	0.000	0.001	0.000	0.011	0.140	0.036	0.000	0.001	0.000	4.916

5.3.2 Isıl Analiz

Soğuma eğrileri kapların merkezinde yerleştirilmiş bir ısı çifti(K tipi) vasıtasıyla kaydedildi ve veriler en fazla 300 okuma/s hızda veri elde etme kabiliyetine sahip özel bir veri elde sistemi kullanılarak elde edildi. Bununla birlikte 20 okuma/s'lik veri elde etme hızı bu çalışmada kullanıldı. Toplanan soğuma verileri bir yazılım kullanarak çeşitli şekillerde değerlendirildi. İşlem Savitzky-Golay algoritması ile %2 düzeltme(smoothing) içerdi. Bu prosedür başka bir yayında da kullanıldı (Şen, 2003).

Soğuma eğrilerindeki kritik sıcaklık değerleri birinci ve ikinci türev yardımı ile belirlendi.

Karakteristik sıcaklıklar T_{maks} , TEU,TER, ve TES olarak belirlendi.

T_{maks} : Eğrideki enyüksek sıcaklık değeri

TEU: Ötektik aşırı soğuma sıcaklığı

TER: Parlama sıcaklığı

TES: Birinci türevin bir minimumuna uyan ötektik katılaşmanın sonu sıcaklığını göstermektedir.

Bu sıcaklıklarla birlikte TER-TEU parlama olarak belirlendi. Birinci türev eğrilerinden ötektik parlama esnasındaki maksimum soğuma hızını gösteren $max(dt/dT)$ ve katılaşma sonundaki dt/dT TES te tespit edildi.

Buna ilaveten dönüşüm sıcaklıkları ters oran eğrileri kullanarak tespit edildi. Ters oran eğrileri zamanın sıcaklığa göre türevinin alınması ile elde edildi. Sonuçlanan eğri yatay eksen sıcaklık, soldaki dikey eksen ters oran ve sağdaki dikey eksen zaman olarak çizdirildi. Belirgin pikler normal soğuma eğrisinde açık olmayan ısı olayları ve dönüşümleri gösterir.

Eğrilerin daha fazla analizi için bilgisayar destekli diferansiyel analiz yeni bir yaklaşımla uygulandı. Bu yöntemle gizli ısılar hem ötektik bölge için hem de ötektoid bölgesi için belirlendi. Burada katılaşma sonu ve ötektoid öncesi bölgeden ve ötektoid reaksiyonu sonrası bölgesinden noktalar seçerek üstel olarak sıfır eğrisi elde edildi. Bu eğri ile 1.türev eğrileri arasında kalan alanları özgül ısı ile çarparak gizli ısılar belirlendi. Özgül ısı değeri 0,194 cal/g.°C olarak alındı.

5.3.3 Mikroyapı Analizi

5.3.3.1 Numune Hazırlama

Soğuma eğrisini kaydetmek için kullanılan kaplardan numuneler elde edildi. Numuneler ısı çiftin ucuna mümkün olduğunca yakın alt taraftan yatay olarak kesildi. Geleneksel zımparalama ve parlatma işlemlerine dayandırılan basitleştirilmiş bir işlem sırası uygulandı.

5.3.3.2 Zımparalama

Kesilmiş numuneler sırasıyla 120-240-320-400-600-1000 meşh sırasını takip eden SiC zımpara kağıdı ile sulu zımparalandı. Orta disk hızları ve nispeten yüksek basınç kullanıldı. Her bir zımparalama diskinde sadece önceki zımparalardan oluşan çizikleri gidermek için gerekli olan zaman kadar işleme tabi tutuldu. 1000 meşhlik zımparadan sonra numuneler alkol ile durulandı ve kurutuldu. Grafit parçacık şeklinin korunması sonraki mikroyapı incelemelerinde önemli olduğundan buna dikkat edildi.

5.3.3.3 Parlatma ve Dağlama

1µm elmas pasta ile orta hızda dönen kısa kavlı çuha son parlatma aşaması olarak kullanıldı. Numuneler üstüne orta basınç uygulanması ile parlatıldı. Grafit şekli ve sayısının değerlendirmesi oksitlenmeyle oluşan etkilerden kaçınmak için yeni parlatılmış numuneler üzerinde gerçekleştirildi.

Mikroyapıda bulunan fazları belirlemek için parlatılmış numuneler 10-12s daldırmayla %2Nital ile dağlandı. Görüntüler dağlamadan sonra uygun olmadığında numuneler elmas pasta ile tekrar parlatıldı ve tekrar dağlandı.

5.3.3.4 Görüntü Analizi

Leica marka görüntü analiz cihazında numunelerin merkezinde yerleştirilmiş ısı çifti etrafından yaklaşık bir alan içinde rasgele seçilerek parlatılmış ve dağlanmış numunelerden görüntüler kaydedildi ve sonra Leica Qwin yazılım paketi kullanılarak analiz gerçekleştirildi. Bu program ile numunelerde bulunan farklı fazların alan kesri kadar grafit parçacıklarının küreselliği, sayısı ve diğer özellikleri belirlenebilmektedir.

5.3.3.5 Grafit Karakterizasyonu

Grafitlerin şekli, sayısı ve alansal yüzdesi, parlatılmış numuneler üzerinde görüntü analiz yazılımı alanın gri seviye alanına dayandırılan ilgili alanın büyütülmesi ya da eşiklenmesini de kullanarak 100x büyütmedeki mikroyapı fotoğraflarında gerçekleştirildi. Görüntü analizi yazılımında dairesellik aşağıdaki bağıntı ile hesaplanmaktadır:

$$\text{Dairesellik} = (\text{Çevre}^2 / 4 * \pi * \text{Alan} * 1.064) \quad (5.3)$$

Burada:

Çevre: Grafit parçacık çevresi. Alan: Grafit parçacık alanıdır.

1.064 düzeltme katsayısıdır. Bu değer bu programa özel bir katsayıdır.

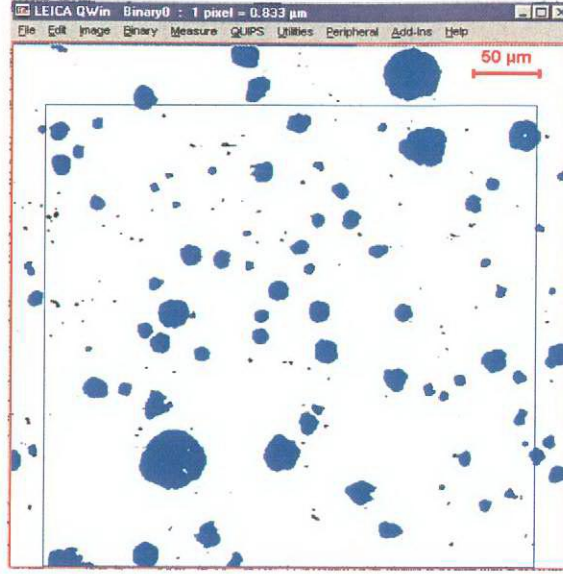
Dairesellik değeri 1 değerine eşit olduğunda tam dairesel yapıyı temsil eder. Bu değer 1 değerinden uzaklaştıkça dairesellikten sapar.

Küreselleşme oranı yüzdeleri ise her bir kürenin küresellik değerleri hesaplandıktan sonra 0,65 değeri üzerindeki küresel diğerleri küresel olmayan grafit olarak kabul edildikten sonra küresel olanların toplam grafit sayısına oranlanmasından sonra hesaplandı. Küresellik eşitlik 5.4'te verilir. Küreselleşme oranı yüzdesi eşitlik 5.5 yardımı ile hesaplandı. Küreselleşme oranı yüzdeleri üç ölçümde elde edilmiş değerlerin ortalamasıdır. Ruxanda ve Stefanescunun (2002) yaptıkları çalışmada küresellik >0,65 değerlerinin küresel grafitli dökme demirler için grafit şeklinin daha iyi bir tanımlayıcı olduğunu belirtmesinden hareketle hesaplamalar gerçekleştirildi.

$$\text{Küresellik} = 1 / \text{Dairesellik} \quad (5.4)$$

$$\% \text{ Küreselleşme Oranı} = (\text{Küresel grafit sayısı} / \text{Toplam grafit sayısı}) * 100 \quad (5.5)$$

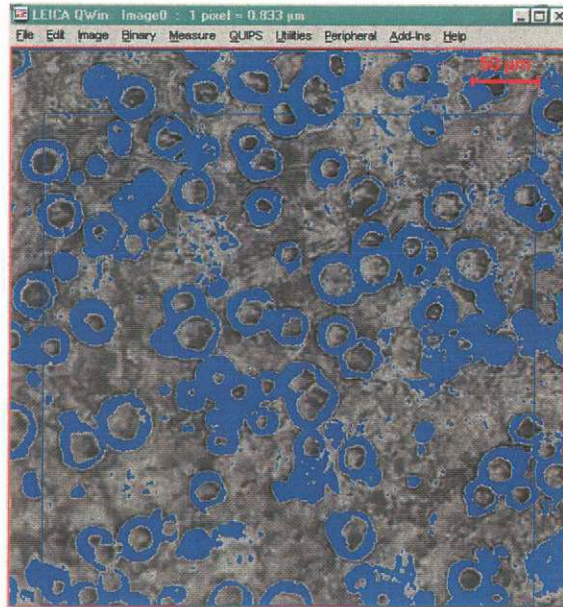
Görüntü dijitalizasyonundan dolayı en küçük küreler birkaç piksele eşdeğer ölçülere sahiptir; bu onların uygun şekillerinin yanlış değerlendirilmesine neden olur. Bundan dolayı 15µm den küçük çevreli bütün küreler filtrelendi ve morfoloji analizinde içerilmedi. Buna ilaveten birim alandaki grafit parçacıkların sayısı görüntünün alanın gerçek alanında görüntü analizörü ile okunan parçacıkların sayısından, üç ölçümün ortalaması alınarak hesaplandı. Grafit yüzdeleri alansal üç ölçümün ortalaması olarak belirlendi. 100x büyütmeli mikro yapı için bu alan 0,140624 mm² idi. 1 piksel 0,833µm idi. Şekil 5.19 grafit özelliklerinin belirlenmesinde örnek bir görüntüyü göstermektedir.



Şekil 5.19 Görüntü analizinde dağlanmamış numune üzerinde grafit özelliklerinin belirlenmesi.

5.3.3.6 Ferrit ve Perlit Yüzdesi

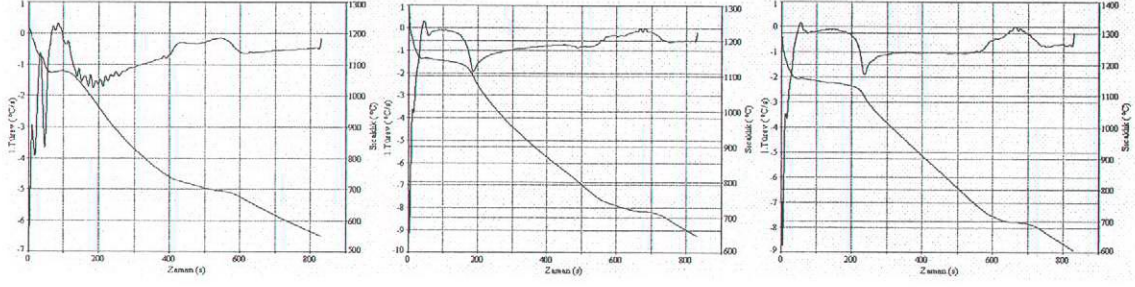
Dağlanmış numunelerde ferrit bölgesi açık renkte olmasından dolayı alan yüzdesini yani ferrit yüzdesini belirlemek kolaydır. Buna bir örnek Şekil 5.20’de gösterilir. Bütün mikro yapı fotoğrafları 100x büyütmede alındı. Ferrit yüzdesi, üç ölçümün ortalaması alındıktan sonra bir alanın yüzdesi olarak her numune için belirlendi. Perlit yüzdesi ise ferrit ve grafit yüzdelерinin toplamının 100 değerinden çıkarılması ile hesaplandı.



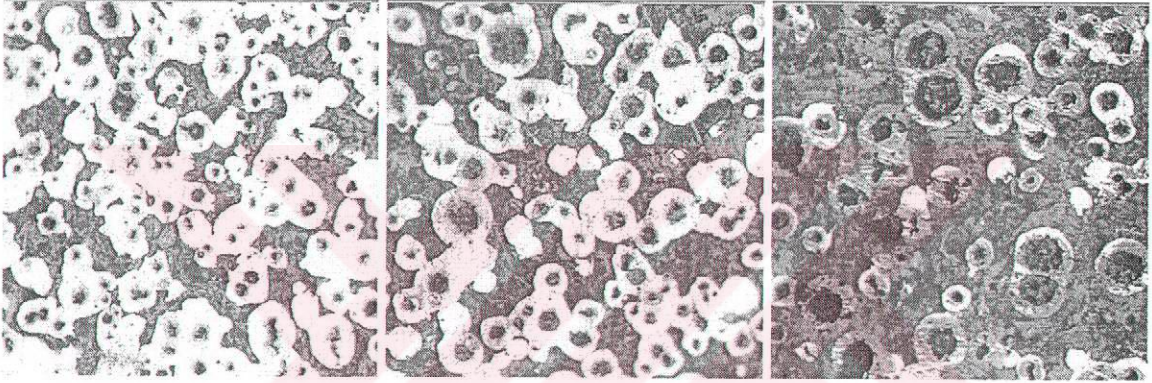
Şekil 5.20 Görüntü analizinde dağlanmış numune üzerinde ferrit alanın tespiti.

6. DENEYSSEL SONUÇLAR

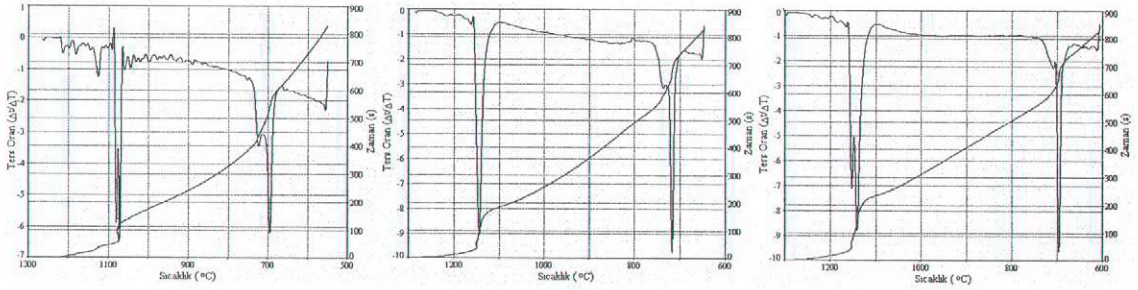
Deneylerde elde edilen numuneler 1'den 36'ya kadar numaralandı. Örneğin 1 nolu döküm için elde edilen numunelerin numaralaması Mküçük=1, Morta=2 ve Mbüyük=3 olacak şekilde yapıldı. Aynı düzen içinde, diğer dökümler de döküm sırasına ve modül ölçüsüne dikkat ederek numaralandı. 1, 2 ve 3 nolu numunelerin soğuma eğrileri ve birinci türevleri Şekil 6.1'de, mikroyapıları Şekil 6.2'de ve ters oran eğrileri Şekil 6.3'te gösterilir. 4, 5 ve 6 nolu numunelerin soğuma eğrileri ve birinci türevleri Şekil 6.4'te, mikroyapıları Şekil 6.5'te ve ters oran eğrileri Şekil 6.6'da gösterilir. 7, 8 ve 9 nolu numunelerin soğuma eğrileri ve birinci türevleri Şekil 6.7'de, mikroyapıları Şekil 6.8'de ve ters oran eğrileri Şekil 6.9'da gösterilir. 10, 11 ve 12 nolu numunelerin soğuma eğrileri ve birinci türevleri Şekil 6.10'da, mikroyapıları Şekil 6.11'de ve ters oran eğrileri Şekil 6.12'de gösterilir. 13, 14 ve 15 nolu numunelerin soğuma eğrileri ve birinci türevleri Şekil 6.13'te, mikroyapıları Şekil 6.14'te ve ters oran eğrileri Şekil 6.15'te gösterilir. 16, 17 ve 18 nolu numunelerin soğuma eğrileri ve birinci türevleri Şekil 6.16'da, mikroyapıları Şekil 6.17'de ve ters oran eğrileri Şekil 6.18'de gösterilir. 19, 20 ve 21 nolu numunelerin soğuma eğrileri ve birinci türevleri Şekil 6.19'da, mikroyapıları Şekil 6.20'de ve ters oran eğrileri Şekil 6.21'de gösterilir. 22, 23 ve 24 nolu numunelerin soğuma eğrileri ve birinci türevleri Şekil 6.22'de mikroyapıları Şekil 6.23'de ve ters oran eğrileri Şekil 6.24'te gösterilir. 25, 26 ve 27 nolu numunelerin soğuma eğrileri ve birinci türevleri Şekil 6.25'te, mikroyapıları Şekil 6.26'da ve ters oran eğrileri Şekil 6.27'de gösterilir. 28, 29 ve 30 nolu numunelerin soğuma eğrileri ve birinci türevleri Şekil 6.28'de, mikroyapıları Şekil 6.29'da ve ters oran eğrileri Şekil 6.30'da gösterilir. 31, 32 ve 33 nolu numunelerin soğuma eğrileri ve birinci türevleri Şekil 6.31'de, mikroyapıları Şekil 6.32'de ve ters oran eğrileri Şekil 6.33'te gösterilir. 34, 35 ve 36 nolu numunelerin soğuma eğrileri ve birinci türevleri Şekil 6.34'te mikroyapıları Şekil 6.35'te ve ters oran eğrileri Şekil 6.36'da gösterilir. Bütün numuneler için soğuma eğrileri ve türevlerinden elde edilen ısı analiz parametreleri Çizelge 6.1'de verilmiştir. 4,5 ve 6 hariç diğer numunelerin mikroyapılarından görüntü analizi ile elde edilen faz yüzdeleri ve küre sayısı ve % küreselleşme oranı Çizelge 6.3'te verilmiştir. Yüksek Cr'lu dökümün numuneleri olan 4, 5 ve 6 nolu numunelerin faz yüzdeleri ve küre sayısı ve % küreselleşme oranı Çizelge 6.4'te verilmiştir. Tüm numuneler için ters oran eğrilerinden elde edilen reaksiyon sıcaklıkları Çizelge 6.2'de verilmiştir.



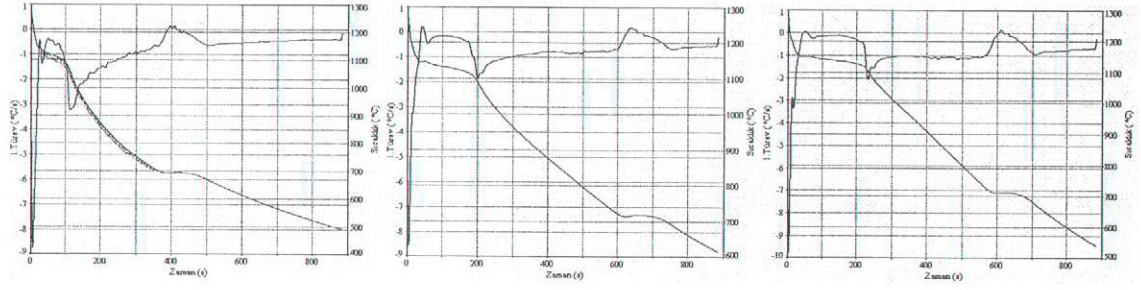
Şekil 6.1 1, 2 ve 3 nolu numunelerin soğuma eğrileri ve 1.türev eğrileri.



Şekil 6.2 1, 2 ve 3 nolu numunelerin mikroyapısı(100x).



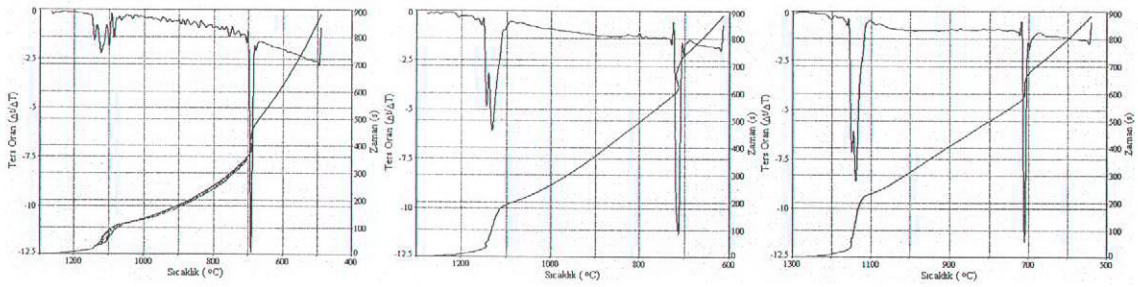
Şekil 6.3 1, 2 ve 3 nolu numunelerin soğuma eğrileri ve ters oran eğrileri.



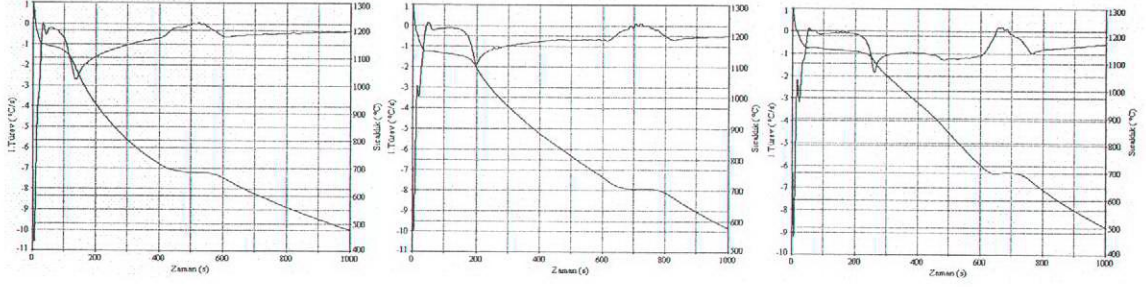
Şekil 6.4 4, 5 ve 6 nolu numunelerin soğuma eğrileri ve 1.türev eğrileri.



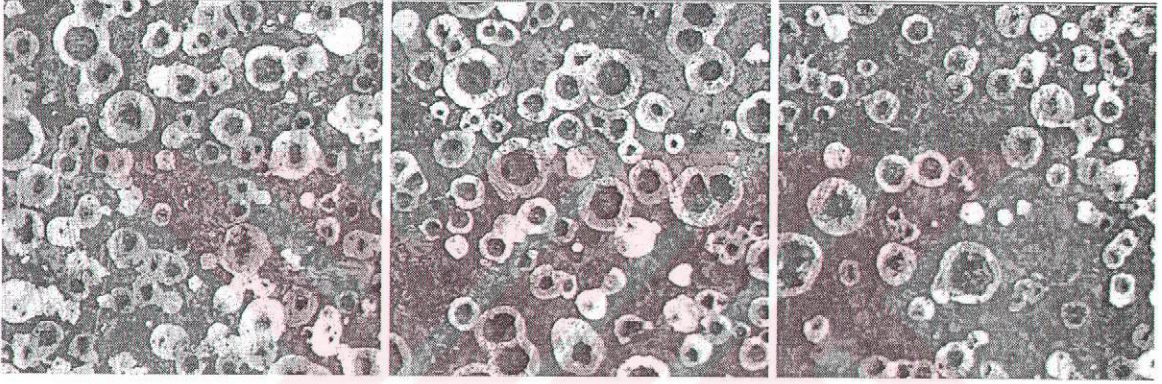
Şekil 6.5 4, 5 ve 6 nolu numunelerin mikroyapısı(100x).



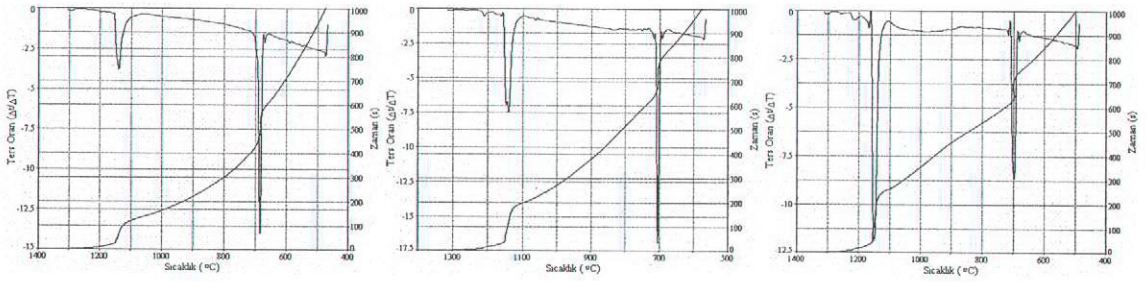
Şekil 6.6 4, 5 ve 6 nolu numunelerin soğuma eğrileri ve ters oran eğrileri.



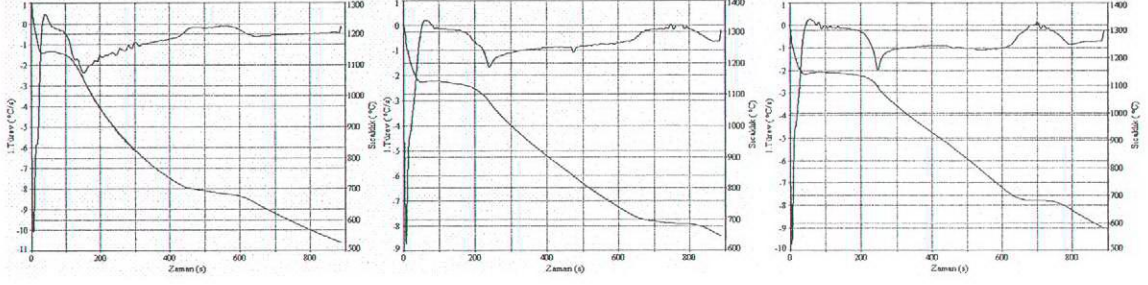
Şekil 6.7 7, 8 ve 9 nolu numunelerin soğuma eğrileri ve 1.türev eğrileri.



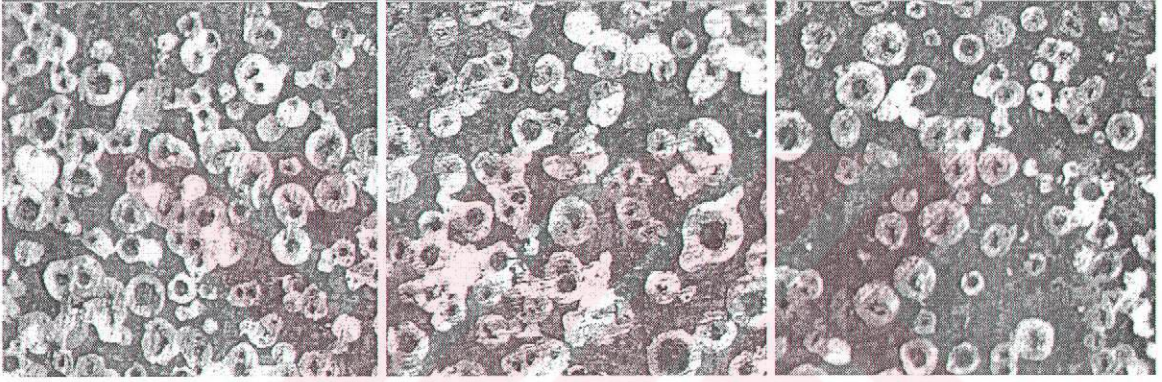
Şekil 6.8 7, 8 ve 9 nolu numunelerin mikroyapısı(100x).



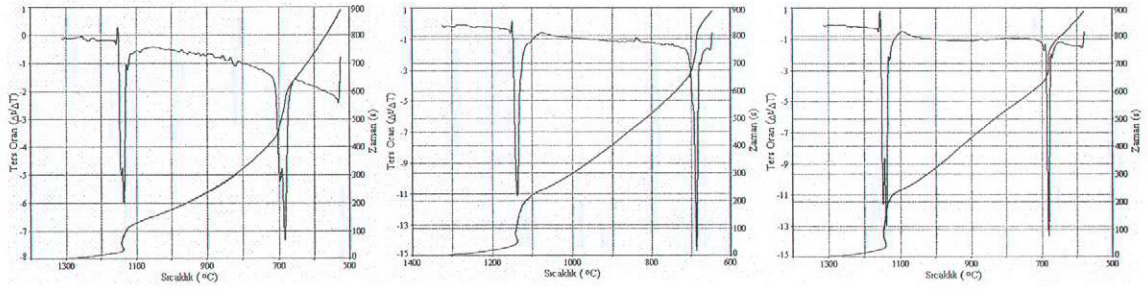
Şekil 6.9 7, 8 ve 9 nolu numunelerin soğuma eğrileri ve ters oran eğrileri.



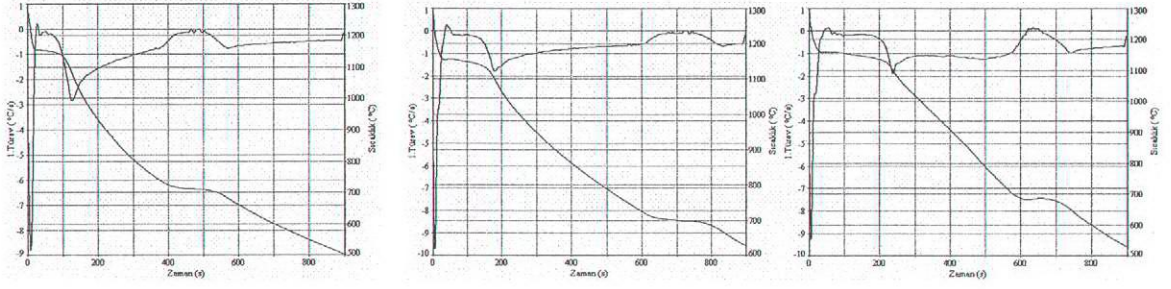
Şekil 6.10 10, 11 ve 12 nolu numunelerin soğuma eğrileri ve 1.türev eğrileri.



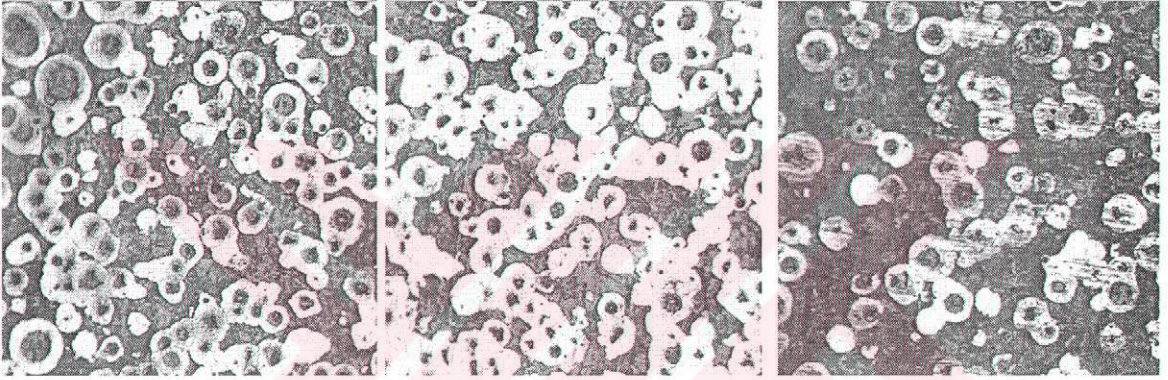
Şekil 6.11 10, 11 ve 12 nolu numunelerin mikroyapısı(100x).



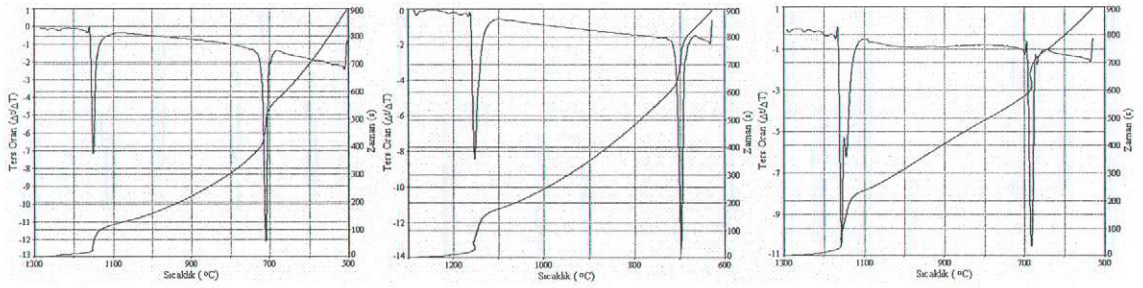
Şekil 6.12 10, 11 ve 12 nolu numunelerin soğuma eğrileri ve ters oran eğrileri.



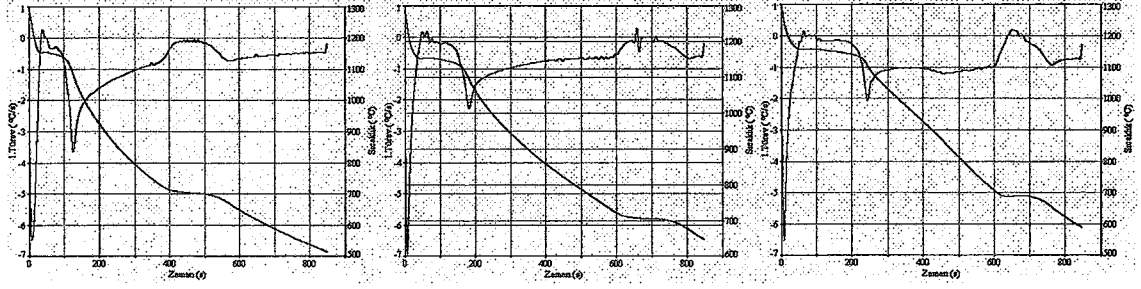
Şekil 6.13 13, 14 ve 15 nolu numunelerin soğuma eğrileri ve 1.türev eğrileri.



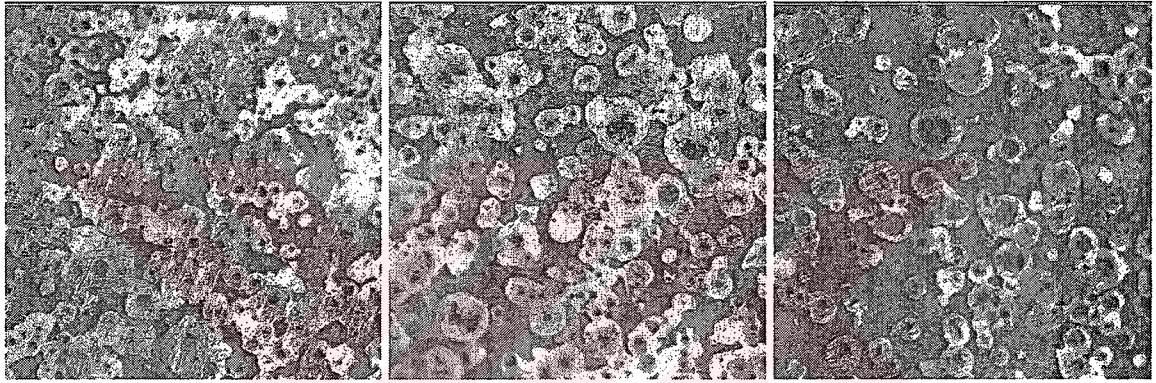
Şekil 6.14 13, 14 ve 15 nolu numunelerin mikroyapısı(100x).



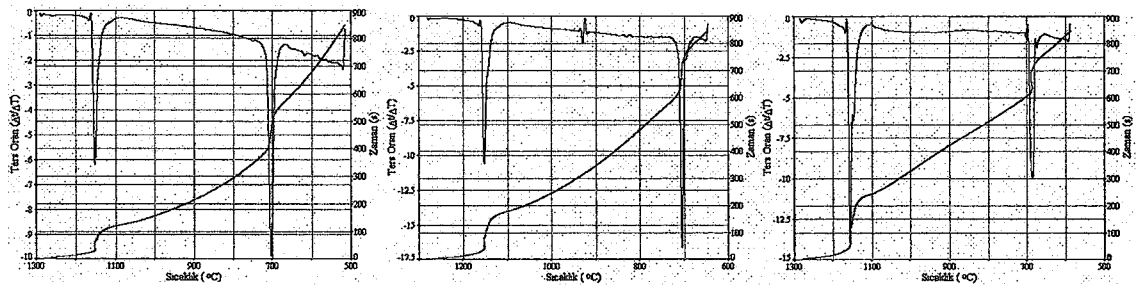
Şekil 6.15 13, 14 ve 15 nolu numunelerin soğuma eğrileri ve ters oran eğrileri.



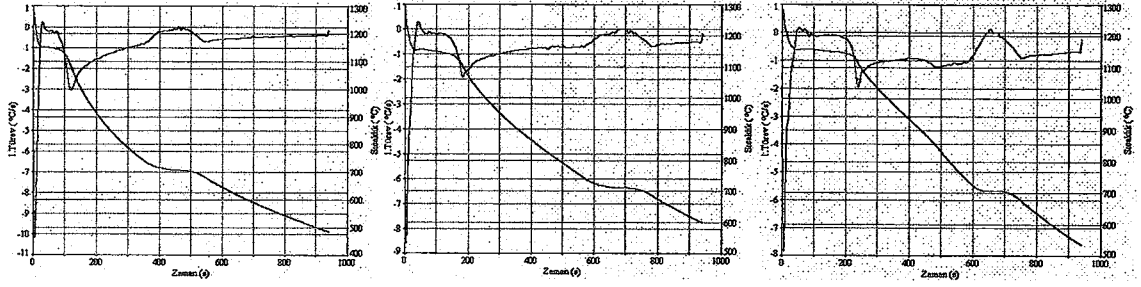
Şekil 6.16 16, 17 ve 18 nolu numunelerin soğuma eğrileri ve 1.türev eğrileri.



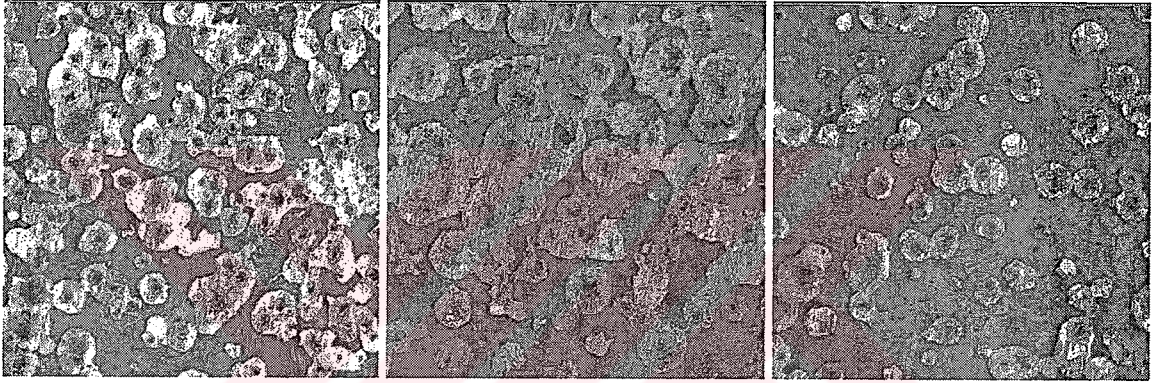
Şekil 6.17 16, 17 ve 18 nolu numunelerin mikroyapısı(100x).



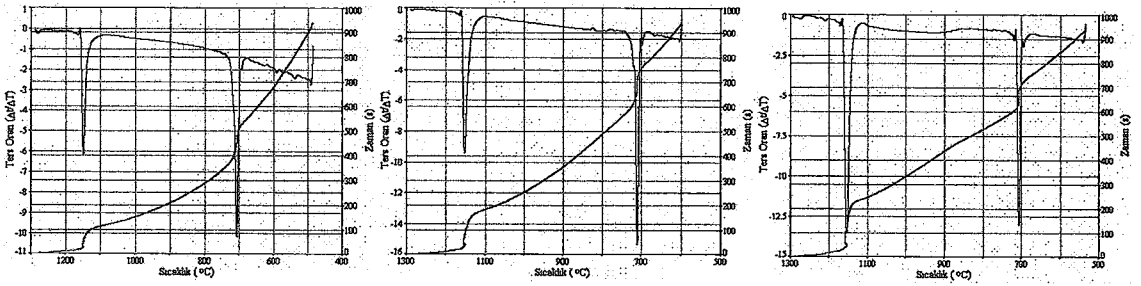
Şekil 6.18 16, 17 ve 18 nolu numunelerin soğuma eğrileri ve ters oran eğrileri.



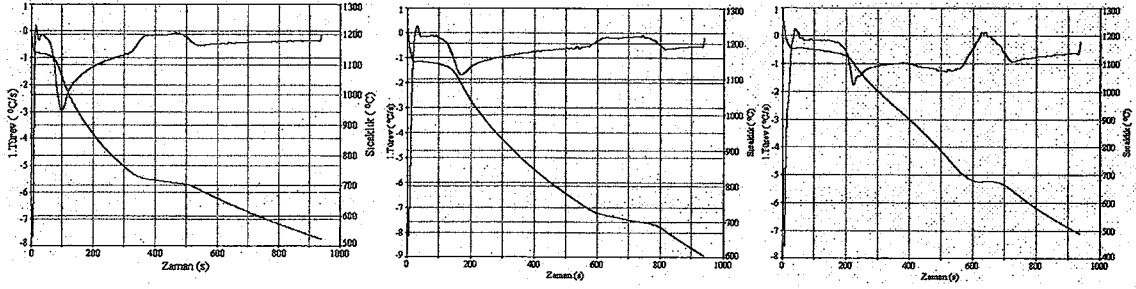
Şekil 6.19 19, 20 ve 21 nolu numunelerin soğuma eğrileri ve 1.türev eğrileri.



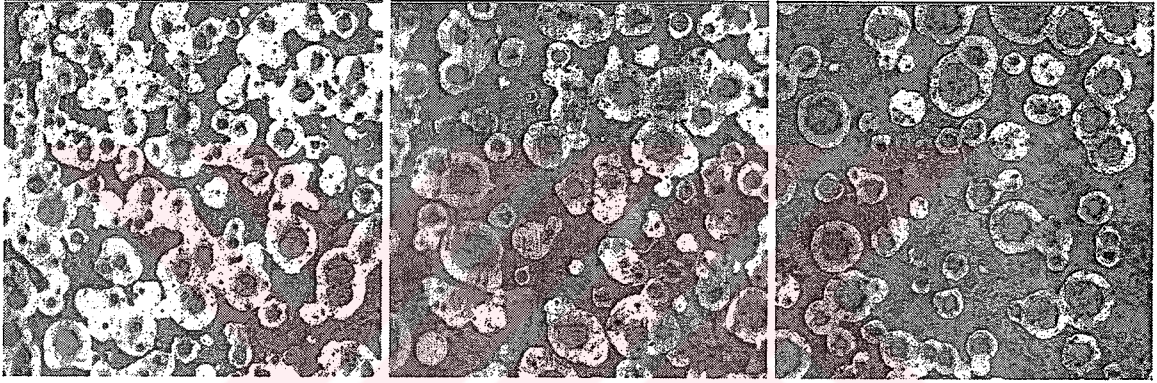
Şekil 6.20 19, 20 ve 21 nolu numunelerin mikroyapısı(100x).



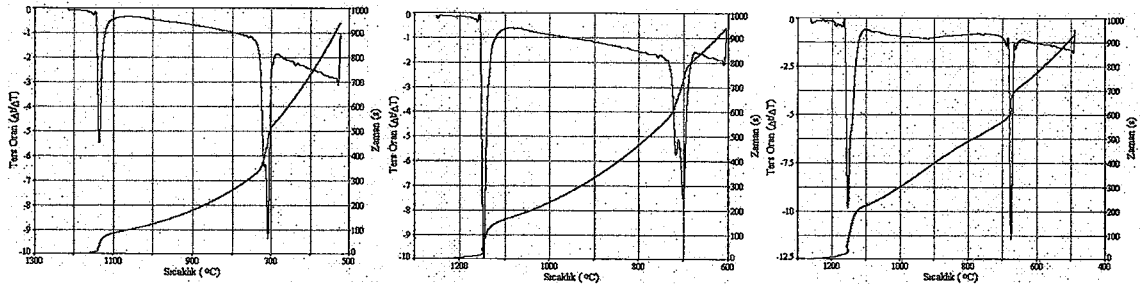
Şekil 6.21 19, 20 ve 21 nolu numunelerin soğuma eğrileri ve ters oran eğrileri.



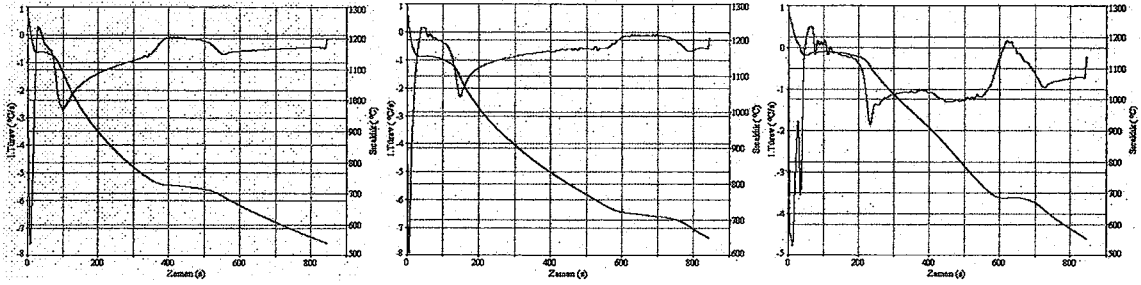
Şekil 6.22 22, 23 ve 24 nolu numunelerin soğuma eğrileri ve 1.türev eğrileri.



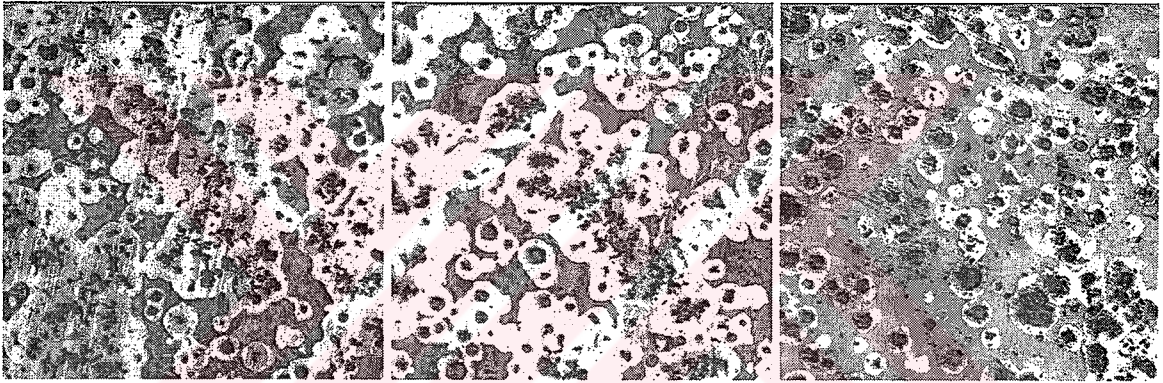
Şekil 6.23 22, 23 ve 24 nolu numunelerin mikroyapısı(100x).



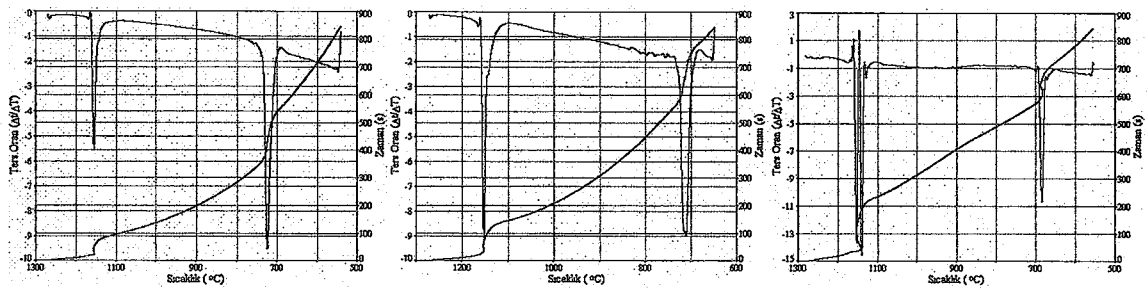
Şekil 6.24 22, 23 ve 24 nolu numunelerin soğuma eğrileri ve ters oran eğrileri.



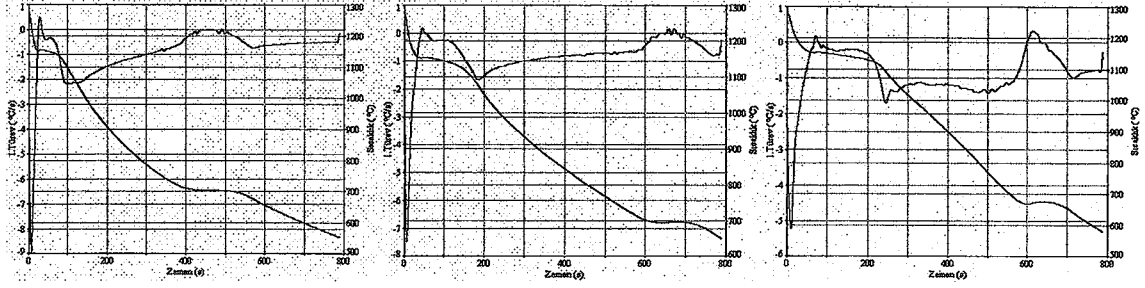
Şekil 6.25 25, 26 ve 27 nolu numunelerin soğuma eğrileri ve 1.türev eğrileri.



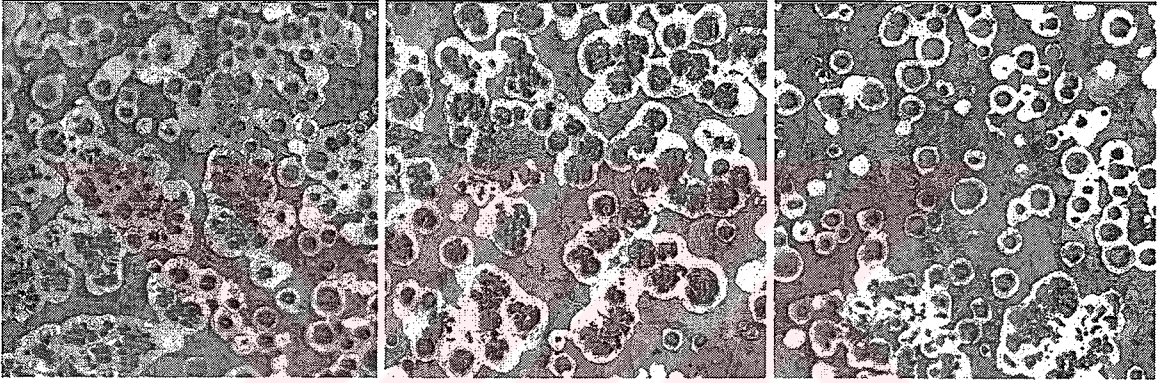
Şekil 6.26 25, 26 ve 27 nolu numunelerin mikroyapısı(100x).



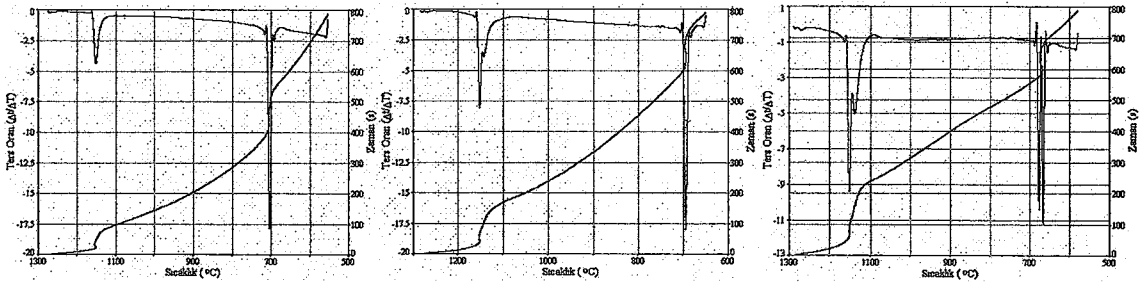
Şekil 6.27 25, 26 ve 27 nolu numunelerin soğuma eğrileri ve ters oran eğrileri.



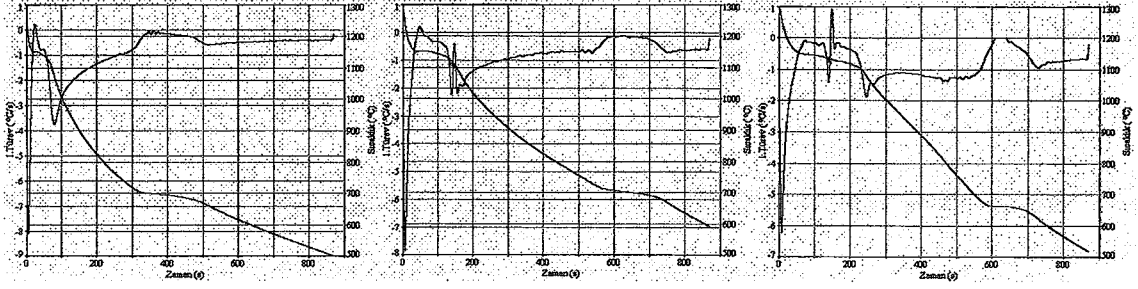
Şekil 6.28 28, 29 ve 30 nolu numunelerin soğuma eğrileri ve 1.türev eğrileri.



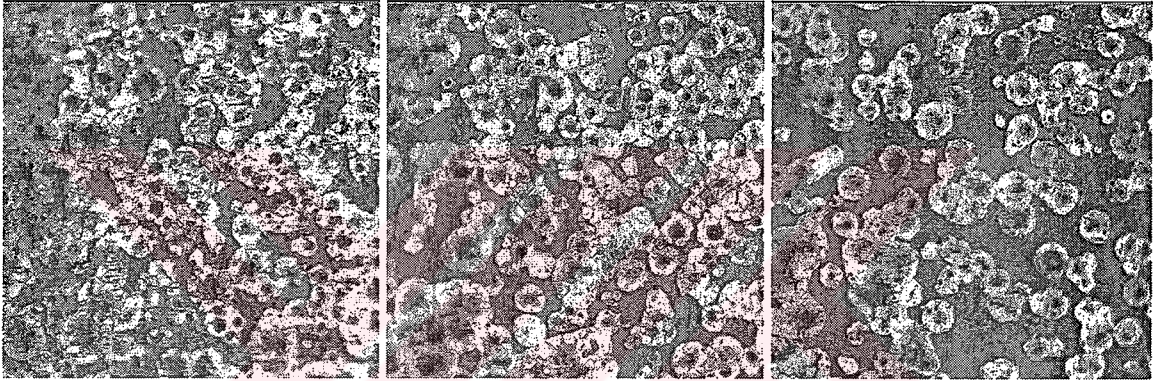
Şekil 6.29 28, 29 ve 30 nolu numunelerin mikroyapısı(100x).



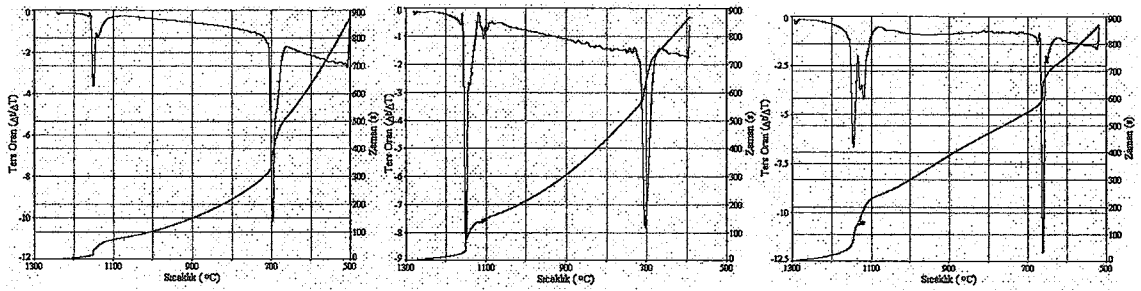
Şekil 6.30 28, 29 ve 30 nolu numunelerin soğuma eğrileri ve ters oran eğrileri.



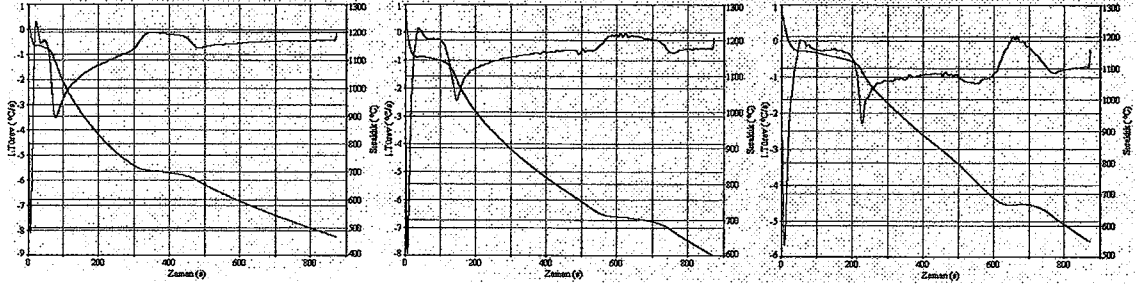
Şekil 6.31 31, 32 ve 33 nolu numunelerin soğuma eğrileri ve 1.türev eğrileri.



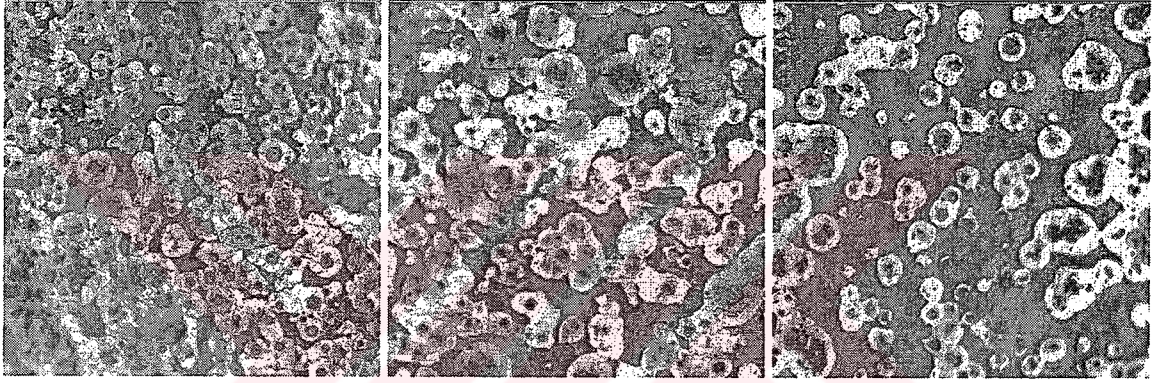
Şekil 6.32 31, 32 ve 33 nolu numunelerin mikroyapısı(100x).



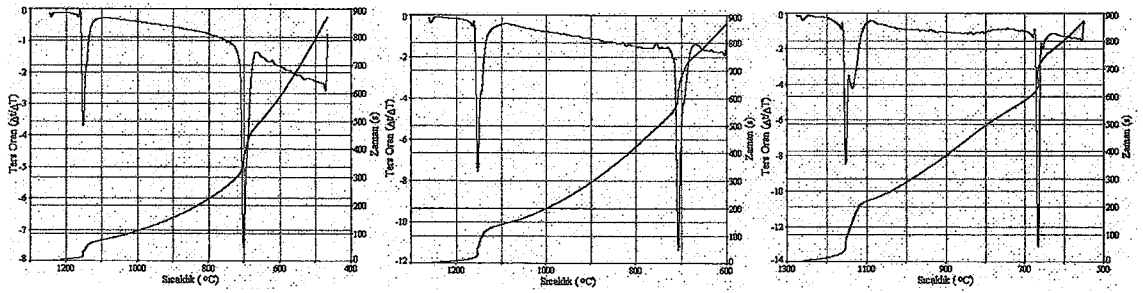
Şekil 6.33 31, 32 ve 33 nolu numunelerin soğuma eğrileri ve ters oran eğrileri.



Şekil 6.34 34, 35 ve 36 nolu numunelerin soğuma eğrileri ve 1.türev eğrileri.



Şekil 6.35 34, 35 ve 36 nolu numunelerin mikroyapısı(100x).



Şekil 6.36 34, 35 ve 36 nolu numunelerin soğuma eğrileri ve ters oran eğrileri.

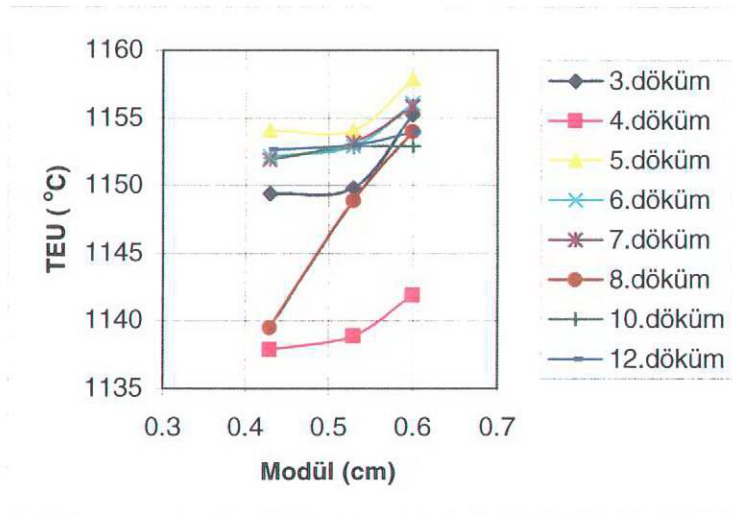
Çizelge 6.1 Soğuma eğrileri ve 1.türevlerinden elde edilen ısı analiz parametreleri.

Numune No	Tmaks (°C)	TEU (°C)	maksdt/dTR (°C/s)	TER (°C)	Parlama (°C)	TES (°C)	dt/dTTES (°C/s)
1	1267	1074.9	0.312	1079.78	4.88	987.9	-1.75
2	1287	1149.43	0.325	1151.89	2.46	1097.62	-1.95
3	1302	1153.85	0.176	1155.01	1.163	1097.35	-1.917
4	1267	1121.67				1052.06	-3.23
5	1277	1144.83	0.2	1146.15	1.32	1087.39	-1.83
6	1294	1149.94	0.07	1150.41	0.47	1102.78	-2.07
7	1302	1149.4	0.037	1149.6	0.2	1061.02	-2.743
8	1310	1149.84	0.152	1150.96	1.12	1096.49	-1.87
9	1308	1155.22	0.128	1155.98	0.76	1108.18	-1.85
10	1307	1137.89	0.483	1144.11	6.22	1052.27	-2.384
11	1320	1138.87	0.227	1143.06	4.19	1075.01	-1.66
12	1308	1141.89	0.296	1149.03	7.14	1093.64	-1.98
13	1278	1154.06	0.235	1155.15	1.09	1081.2	-2.85
14	1286	1154.07	0.28	1157.1	3.03	1098.78	-1.803
15	1288	1157.87	0.158	1160.06	2.19	1099.95	-1.884
16	1287	1152.13	0.279	1154.03	1.9	1083.34	-3.65
17	1278	1152.92	0.174	1155.1	2.18	1095.81	-2.28
18	1284	1156.09	0.159	1157.06	0.97	1103.79	-2.055
19	1288	1151.92	0.235	1153.19	1.27	1080.95	-3.04
20	1290	1153.197	0.29	1156.07	2.873	1100.45	-1.91
21	1294	1155.85	0.155	1159.11	3.26	1111.54	-1.93
22	1203	1139.5	0.20	1139.94	0.44	1061.69	-2.937
23	1248	1148.89	0.27	1151.10	2.21	1088.71	-1.68
24	1260	1153.99	0.23	1156.65	2.66	1101.32	-1.755
25	1268.8	1154.77	0.279	1157.1	2.33	1090.5	-2.71
26	1273	1153.94	0.164	1156.11	2.17	1096.36	-2.30
27	1279	1142.19	0.50	1154.11	11.92	1106.15	-1.862
28	1273	1151.99	0.519	1155.16	3.17	1103.81	-2.17
29	1282	1152.87	0.183	1154.05	1.18	1079.63	-1.674
30	1288	1152.91	0.182	1154.05	1.14	1092.25	-1.695
31	1238	1150.97	0.245	1152.14	1.17	1073.40	-3.746
32	1279	1151.13	0.217	1153.09	1.96	1094.73	-2.165
33	1296	1148.02	-0.07	-	-	1078.08	-1.87
34	1243	1152.66	0.316	1154.15	1.49	1089.41	-3.506
35	1260.8	1152.99	0.158	1154.42	1.43	1089.69	-2.432
36	1272	1153.94	0.019	1154.06	0.12	1088.09	-2.28

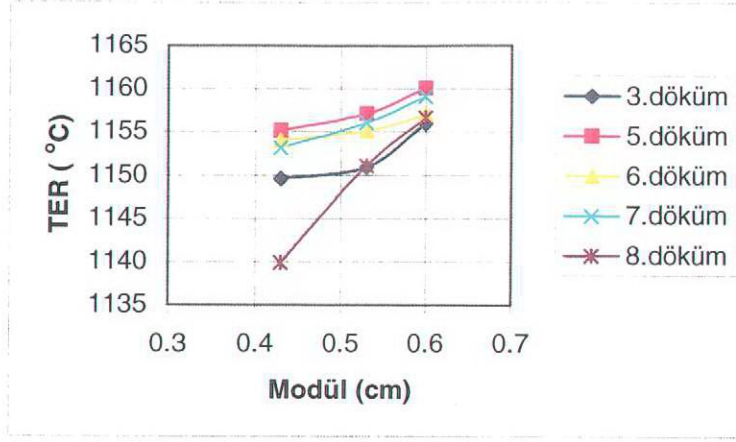
6.1 Isıl Analiz

6.1.1 Ötektik Bölgesi

Bütün dökümlerden elde edilen karakteristik katılma sıcaklıkları Çizelge 6.1’de verilmiştir. Bu sıcaklıklar incelendiğinde azalan modül ile bunların azaldığı ve artan modül ile arttığı tespit edilmiştir(Şekil 6.37 ve 6.38). Aynı şekilde katılma zamanlarında artan modülleri ile artmış ve azalan modül ile azalmıştır. Bu değişimler proses değişkenlerinden ve kimyasal bileşim değişikliğinden dolayı farklı değerlerde olmuştur. 1.dökümde 1 nolu numunenin soğuma eğrisinde karakteristik sıcaklık değerleri normalden düşük olduğu için, 2.dökümde Cr içeriğinin fazla olmasından dolayı karakteristik sıcaklıklar daha düşük çıktığı için, 9.ve 11. dökümün karakteristik sıcaklık değerlerindeki değişim modüle uymadığı için Şekil 6.37 ve 6.38’de gösterilmemiştir. TEU ve TER’in değişiminin modüle uygun olması dökümün hatasız olabileceğinin, uygun olmaması ise dökümde muhtemel bir hatanın varlığını veya seçilen bileşimin modüle uygun olmayacağını göstergesi olarak alınabilir. 9. ve 11.dökümden elde edilen numunelerin mikro yapılarında chunk grafiti oluşumu gözlenmiştir. 10.dökümde bazı bölgelerde küre patlaması vardır. Yüksek karbon eşdeğerli dökümlerde kısmen grafit yüzmesi de söz konusudur. Bunlar gibi benzer hatalar uyumsuzluğun sebepleri olabilir. Bu üç farklı modüllü sistemimizle üç modül için soğuma eğrilerinde karakteristik sıcaklıkları hemen elde ederek dökümün uygun olup olmayacağına karar verebileceğimizi gösterir. Burada proses değişkenlerinin öncelikle iyi kontrol edilmesi gerekmektedir. Prosesteki herhangi bir değişiklikten dolayı soğuma eğrisinin karakteristik değerlerinin değişebileceği de unutulmamalıdır.



Şekil 6.37 Farklı dökümlerde modüle göre TEU'nun değişimini gösterir.



Şekil 6.38 Farklı dökümlerde modüle göre TER'in değişimini gösterir.

6.1.2 Ötektoid Bölgesi

Bütün dökümlerden elde edilen karakteristik ötektoid dönüşüm sıcaklıkları Çizelge 6.2'de ters oran eğrilerinden elde edilerek verilmiştir. Ötektoid dönüşüm bölgesi bazı dökümlerde tek pik gösterirken bazılarında çift pik göstermiştir. Çift pikten birinci pik ferrit oluşumunu ikinci pik perlit oluşumunu gösterir. Tek pik durumunda ferrit ve ferrit aynı zamanda oluşur ya da tamamen sadece perlit oluşumunu ifade eder. Ferritik dönüşüm daha yüksek bir sıcaklıkta başlar ve sıcaklığın geniş bir alanında ilerler fakat perlit reaksiyonu daha düşük bir sıcaklıkta başlayıp sıcaklığın kısa bir alanı üzerinde tamamlanır (Vijayaraghanan, 1996).

Bu dönüşüm sıcaklıkları bileşim, küre sayısı, soğuma hızı yani modül etkisi ile değişmektedir. Daha önceki çalışmalarda 750 ve 722 °C arasındaki sıcaklıklarda ferrit ve grafitin birlikte büyüdüğü, 722 °C altında ferritin perlitle birlikte büyüdüğü belirtilmiştir. Ancak soğuma hızının ve perlit teşvik eden elementlerin dönüşüm sıcaklıklarını daha düşük değerlere çektiği ifade edilmiştir (Guo ve Stefanescu, 1997). Ötektoid bölgeden bizim elde ettiğimiz sonuçlarda ise küre sayısının fazla olması ferritik yapıyı teşvik ettiğinden küçük modüllü olan kabın dönüşüm sıcaklıkları daha yüksek olmuştur. Büyük modülün küsü daha düşük olmuştur. Örneğin 9.dökümdeki gibi. Bunun yanında elde edilen değerler modül, bileşim ve proses şartlarına bağlı olarak farklı değerlerde göstermiştir. Özellikle büyük modüllü kabın yani standart kabın belli bir sıcaklıktan sonra kısmen bozulmasından dolayı değerler değişmiştir. Yapılar çoğunlukla perlitik yapılar olmuştur. Bundan dolayı ötektoid bölgede modülün etkisi tam sağlıklı ifade edilememektedir. Ötektoid dönüşüm bölgesinin mikroyapıyla tam ilişkisini çıkarmak için kalıbın erkenden bozulmamış olması gerekir. Çünkü kalıp bozma sıcaklığı 815°C üzerinde olduğunda perlit teşvik edildiği ve 705°C altında ise ferrit teşvik edildiği

belirtilmiştir (RTZ Iron, 1998). Dolayısıyla orta ve küçük kapların kullanılması gerekir. Mikroyapıda ferrit ve perlit oranı bileşim, küre sayısı ve alaşımın soğuma hızının bir karışık bir fonksiyonu olduğundan ötektoid bölgesinde farklılıklar elde edilmiştir.

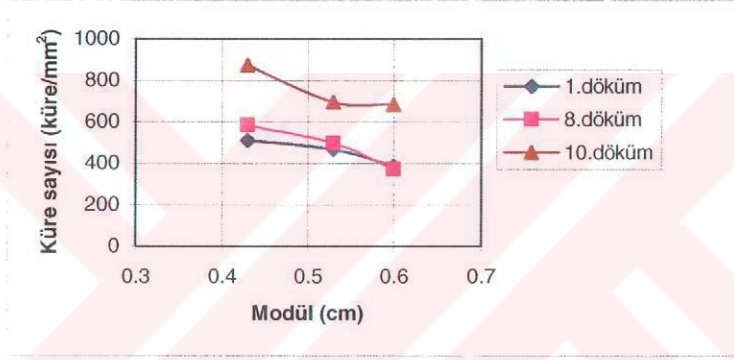
Çizelge 6.2 Ters oran eğrilerinden elde edilen dönüşüm sıcaklıkları.

Numune No	Ötektik Bölgesindeki Pikler			Ötektoid Bölgedeki Pikler	
	Ötektik Sıcaklığı (°C)	Pik2 (°C)	Pik3 (°C)	Pik4 (°C)	Ötektoid Sıcaklığı (°C)
1	1126.3	1081	1072.4	724.07	695.54
2	1144.8			737.12	717.58
3	1153.4	1141.7		708.74	696.48
4	1141.5	1123.9			692.33
5	1144.8	1133.2			714.16
6	1149	1138.2			711.07
7	1140.3				685.27
8	1148.2	1140.6			705.1
9	1150.9				697.87
10	1144.2	1136.6		697.18	683.75
11	1138.3				687.19
12	1148.9	1140.5			680.99
13	1151.8				710.36
14	1153.6				698.41
15	1157.8	1145.9			683.08
16	1151.9				703.91
17	1153.1				705.88
18	1155.9	1146.3			685.8
19	1150.6				706.57
20	1153.1				710.92
21	1155.2				707.15
22	1136.5			718.59	709.17
23	1147.6			717.5	700.69
24	1153.5				675.83
25	1155.2				724.87
26	1154.5				711.3
27	1153.6	1140.6			685.15
28	1151.2				704.61
29	1152.9	1143.2			694.73
30	1152.9	1139.2		677.15	666.75
31	1150.9	1138.3			697.87
32	1151.4	1140.7	1105.5		703.54
33	1145.5	1119.4			661.47
34	1152.5				702.53
35	1153.2				707.53
36	1152.9	1136.6			666.66

6.2 Mikroyapı Analizi

6.2.1 Grafit Karakterizasyonu

Bütün döküm numunelerinde elde edilmiş küreselleşme oranı yüzdesi, küre sayısı, grafit yüzdesi ve ortalama grafit çapı Çizelge 6.3 ve 6.4'te verilmiştir. Küre sayısı, ortalama grafit çapı, küreselleşme oranı(%) ve grafit(%)'in modüle göre değişimleri incelenmiştir. Üç döküm sonuçlarına göre çizdirilmiş grafikler sırasıyla Şekil 6.39, 6.40, 6.41 ve 6.42'de verilir. Bu grafiklerden genel çıkarımlar yapılabilir. Ancak diğer dökümlerde bu değişimlere uymayan değerlerde bulunmaktadır. Grafikler incelendiğinde şu çıkarımlar yapılmaktadır. Modül küçüldükçe küre sayısı artmıştır. Modül küçüldükçe ortalama grafit çapı azalmıştır. Bu sonuç küre sayısının artması ile uyumludur. Modül küçüldükçe küreselleşme oranı artmıştır. Diğer sonuçta modül küçüldükçe grafit yüzdesinin azaldığını göstermiştir.

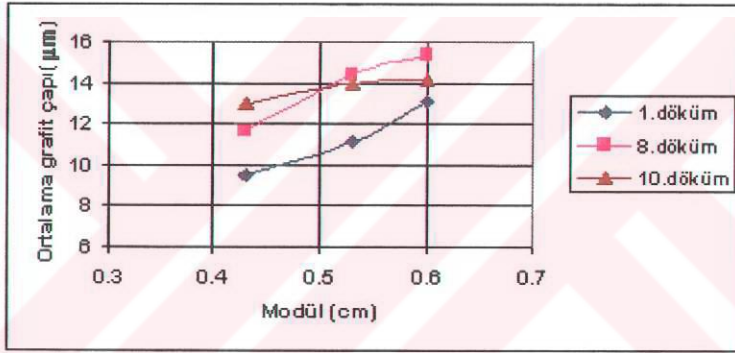


Şekil 6.39 Üç dökümde modül ile küre sayısı arasındaki ilişki.

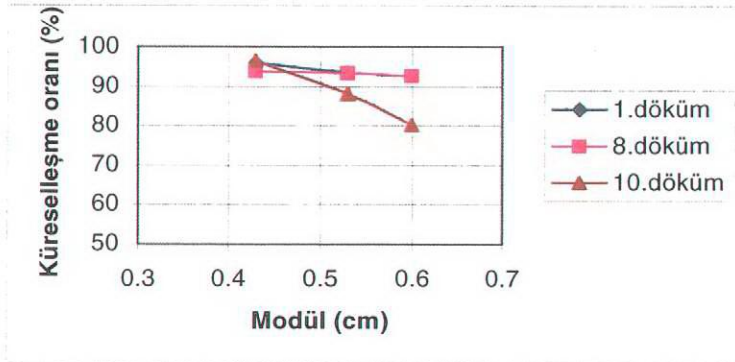
Küresel grafitli dökme demirin küre sayısı istenilen mekanik özellikleri başarmak için önemli faktörlerden biridir. Katılaşma esnasında soğuma hızı küresel grafit küre sayısında önemli bir etkiye sahiptir. Genel olarak konuşulursa daha hızlı soğuma hızı daha yüksek küre sayısı içinde sonuçlanır. Bu etki çekirdeklenme ve büyüme teorilerine uygundur. Bu teoriler katılaşmanın hızı arttığında büyüyecek kararlı çekirdeklerin ölçüsünün azalacağını önerir. Diğer ifadelerle daha ince kesitler daha yüksek küre sayısına sahip olacaktır (Guo vd, 1997). Bu veriler bizim modüle göre bulduğumuz değişim ile uyusmaktadır.

Küre sayısı kesit ölçüsü ve aşılama verimliliğinin güçlü bir fonksiyonudur. Ayrıca küresel grafitli dökme demirin son katılmış mikroyapısı alaşım elementlerinin ayrışması özelliğinden dolayı farklı küre sayılarına sebep olabilmektedir. Diğer dökümlerdeki uyumsuzlukların sebebi modül, bileşim ve proses değişkenlerindeki uyumsuzluklar ve değişimler olabilir. Uyumsuz sonuçlar hatalı bir yapı olduğunu da gösterebilir. Örneğin 9.ve

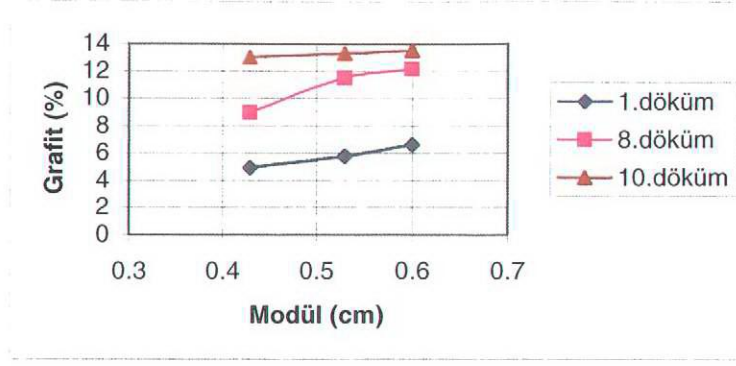
11.dökümde chunk grafiti oluşması grafit karakteristiklerini tamamen değiştirmiştir. Yine 10. dökümde kısmen patlamış grafit ve grafit yüzmesi meydana gelmesi grafit karakteristiklerinde bozulmaya sebeptir. Ancak genel değişimde az etki göstermiştir. Ötektik üstü karbon eşdeğerine sahip olan bileşimlerde bu tip hatalar olasıdır. Bunlar dikkate alınarak uygun bileşimler seçilmelidir. Şarjın durumu yani temiz ya da paslı olması, saflığı yani katışkı elementlerin varlığı ve küreleştiricilerdeki toprak nadir elementlerin miktarları katılma yapısını etkileyen faktörlerdir. Bunların uyumsuzluğu dengesiz yapıların ortaya çıkmasına sebep olmaktadır. Bununla birlikte soğuma eğrilerinden ve karakteristik ısı analiz parametrelerinden uyumsuz değerlerin ve görüntülerin çıkmasıyla hatalı yapılar içerdiği dökümden önce fark edilebilmektedir. Üç farklı modül olması modüle göre değişebilecek karakteristiklerinde önceden tespit edilmesini kolaylaştırmıştır. İlişkilerin daha iyi çıkarılması için daha çok sayıda deney yapılması tavsiye edilir. Çünkü bu dökümler proses ve metalurjik olarak çok hassastırlar.



Şekil 6.40 Üç dökümde modül ile ortalama grafit çapı arasındaki ilişki.



Şekil 6.41 Üç dökümde modül ile küreselleşme oranı arasındaki ilişki.



Şekil 6.42 Üç dökümde modül ile grafit yüzdesi arasındaki ilişki.

Çizelge 6.3 Görüntü analizi ile mikroyapılardan elde edilen faz yüzdeleri ve grafit özellikleri

Numune No	Ferrit (%)	Grafit (%)	Perlit (%)	Küre sayısı (Küre/mm ²)	Küreselleşme oranı (%)	Ortalama grafit çapı (µm)
1	66.934	4.92	28.146	511	96.00	9.49
2	48.53	5.76	45.71	468	93.55	11.11
3	36.153	6.63	57.217	388	92.62	13.09
7	48.051	7.42	44.529	344	90.14	13.95
8	36.376	12.03	51.594	426	92.09	16.53
9	33.257	6.51	60.233	459	89.65	11.42
10	47.582	4.08	48.338	547	98.42	8.90
11	46.782	5.81	47.408	559	96.70	10.16
12	33.427	3.8	62.773	350	84.49	10.01
13	44.23	9.77	46	578	93.53	13.37
14	60.087	4.53	35.383	526	93.70	9.20
15	36.017	5.55	58.433	440	93.55	10.46
16	49.533	4.26	46.207	535	82.95	8.75
17	52.935	2.43	44.635	476	97.42	7.33
18	34.669	5.52	59.811	559	96.95	9.69
19	45.713	3.45	50.837	480	89.13	8.17
20	40.094	2.28	57.626	521	88.95	6.86
21	35.155	4.21	60.635	409	81.10	10.04
22	52	8.99	39.01	585	93.81	11.65
23	45.478	11.51	43.012	500	93.41	14.43
24	31.497	12.15	56.353	373	92.62	15.39
25	61.597	8.16	30.243	1035	83.71	8.88
26	64.844	4.44	30.716	729	93.11	8.06
27	44.572	10.89	44.538	710	90.10	12.54
28	46.943	12.99	40.067	874	96.43	12.98
29	44.75	13.31	41.94	696	88.06	14.03
30	32.22	13.54	54.24	682	80.22	14.21
31	50.774	3.09	46.136	623	92.33	7.30
32	53.441	4.48	42.079	701	92.73	8.18
33	35.09	3.14	61.77	556	93.27	7.51
34	50.204	5.05	44.746	815	91.65	7.92
35	47.169	3.68	49.151	490	88.23	8.00
36	43.238	5.12	51.642	616	87.31	9.13

Çizelge 6.4 Görüntü analizi ile yüksek Cr'lu dökümün mikroyapılarından elde edilen faz yüzdeleri ve grafit özellikleri.

Numune No	Sementit (%)	Grafit (%)	Perlit (%)	Küre sayısı (Küre/mm ²)	Küreselleşme oranı (%)	Ortalama grafit çapı (µm)
4	23.383	6.31	70.307	274	89.96	13.14
5	18.307	5.03	76.663	239	87.98	14.03
6	16.455	5.3	78.245	243	80.42	13.54

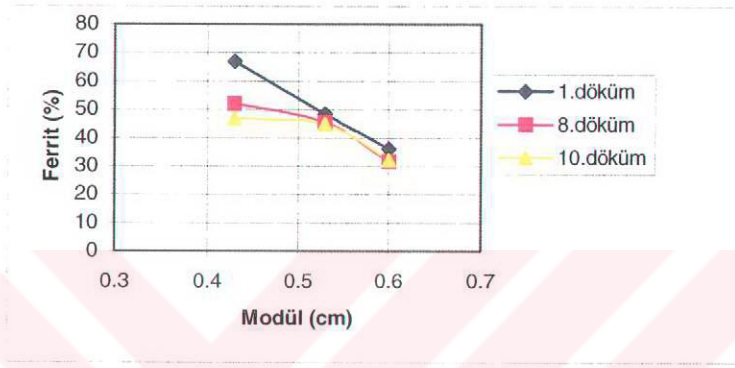
6.2.2 Ferrit ve Perlit Yüzdesi

Bütün dökümlerin ferrit ve perlit yüzdeleri görüntü analizi ile belirlenmiştir. Bu değerler Çizelge 6.3 ve 6.4'te verilir. Bunlardan üç döküm için modül ile ferrit yüzdesinin ve perlit yüzdesinin ilişkisi Şekil 6.43 ve 6.44'te verilir. Modül küçüldükçe ferrit yüzdesi artmış modül arttıkça perlit yüzdesi artmıştır. Bu genellemeye uymayan verilerde vardır. Küçük modülde küre sayısının arttığını bir önceki bölümde görmüştük. Küre sayısı mikroyapı üstündeki etkisiyle mekanik özellikleri etkiler. Genelde küre sayısı arttığında matristen kürelere hareket eden karbonun difüzyon mesafesi azalır. Ötektoid reaksiyon esnasında, bu daha yüksek bir ferrit oranını teşvik eder. Bundan dolayı, yüksek ferrit içeriğine ihtiyaç duyulduğu zaman daha yüksek küre sayısı istenir (Guo vd., 1997).

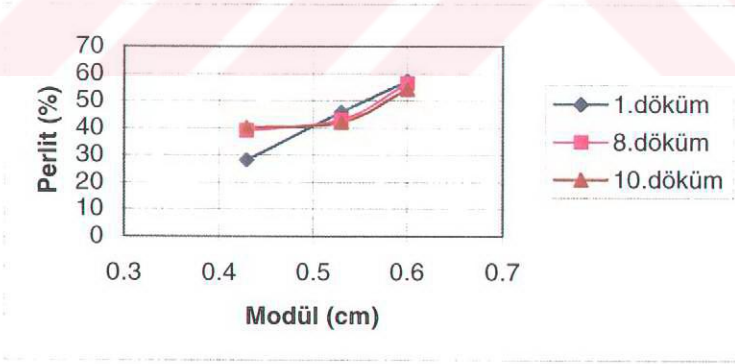
Başka bir görüşte ise ferritin fazla olması verilen aşırı soğumada rakip fazların büyüme hızı farkı ile izah edilebilir. Verilen bir aşırı soğumada östenit fazı fleyk veya küresel grafitten hızlı büyür. Bunun sonucunda hale oluşur ve büyür (Atasoy vd., 1984, Yılmaz ve Elliot, 1983, Nave vd., 2002, Yılmaz, 2003).

Ötektoid periyot esnasında daha küçük modüllü numunenin soğuma hızı, orta ve büyük modüllü numunelerden daha yüksek olmalıdır. Bu durumda dönüşüm kinetiğine göre perlitin çekirdeklenmesi ve büyümesi daha kolay olmalıdır. Bununla birlikte, deneysel sonuçlar daha küçük modüllü numunenin diğerlerinden daha az perlit yüzdesi gösterir. O 1, 22 ve 28 No'lu numunelerin daha fazla küre sayısından dolayı küreler arası mesafe daha kısadır ve böylece ferritin büyümesi daha hızlı olacağından perlitin daha az miktarı içinde sonuçlanır. Ancak bizim sistemimizde büyük modüllü kap ötektoid dönüşümden önce kısmen bozunduğundan bu modülün soğuma hızı en yüksek olmuştur. Dolayısıyla büyük modüllü numunelerde (3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24, 27, 30, 33 ve 36 numaralı), diğer modüllerden daha fazla perlit yüzdesi oluştu. Burada küre sayısı ve bileşim etkisi kalıp bozulma etkisinin arkasında kaldı. Bu da kalıp bozmanın matris yapısını belirlemede birinci rolü üstlendiğini göstermektedir. İkinci

olarak ise 2.dökümde yüksek Cr içeriğinden dolayı 4, 5 ve 6 numune yapılarında ferrit oluşmamış ötektik sementit oluşmuştur. Bununla birlikte perlit yüzdesi artmış küre sayıları diğer numunelere göre azalmıştır. Modülün etkisi bu döküm için incelendiğinde küçük modüllü kap en çok sementit ve en az perlit , büyük modüllü kap en az sementit ve en fazla perlit göstermiştir. Cr miktarı 0.05 üzerinde olduğu zaman karbür teşvik ettiği literatürde verilmiştir. Böylece daha fazla Cr içeriğinin mikroyapıdaki ve soğuma eğrilerindeki etkisi modüle bağlı olarak çıkarılmıştır. 3.döküm ile bileşim açısından sadece Cr farklılığı vardır. Fazla Cr'un ötektoid dönüşüm sıcaklıklarını artırdığı da verilerden tespit edilmiştir. Bu dökümler bileşimin önemini göstermiştir.



Şekil 6.43 Üç dökümde modül ile ferrit yüzdesi arasındaki ilişki.



Şekil 6.44 Üç dökümde modül ile perlit yüzdesi arasındaki ilişki.

Diğer taraftan, 6.ve 7. dökümlerdeki gibi bazı durumlarda ötektoid dönüşümün aşırı soğuması perlitin yüzdesinde ana etkiye sahip olur (Liu vd., 1999). Daha küçük modülün(no 13 ve 16) küre sayısı orta ve büyük modüllerden daha fazladır. Ancak 13 ve 16 no'lu numunenin perlit yüzdesi 14 ve 17 no'lu numuneden daha fazladır. Sebep ötektoid dönüşüm esnasında 13 ve 16 no'lu numunenin soğuma hızınının 14 ve 17 no'ludan büyük olmasıdır ve böylece perlit

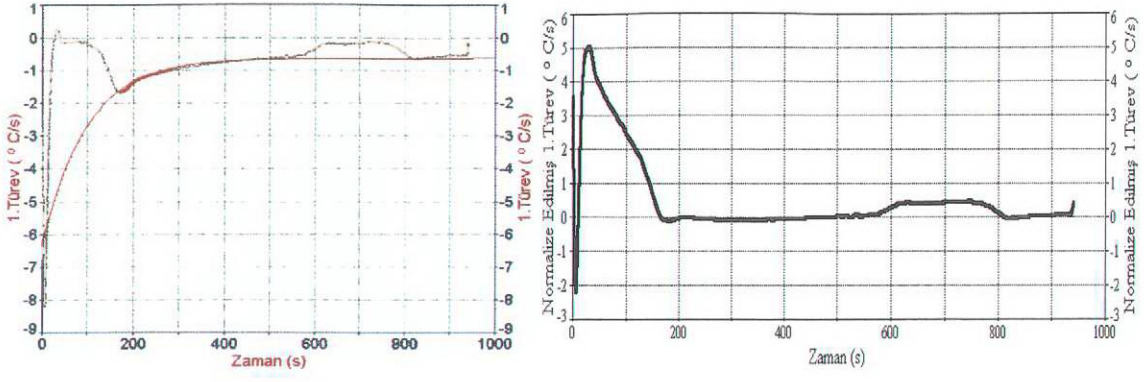
büyüme hızı dahi büyük olacaktır. Bununla birlikte, 9. ve 11. dökümün numunelerinin sonuçları farklılıklar içerir. Ötektoid dönüşümdeki bu farklılıklar sistemin bu bölge için geliştirilmesi ve bozulmayan kalıpların seçilmesi gerektiği anlamındadır. Liu vd. (1999) mikroyapıda ferrit ve perlit oranının sadece ötektoid dönüşümün aşırı soğuması ile değil ötektik dönüşümün küre sayısı ve alaşımın bileşimi tarafından da yönetilen karışık bir dönüşüm olduğunu belirtmiştir. Elde edilen sonuçlar bunu doğrulamakla birlikte ayrıca modül ve kalıbın da dikkate alınması gerekliliğini göstermiştir.



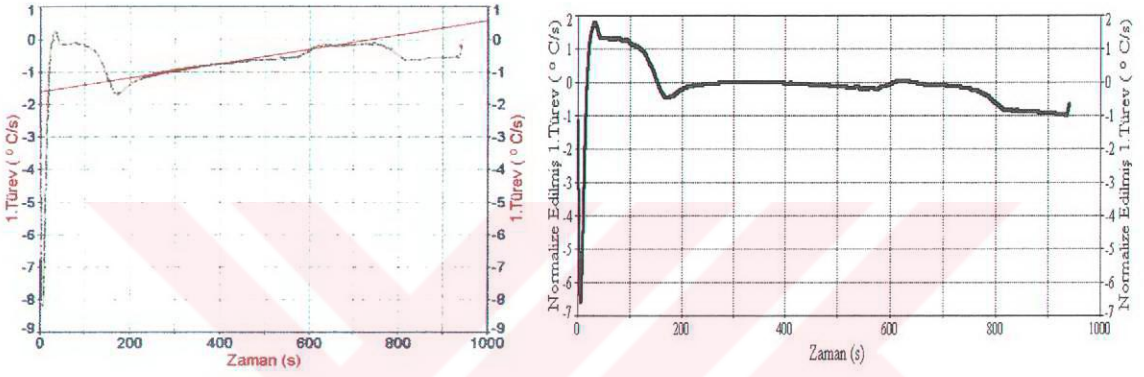
6.3 Gizli Isı

Gizli ısı hesaplaması için sıfır eğrisi yeni bir yöntemle belirlenmiştir. Bu yeni yöntemle elde edilen katılma gizli ısıları ve ötektoid dönüşüm gizli ısıları verileri Çizelge 6.5'te verilir. Bu hesaplamalarda özgül ısı olarak $0,194 \text{ cal/g.}^{\circ}\text{C}$ kullanılmıştır.

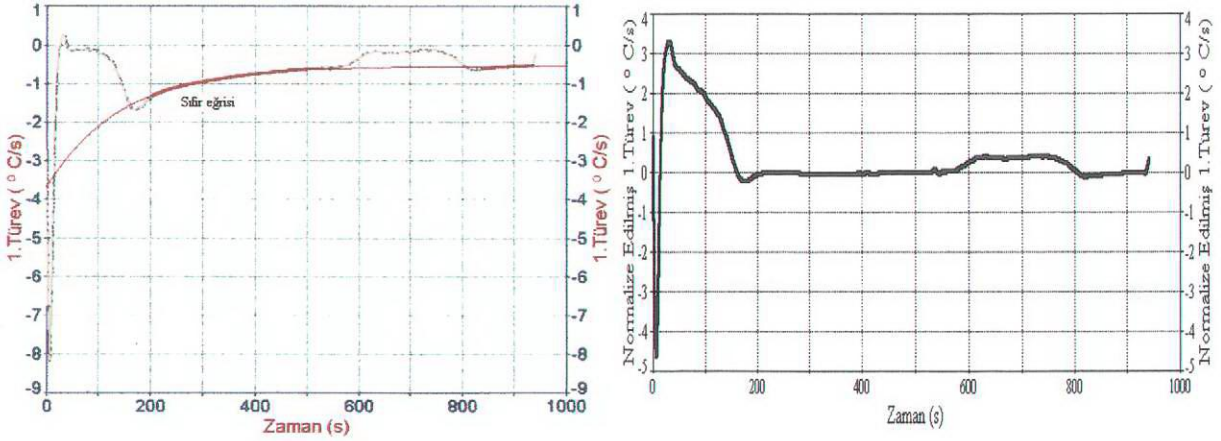
Küresel grafitli dökme demirlerin bütün feritik ve perlitik dereceleri için ergime ısısı yaklaşık $210\text{-}230 \text{ kJ/kg}$ dır(ASM Handbook, 1992). Gri ve küresel grafitli dökme demirde ergime gizli ısısı 50 cal/g ve özgül ısı $0,2 \text{ cal/g.}^{\circ}\text{C}$ olarak kullanılmıştır (Karsay, 1981). Ekpoom ve Heine (1981) %1.36 Si'da karbür ve grafit ötektik için katılma ısılarını sırasıyla 49 cal/g ve 56 cal/g , ötektoid dönüşümün ısısını ise $18,4 \text{ cal/g}$ olarak ölçmüştür. Chen ve Stefanescu (1984) bilgisayar destekli diferansiyel analizden ötektik altı küresel grafitli dökme demirin gizli ısısını 339 kJ/kg ve ötektik üstü küresel grafitli dökme demir için 427 kJ/kg olarak hesaplamıştır. Upadhy vd (1989) bilgisayar destekli soğuma analizi ile küresel grafitli dökme demirde gizli ısıyı 258 kJ/kg olarak hesaplamıştır ve literatürdeki gizli ısınında 263 kJ/kg olduğunu belirtmiştir. Wang (2001) küresel grafitli dökme demirin gizli ısısını 220 J/g olarak hesaplamıştır. Fung vd. (1990) literatürden küresel grafitli dökme demirlerin çekme yapmaması için toplam ısının 250 J/g 'dan fazla olması gerektiğini belirtmiştir. Malheiros ve Riberio (1999) gizli ısı hesaplamasında Chen ve Stefanescu'dan (1984) farklı bir teknik kullanarak daha düşük değerlerde gizli ısıları hesaplamışlar ve bu hesapladıklarının daha uygun olduğunu savunmuşlardır. Bu yöntemlerin uygulaması Şekil 6.45 ve 6.46'da verilir. AFS 3D katılma simülasyon programının veri tabanında feritik ve perlitik küresel grafitli dökme demir için gizli ısı $230,116 \text{ kJ/kg}$ olarak verilmiştir. Lacaze ve Gerval (1998) küresel grafitli dökme demirlerde ötektoid reaksiyonun modellenmesinde kararlı ve yarı kararlı ötektoid dönüşüm ısısı olarak 58 kJ/kg olarak kullanmıştır. Vijayaraghavan ve Bradley (1999) normal döküm küresel grafitli dökme demirde ötektoid faz dönüşümlerinin mikro modellenmesinde perlit için gizli ısı 13 cal/g ve ferrit için 8 cal/g ve $c_v=0,17 \text{ cal/g.}^{\circ}\text{C}$ olarak kullanmışlardır. Katılma ısısı ve ötektoid dönüşüm ısılarının farklı yayınlarda bu şekilde birbirlerinden farklı olmasından hareketle yeni bir yöntem geliştirildi. Yeni yöntemde soğuma eğrilerinin birinci türevinde ötektik sonrası ve ötektoid öncesi bölgesinde ve ötektoid sonrasındaki bölgede noktalar özel bir program vasıtasıyla belirlenerek sıfır eğrisi üstel olarak belirlenmektedir. Seçilen noktalarda çok yüksek ilişki katsayısı olması yeterli olmaktadır. Bu yeni yöntemin uygulanışı Şekil 6.47' de gösterilmiştir.



Şekil 6.45 Chen ve Stefanescu'nun (1984) yöntemiyle orta modüllü kabin birinci türevi üzerinden sıfır eğrisinin belirlenmesi.



Şekil 6.46 Malherios ve Riberio'nun (1999) yöntemiyle sıfır eğrisinin orta modüllü kabin birinci türevi üzerinden belirlenmesi.



Şekil 6.47 Yeni yöntemle orta modüllü kaptaki birinci türevden sıfır eğrisinin belirlenmesi.

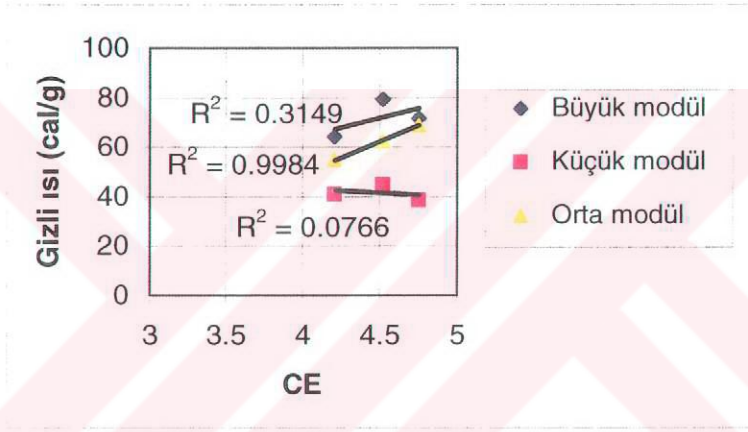
Çizelge 6.5 Bilgisayar destekli diferansiyel analizinde yeni yöntemle hesaplanan gizli ısılar.

Numune No	Alan	Katılma Gizli ısı (cal/g)	Katılma Gizli ısı (kj/kg)	Alan	Ötektoidin Gizli ısı (cal/g)	Ötektoidin Gizli ısı (kj/kg)	R ²
1	231.82	44.97308	188.2573	72.46	14.05724	58.84361	0.988
2	321.317	62.3355	260.9364	71.17	13.80698	57.79602	0.932
3	409.151	79.37529	332.265	61.162	11.86543	49.66868	0.973
4	267.56	51.90664	217.2812	54.62	10.59628	44.35603	0.992
5	321.96	62.46024	261.4586	62.17	12.06098	50.48726	0.991
6	370.33	71.84402	300.7391	61.617	11.9537	50.03818	0.957
7	316.89	61.47666	257.3413	69.999	13.57981	56.84507	0.995
8	328.88	63.80272	267.0782	72.53	14.07082	58.90045	0.987
9	387.58	75.19052	314.7475	99.025	19.21085	80.41662	0.994
10	382.75	74.2535	310.8252	70.076	13.59474	56.9076	0.995
11	402.91	78.16454	327.1968	100.37	19.47178	81.50887	0.971
12	508.667	98.6814	413.0803	73.319	14.22389	59.54119	0.978
13	262.755	50.97447	213.3791	77.48	15.03112	62.92027	0.992
14	322.868	62.63639	262.1959	87.225	16.92165	70.83403	0.993
15	355.51	68.96894	288.704	105.58	20.48252	85.73983	0.9927
16	278.99	54.12406	226.5633	75.834	14.7118	61.58358	0.994
17	336.82	65.34308	273.5261	85.33	16.55402	69.29513	0.996
18	356.06	69.07564	289.1506	96.99	18.81606	78.76403	0.962
19	285.22	55.33268	231.6226	76.25	14.7925	61.92141	0.997
20	288.553	55.97928	234.3293	68.39	13.26766	55.53842	0.9949
21	371.605	72.09137	301.7745	96.57	18.73458	78.42295	0.994
22	211.33	40.99802	171.6177	73.87	14.33078	59.98865	0.997
23	282.41	54.78754	229.3406	80.08	15.53552	65.03169	0.994
24	330.47	64.11118	268.3694	100.17	19.43298	81.34645	0.994
25	181.85	35.2789	147.6775	80.11	15.54134	65.05605	0.996
26	293.028	56.84743	237.9634	78.32	15.19408	63.60242	0.989
27	387.82	75.23708	314.9424	99.63	19.32822	80.90793	0.99
28	199.86	38.77284	162.3031	88.56	17.18064	71.91816	0.9965
29	355.046	68.87892	288.3272	87.415	16.95851	70.98832	0.983
30	369.16	71.61704	299.7889	109.67	21.27598	89.06125	0.956
31	174.36	33.82584	141.595	75.091	14.56765	60.9802	0.996
32	319.39	61.96166	259.3715	76.26	14.79444	61.92953	0.992
33	343.179	66.57673	278.6902	103.38	20.05572	83.95324	0.975
34	174.46	33.84524	141.6762	77.031	14.94401	62.55564	0.9944
35	270.619	52.50009	219.7654	75.47	14.64118	61.28798	0.9958
36	315.09	61.12746	255.8795	101.63	19.71622	82.5321	0.96

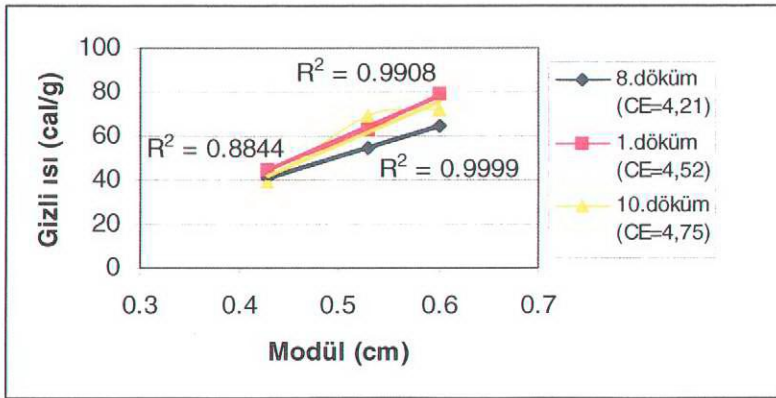
Çizelge 6.6 Gizli ısı değerlerinin karşılaştırılması (cal/g)

	Chen ve Stefanescu'nun yöntemi (1984)	Malheiros ve Riberio'un yöntemi (1999)	Yeni yöntem	Literatür (ASM Handbook, 1992)
Küresel Grafitli Dökme Demir	80.1	29.7	54.8	50-55

Yeni yöntemin diğer yöntemlerle kıyaslanmış sonuçları Çizelge 6.6'da verilir. Çizelge 6.6'dan yeni yöntemin daha doğru sonuçlar verdiği görülebilmektedir. Her döküm için hesaplanan gizli ısı değerleri incelendiğinde gizli ısı, modül ve CE ilişkisi çıkarılabilir. Üç döküm için gizli ısı, CE ve modül ilişkisi Şekil 6.48'de verilir. Bu grafikten modül ve CE arttıkça gizli ısı değerinin arttığı görülür. Gerçekte aynı bileşim için modüller farklı bile olsa gizli ısının sabit olması gerekirdi. Ancak burada modülün değişmesiyle soğuma eğrileri değiştiğinden, türev eğrileri altındaki alanlar değişir ve dolayısıyla hesaplanan gizli ısı değişir. Modüllerin gizli ısı ile ilişki katsayılarına bakıldığında orta modüllü kabın ilişki katsayısının en yüksek olduğu görülür. Bu orta modüllü kabın gizli ısı hesaplamaları için daha uygun olduğunu gösterir. Ayrıca orta modüllü ile hesaplanan gizli ısıların literatüre daha uygun olduğu görülmüştür(Çizelge 6.6). Gizli ısının CE ile artması Chen ve Stefanescu'nun (1984) bulguları ile uyuşur.



Şekil 6.48 1., 8. ve 10. döküm için yeni yöntemle hesaplanmış gizli ısı değerleri, CE ve modül ilişkisi.



Şekil 6.49 Üç dökümde gizli ısı ve modül ilişkisi.

Küresel grafitli dökme demirlerde modüle göre uygun bileşimin seçilmesi önemlidir. Literatürde kesit kalınlıklarına göre uygun bileşimleri gösteren çizelgeler mevcuttur. Ancak bunları karışık dökümlerde yani farklı modüllere sahip olan dökümlerde uygulamak zordur. Bu noktadan hareketle dökümhane ortamında bileşimin farklı modüle sahip dökümlere uygunluğunun online belirlenmesi karışık dökümlerin hatasız üretilmesini sağlayacaktır. Bizim üç farklı modüle sahip olan sistemimiz ile bu başarılabilir. Bunun göstergesi olarak üç farklı dökümün modüle göre gizli ısı hesaplamalarının yapıp aralarındaki ilişki katsayısının belirlenmesi gerekmektedir. Şekil 6.49 üç dökümün gizli ısı ve modül ilişkisini ilişki katsayıları ile birlikte gösterir. Bu ilişkiye bakıldığında modül değişiminde 8.döküm yani $CE=4,21$ olan döküm en yüksek ilişki katsayısını göstermiştir. Dolayısıyla seçilen modül sınırlarına göre ötekteğe yakın bileşimli olan bu bileşimin daha kaliteli ve hatasız döküm yapılabilmesini göstermiş olur. Diğer taraftan CE arttıkça ilişki katsayısının azalmış olması ötektik üstü bileşimler için modül farklılıklarında hataların olabileceğini gösterir. Zaten ötektik üstü bileşimlerde özellikle $CE>4,5$ 'ten büyük olan bileşimlerle yapılan dökümlerde grafit yüzmesi, grafit patlaması, chunk grafit vb. hatalar her zaman olasıdır. Bu hatalar dikkatli şarj denetimi ve özel aşılama ile önlenmektedir. İlişki düşüklüğü gösteren dökümlerin mikro yapıları incelendiğinde bu düşüklüğe uygun olarak yapıda bozulmalar ve hataların varlığı görülmüştür. Bu yeni sistem ve yeni gizli ısı hesaplama yöntemi karışık dökümlerin yani farklı modüller içeren bir dökümün hatasız yapılabilmesi için dökümden önce ısı analiz test cihazı olarak kullanılabilir hale getirilebilir. Bu, sistem ve verilerin analizini birleştiren özel bir yazılım ile gerçekleştirilebilir. Ötektoid bölgesinde hesaplanan ötektoid dönüşüm ısıları büyük modüllü kabın erken bozunmasından dolayı karşılaştırılmamıştır. Ancak büyük modüllü kabın soğuma eğrisinin türevinde ötektoid bölge için ayrı bir sıfır eğrisi oluşturularak diğer modüllerle karşılaştırılabilir. İlişkilerin sağlıklı kurulabilmesi için ötektoid dönüşüm tamamlanmadan önce bozulmayan kapların gerekliliği tespit edilmiştir. Ötektoid bölgesinde matris yapısı ve mekanik özelliklerin önceden tespiti de ötektoid dönüşüm ısı ve modül ilişkisinin kurulması ile karışık dökümler için sağlanabilir.

7. SONUÇLAR

Al-Si alaşımı için gizli ısı hesaplamasında kullanılabilen yeni bir sıfır eğrisi tanımı yapılmış, bu tanıma göre elde edilen değerler AFS Transactions (2003)' ta yayınlanmıştır.

Küresel grafitli dökme demirler için farklı bir sıfır eğrisi tanımı yapılmıştır. Önerilen bu sıfır eğrisi ile yapılan gizli ısı hesaplamaları literatürdeki değerlerle uyuşmakta, yaklaşımımızın doğru olduğu anlaşılmaktadır.

Modüle bağlı olarak tespit edilen gizli ısı ile mikroyapı arasında paralellik olduğu tespit edilmiştir. Bu tespitten sonra araştırmada kullanılan düzenek ile gizli ısının hesaplanması ve buna bağlı olarak mikroyapının önceden tahmini mümkün olacaktır.

Ayrıca;

Modül arttığı zaman ötektik sıcaklık ve ötektik büyüme zamanı artmaktadır.

Modül azaldığı zaman küre sayısı artmakta ve küre boyutu küçülmektedir.

Küre sayısı arttığında ferrit yüzdesi artmaktadır. Ancak bazı istisnalarda vardır.

Bileşimde Cr içeriğinin artması yapıda ötektik karbür yapısının oluşmasına ve yapının tamamen perlitik olmasına neden oldu.

Soğuma eğrisinin birinci türevi faz bölgelerinin incelenmesini kolaylaştırırken, ters oran eğrisi dönüşüm sıcaklıklarının tespitini kolaylaştırmıştır.

Sıfır eğrisi için noktalar birinci türev eğrisinde katılma sonrası ve ötektoid reaksiyon öncesi ve ötektoid sonrası bölgeden seçilerek tanımlanmalıdır. Bu yeni yöntemle elde edilen sıfır eğrisinden orta modüllü kap için hesaplanan gizli ısı değerleri literatürdeki değerlerle uyuşmaktadır.

Modül arttıkça gizli ısı değerleri de artmaktadır. Modüllere göre değişimde en yüksek ilişki katsayısı orta modüllü kapta elde edilmiştir. Dolayısıyla burada orta modüllü kap gerçek değeri hesaplamada daha uygun sonuç vermektedir. Bunun nedeni orta modüllü kabın dağılmaması ve sistemdeki konumundan dolayı katılma sonrasında fazla derin olmayan bir geçiş vermesi ve ötektoid reaksiyon öncesinin etrafındaki kapların onun soğumasını yavaşlatmasından dolayı daha uzun olması sıfır eğrisinin daha doğru bulunmasını sağlamaktadır.

Standart kap (büyük modüllü kap) ötektoid reaksiyondan önce dağılmakta dolayısıyla yapısı çoğunlukla perlitik olmaktadır. Buda gösteriyor ki bu kap ötektoid reaksiyon bölgesinin incelenmesi için dolayısıyla mikroyapının incelenmesi için uygun değildir.

Soğuma eğrilerindeki farklılıklar küresel grafitli dökme demir üretiminde her aşamanın çok dikkatli yapılması gerekliliğini göstermiştir. Elde edilen eğrilerin analizinden belirli bir ergiyiğin oda sıcaklığındaki yapısını tahmin etmek için ısı analiz yönteminin kullanılabilmesi anlaşılmıştır.

Yeni sistem farklı modüllere sahip karışık dökümlerin analizi için uygundur. Bu modüllere göre yeni yöntemle hesaplanmış gizli ısıların modülle ilişkisini gösteren grafiklerde eğrilerin ilişki katsayısına bakılarak gerçekleştirilebilmektedir. Yüksek ilişki katsayısı döküm için seçilen bileşimin seçilen modül sınırları içinde hatasız dökülebileceğini göstermektedir. Standart kapla analizde tek bir modül analiz edilmekte bu yüzden karışık dökümlerde analiz eksik olmaktadır. Bu nedenle bu çalışmada geliştirilen sistem karışık dökümlerin hatasız yapılabilmesi açısından dökümden önce ısı analiz test cihazı olarak kullanılabilir.

8. KAYNAKLAR

- Ableidinger, K. ve Raebus, (1986), "Thermoanalytical Computer Control and Correction of SG Iron Melts with Constant Feeding Conditions", *The British Foundryman*, 320-324.
- AFS Araştırma Projesi, (), "Shrinkage in Ductile Iron", DIS Research Project,34,yönetici özeti, www.ductile.org/researchpdfs/doc341.pdf.
- Andrews, K.W., (1973), *Physical Metallurgy, Techniques and Applications, Volume 1*, George Allen & Unwin, London.
- Apelian, D. ve Cheng, J.J.A., (1986), "Al-Si Processing Variables: Effect on Grain Refinement and Eutectic Modification", *AFS Transactions*, 94:797-808.
- Aras, N. (1970), *Küresel Grafitli Demir Dökümü*, Makine Mühendisleri Odası, A.S.M. Handbook, (1992), *Casting*, 2nd edition, vol.15.
- ATAS, (1994), "Adaptive Thermal Analysis System II User's Guide", Novacast AB, Sweden.
- Atasoy, O.A., Yılmaz, F. ve Elliott, R., (1984), "Growth Structures in Aluminium-Silicon Alloys, I. The coupled zone", *Journal of Crystal Growth*, 66:137-146.
- Aypek, M., (1999), *Termal Analiz Yöntemiyle Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Kalitesinin Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü.*
- Backerud, S.L. ve Sigworth, G.K., (1989), "Recent Developments in Thermal Analysis of Aluminum Casting Alloy", *AFS Transactions*, 97:459-464.
- Backerud, L., Chai, G. ve Tamminen, J., (1990), *Solidification Characteristics of Aluminum Alloys, Volume 2*, Foundry Alloys, AFS/Skan Aluminum.
- Barlow, J.O. ve Stefanescu, D.M., (1997), "Computer-Aided Cooling Curve Analysis Revisited", *AFS Transactions*, 105:349-354.
- Bauer, W., (1998), "Thermal Analysis in Quality and Process Control of Ductile Iron", *The Ductile Iron Society's 1998 Keith D. Millis World Symposium on Ductile Iron*, 225-249.
- Bhaskaran, C.H. ve Wirth, D.J., (2002), "Ductile Iron Shrinkage Evaluation Through Thermal Analysis", *AFS Transactions*, 110:835-850.
- Bradley, F.J., Bartelt, P.F., Fung, C.A ve Heine, R.W., (1990), "On the Application of Thermal Analysis to the Control of Molten Metal Processing of Ductile Iron", *Conference Proceedings, Cast Iron IV*, MRS, 485-493.
- Bradley, F.J., Bartelt, P.F., Fung, C.A ve Heine, R.W., (1992), "Considerations in the Application of Numerical Simulation to Shrinkage Prediction in Ductile Iron Castings", *AFS Transactions*, 100:155-172.
- Brown, J.R., (1994), *Foseco Foundryman's Handbook*, 221-229, tenth edition.
- Cast Irons, (1996), *A.S.M. Specialty Handbook*.
- Chen, I.G. ve Stefanescu, D.M., (1984), "Computer-Aided Differential Thermal Analysis of Spheroidal and Compacted Graphite Cast Irons", *AFS Transactions*, 92:947-964.
- Çavuşoğlu, E., (1991), *Döküm Teknolojisi*, İstanbul Teknik Üniversitesi.

- Dikeç, F., (1971), Magnezyum ile Yapılan Küresel Grafitli Dökme Demir Üretiminde Bileşim ve Bazı Döküm Şartlarının Etkileri, Doktora Tezi, İTÜ.
- Elkem, (1997), "Technical Information Sheets, 10 ve 6", www.foundry.elkem.com.
- Ekpoom, U. ve Heine, R.W., (1981), "Thermal Analysis by Differential Heat Analysis (DHA) of Cast Iron", AFS Transactions, 89: 27-38.
- Engineered Casting Solutions, (2001), "Understanding Cast Irons", Summer 2001, 32-33.
- Ersümer, A., (1981), Demir Döküm, Birsen Kitabevi, İstanbul.
- Fras, E., Kapturkiewicz, W., Burbielko, A. ve Lopez, H.F., (1993), "A New Concept in Thermal Analysis of Castings", AFS Transactions, 101: 505-511.
- Frost, J.M. ve Stefanescu, D.M., (1992), "Melt Quality Assessment of SG Iron Through Computer-Aided Cooling Curve Analysis", AFS Transactions, 100:189-191.
- Foundry Trade Journal, (2001), "A Review of ductile iron process technology", 18-19. June 2001.
- Fung, C.A., Bartelt, P.F., Bradley, F.J. ve Heine, R.W., (1990), "Statistical Modelling for the Prediction of Shrinkage in Ductile Iron Castings", AFS Transactions, 98:489-494.
- Gowri, S. ve Samuel, F.H., (1994), "Effect of Alloying Elements on the Solidification Characteristics and Microstructure of Al-Si-Cu-Mg-Fe 380 Alloy", Metallurgical and Materials Transactions A, 25A:437-448.
- Gowri, S., Mani, P.H. ve Bouchard, P., (1998), "Processlab: A Practical Approach to Ductile Iron Matrix Structure/Property Control Through the Use of Thermal Analysis", The Ductile Iron Society's 1998 Keith D. Millis World Symposium on Ductile Iron, 190-224.
- Guo, X. ve Stefanescu, D.M., (1997), "Solid Phase Transformation in Ductile Iron- A Benchmark for Computational Simulation of Microstructure ", AFS Transactions, 105:533-543.
- Guo, X., Stefanescu, D.M., Chuzhoy, L., Pershing, M.A. ve Biltgen, G.L., (1997), "A Mechanical Properties Model for Ductile Iron", AFS Transactions, 105:47-54.
- Günay, Y. ve Demir, C., (1997), "Küresel Grafitli Dökme Demirde Thermal Analiz Uygulamaları", Proceedings of the 9.th International Metallurgy And Materials Congress, Bildiriler Kitabı, Vol:II, 1505-1511.
- Heine, R.W., (1995), "Austenite Liquidus, Carbide Eutectic and Undercooling in Process Control of Ductile Base Iron", AFS Transactions, 103:199-206.
- Henych, I., (1998), "Trends in Melting and Magnesium Treatment of Ductile Iron Melt", The Ductile Iron Society's 1998 Keith D. Millis World Symposium on Ductile Iron, 18-72.
- Humphrey, J., (1961), B.C.I.R.A. Journal, 9:609-621.
- Itofuji, H., (1996), "Proposal of Site Theory", AFS Transactions, 104:79-87.
- Itofuji, H. ve Masutani, A., (2001), "Nucleation and Growth Behaviour of Chunky Graphite", Int. J. Cast Metals Res., 14:1-14.
- Karsay, S.I., (1976), Ductile Iron I, Production, The State of Art, Quebec Iron and Titanium Corporation, Canada.

- Karsay, S.I., (1981), Ductile Iron III, Gating and Riserings, QIT-Fer et Titane Inc, Canada.
- Kierkus, W.T. ve Sokolowski, J.H., (1999), "Recent Advances in CCA: A New Method of Determining Baseline Equation", AFS Transactions, 107: 161.
- Knothe, K., (1987), "Practical Application of Thermal Analysis as an Aid to Strict Metallurgical Control", SG Iron: The Next 40 Years, 4.1-4.21.
- Labrecque, C. ve Gagne, M., (1998), "Review Ductile Iron:Fifty Years of Continuous Development", Canadian Metallurgical Quarterly, 37(5):343-378.
- Labrecque, C. ve Gagne, M., (1998), "Interpretation of Cooling Curves of Cast Irons: A Literature Review", AFS Transactions, 106:83-90.
- Lacaze, J. ve Gerval, V., (1998), "Modelling of the Eutectoid Reaction in Spheroidal Graphite Fe-C-Si Alloys", ISIJ International, 38(7):714-722.
- Lesoult, G., Castro, M. ve Lacaze, J., (1998), "Solidification of Spheroidal Graphite Cast Irons-I. Physical Modelling", Acta Material, 46(3):983-995.
- Liu, B.C., Zhao, H.D., Liu, W.Y. ve Wang, D.T., (1999), "Study of Microstructure Simulation of Spheroidal Graphite Cast Iron", Int. J. Cast Metals Res., 11:471-476.
- Louvo, A., Pellikka, E., Alhainen, J. ve Eklund, P., (1991), "Criterion Functions Based on Alloying and Cooling Rate for Simulating the Microstructure and Mechanical Properties of SG Iron Casting", AFS Transactions, 99:237-244.
- Maijer, D., Cockcroft, S.L. ve Patt, W., (1999), "Mathematical Modelling of microstructural development in Hypoeutectic Cast Iron", Metallurgical and Materials Transactions A, 30A (August):2147-2158.
- Malherios, L.P. ve Riberio, C.A.S., (1999), "Potential Use of Continuous Cooling Curves for Prediction of Solidification Structure of Nodular Iron Casting Sections", Int. J. Cast Metals Res., 11:375-380.
- Mirle, A. K., (1998), An Optimization Methodology for Modelling the Solidification of Commercial Gray and White Iron, PhD Thesis, University of Wisconsin-Medison, USA.
- Monroe, R. ve Bates, C.E., (1982), "Thermal Analysis of Ductile Iron Samples for Graphite Shape Prediction", AFS Transactions, 90:307-311.
- Mullins, J.D., (2003), "Nodule Count-Why and How!", Ductile Iron News, Issue 2, 2003.
- Muratore, E.C., (1998), "The Effect of Metallic Charge/Melt History on Nucleation Potential in Cast Irons", AFS International Inoculation Conference, April 6-8, 1998, Illinois.
- Nave, M.D., Dahle, A.K. ve StJohn, D.H., (2002), "Halo formation in directional solidification", Acta Materialia, 50:2837-2849.
- Novacast, (2002), "Introduction to Thermal Analysis of Metals", www.novacast.se
- Novacast AB, (1997), "Foundry Technology II", Software.
- Oliveria, M.J., Malherios, L.P. ve Riberio, C.A.S., (1999), "Evaluation of The Heat of Solidification of Cast Irons From Continuous Cooling Curves", Journal of Materials Processing Technology, 92-93: 25-30.
- Property Calculator in Utility Programs, AFS Solidification System (3D) Version 4.1, (1998).

- Rio Tinto Iron & Titanium Inc, (2000), A Design Engineer's Digest of Ductile Iron, Tenth Edition, Rio Tinto Iron & Titanium, Canada.
- RTZ Iron & Titanium Inc, (1998), D.I. Techniques, Sorelmetal, Suggestions for Ductile Iron Production, RTZ Iron & Titanium Inc, Issue 11, Canada.
- Ruxanda, R. ve Stefanescu, D.M., (2002), "Graphite Shape Characterisation in Cast Iron-From Visual Estimation to Fractal Dimension", *Int. J. Cast Metals Res.*, 14:207-216.
- Shaw, W.F. ve Blatzer, B.T., (2002), "Thermal Analysis", *Ductile Iron News*, Issue 1, 2002.
- Sillen, R.V., (1998), "Optimization of Inoculation Practice by means of Thermal Analysis", *AFS International Inoculation Conference*, April 6-8, 1998, Illinois.
- Sillen, R.V., (2002), "Shrinkages in Iron Castings", *Ductile Iron News*, Issue 2, 2002.
- Skaland, T., (1992), "A Model for the Graphite Formation in Ductile Cast Iron, Ph.D. Thesis 1992:33, The University of Trondheim, NTH, Department of Metallurgy, Norway.
- Skaland, T., (2001), "A New Approach to Ductile Iron Inoculation", *AFS Transactions*.
- Skjegstad, N.T. ve Skaland, T., (1996), "Inoculation of Grey and Ductile Iron", *Bombay Foundry Congress*, 24-25 May 1996, Bombay.
- Smith, W. F., (1996), *Materials Science and Engineering*, Third Edition, McGraw-Hill Inc., USA.
- Spengler, A.F. ve Briggs, H.K., (1972), *The Ductile Iron Process*, Miller and Company Service Handbook, Compendium 4, Illinois.
- Strong, G.R., (1983), "Thermal Analysis as a Ductile Iron Molten Metal Processing Evaluation Tool", *AFS Transactions*, 91:151-156.
- Stefanescu, D.M., Loper, C.R., Voight, R.C. ve Chen, I.G., (1982), "Cooling Curve Structure Analysis of Compacted/Vermicular Graphite Cast Irons Produced by Different Melt Treatments", *AFS Transactions*, 90:333-348.
- Suarez, O.M., ve Loper, C.R., (1997), "Influence of Thermal Analysis Cup on the Assessment of Critical Temperatures upon Solidification of Cast Iron", *AFS Transactions*, 105:929-937.
- Suarez, O.M., Kendrick, R.D. ve Loper, C.R., (2000), "A Study of Sulphur Effect in High Silicon Ductile Irons", *Int. J. Cast Metals Res.*, 13:135-145.
- Suarez, O.M., (2000), *Thermal Analysis and Microstructure Control of Cast Irons*, PhD Thesis, University of Wisconsin-Medison, USA.
- Şen, Ö., (1998), *Alüminyum- Silisyum Alaşımlarının Isıl Analizi*, Yüksek Lisans Tezi, Y.T.Ü.
- Şen, Ö., (2003), "Effect of Modulus on the Solidification Characteristics and Microstructure of 380 Alloy", *AFS Transactions*, 111:137-146.
- Şen, Ö., (2003), "Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Üretimi ve İşlem Yöntemlerinin Karşılaştırılması", *Metal Dünyası*, Ağustos 2003, sayı 123, 88-94.
- Tenekedjiev, N., Mulazimoglu, H., Closset, B. ve Gruzleski, J., (1995), *Microstructures and Thermal Analysis of Strontium-Treated Aluminum-Silicon Alloys*, AFS inc., Illinois.

Tuttle, B.L., (1985), "Definations in Thermal Analysis", Modern Casting, 39-41.

Upadhaya, K.G., Stefanescu, D.M., Liev, K. ve Yeager, P., (1989), "Computer- Aided Cooling Curve Analysis: Principles and Applications in Metal Casting", AFS Transactions, 97:61-66.

Vijayaraghanan, R., (1996), A Model for Evoluation of As-Cast Microstructure in Ductile Iron Alloys, PhD Thesis, University of Wisconsin-Medison, USA.

Vijayaraghanan, R. ve Bradley, F.J., (1999), "A Micro-Model for Eutectoid Phase Transformations in As-Cast Ductile Iron", Scripta Materialia, 41(11):1247-1253.

Wang, D. (2001), "Ductile Iron", Ductilew95, Auburn Solidification Design Center.

Wessen, M., Svensson, I.L. ve Aagaard, R., (1999), "A Detailed Examination of Two Types of Inoculants Used in Ductile Irons", Int. J. Cast Metals Res., 11:351-356.

Willard, H.H., Meritt, L.L. ve Dean, J.A., (1965), Instrumental Methods of Analysis, 4th Edition, 460-465.

Yılmaz, F. ve Elliot, R., (1983), "Growth of Silicon Crystals in Aluminium Silicon Alloys", Journal of Metal Science, 65:170-175.

Yılmaz, F., (2003), İçme-Atık Su ve Gaz Dağıtım Şebekelerinde Dökme Demirler ve Düktil Demir Uygulamaları, İSKİ Yayını, İstanbul.

Zhu, P. ve Smith, R.W., (1995), "Thermal Analysis of Nodular Graphite Cast Iron" AFS Transactions, 103:601-609.

9. ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi	22.02.1974	
Doğum yeri	Babaeski	
Lise	1987-1990	Babaeski Lisesi
Lisans	1990-1994	Yıldız Üniversitesi Kimya-Metalurji Fak. Metalurji Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans	1994-1998	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji Müh. Anabilim Dalı, Malzeme Programı
Doktora	1998-2004	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Müh. Anabilim Dalı, Malzeme Programı

Çalıştığı kurum(lar)

1995-1998 YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Araştırma Görevlisi.
1998-Devam ediyor YTÜ Kimya-Metalurji Fak. Araştırma Görevlisi.