

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DÜKTİL DEMİR DÖKÜMLERDE KÜRE SAYISININ
TESPİTİ VE MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Met ve Malz. Müh. Mustafa BAYRAKTAR

Enstitü Anabilim Dalı : METALURJİ VE MALZEME MÜH.

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Fevzi YILMAZ

Haziran 2009

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

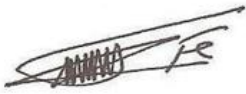
**DÜKTİL DEMİR DÖKÜMLERDE KÜRE SAYISININ
TESPİTİ VE MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Met. ve Malz. Müh. Mustafa BAYRAKTAR

Enstitü Anabilim Dalı : METALURJİ VE MALZEME MÜH.

Bu tez 15/06/2009 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.



Prof. Dr. Fevzi YILMAZ
Jüri Başkanı



Prof. Dr. Cuma BİNDAL
Üye



Doç. Dr. Kenan GENEL
Üye

ÖNSÖZ

Döküm, sıvı veya ergimiş malzemenin bir kalıpta katılaştırılması ve şekilli parçaya dönüştürülmesi işlemidir. Savurma dökümün temel özelliği ise döküm ve katılaşmanın döndürülen bir kalıp içinde gerçekleştirilmesidir. Savurma dökümde metalin saçılma (genişleme) ve uzaklaşması kalıp cidarında sonlanır, dinamik katılma gerçekleşir ve mükemmel yapısal özellikler sağlanır.

Bu tezde savurma döküm yöntemi ile düktil demir boruların üretimi ve özellikleri incelenmiştir. İşletmelerden alınan düktil demir boru örnekleri küre sayısı mekanik özellikler bağlamında incelenmiş ve testler gerçekleştirilmiştir. Ayrıca düktil demir boru bağlantı parçaları örnekleri üzerinde de testler gerçekleştirilmiştir. Su iletiminde yoğun olarak kullanılan bu iki tür malzeme deneylerle incelenmiş, özellikleri ve göreceli üstünlükleri tartışılmıştır. Bu tezin birinci bölümü giriş şeklinde planlanmıştır. İkinci bölüm, savurma döküm teknolojisini konu almaktadır. Üçüncü bölümde incelenen malzeme düktil demir olduğundan bu döküm ürünleri üstünde bilgi verilmiştir. Dördüncü bölümde düktil demir boruların üretimi detaylandırılmıştır. Deney teknikleri, deney sonuçları ve tartışmalar sırası ile Bölüm 5 ve 6' da verilmiştir.

Kariyerimde ve çalışmalarımda bana her zaman destek olan tez danışmanım değerli öğretim üyesi Sayın Prof. Dr. Fevzi YILMAZ hocama, Daire Başkanım Sayın M.Lütfi YILMAZ'a (İSKİ), literatür desteği sağlayan Sayın Dr. Savaş İZGİZ'e, deneyleri gerçekleştirmem sırasında yardımlarını esirgemeyen Sayın Arş. Gör. Özgür CEVHER'e, Sayın Met. ve Malz. Yük. Müh. Ahmet GÜLEÇ'e (İSKİ), Mercan Makine Sanayi çalışanlarına, Anadolu Döküm Sanayi A.Ş. çalışanlarına, İSKİ Genel Müdürlüğü çalışanlarına ve SAÜ Müh. Fak. Met. ve Malz. Müh. Bölümü çalışanlarına teşekkür ederim. Ayrıca bana her zaman maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen aileme ve değerli dostlarıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	viii
TABLolar LİSTESİ.....	xvi
ÖZET.....	xviii
SUMMARY.....	xix
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ.....	1
BÖLÜM 2.	
SAVURMA (SANTRİFÜJ) DÖKÜM.....	3
2.1. Giriş.....	3
2.2. Savurma Döküm Prosesi.....	4
2.3. Savurma Döküm Metodları.....	12
2.3.1. Gerçek savurma döküm.....	12
2.3.2. Yarı savurmalı döküm.....	14
2.3.3. Savurmalı döküm.....	15
2.4. Savurma Döküm Makine Tipleri.....	16
2.4.1. Yatay eksenli savurma döküm makineleri.....	16
2.4.1.1. De Lavaud prosesi.....	17
2.4.2. Düşey eksenli savurma döküm makineleri.....	18
2.5. Kalıplar.....	19
2.6. Kalıp Kaplamaları.....	21

BÖLÜM 3.

DÜKTİL DEMİRLER.....	25
3.1. Giriş.....	25
3.2. Düktil Demir Üretimde Kullanılan Şarj Malzemeleri.....	29
3.2.1. Pik.....	30
3.2.2. Çelik hurdası.....	31
3.2.3. Düktil demir hurdası-devri daim malzemesi.....	32
3.2.4. Direkt redüklenmiş demir cevheri.....	32
3.2.5. Ferro alaşımlar ve silisyum karbür.....	33
3.2.6. Karbon vericiler.....	33
3.3. Küreleştirme İşlemi (Magnezyum İşlemi).....	34
3.4. Grafiti Küreleştirici Malzemeler.....	34
3.5. Küreselleştirme Etkisinin Zamanla Azalması.....	35
3.6. Aşılama.....	36
3.6.1. Aşılama teknikleri.....	37
3.6.2. Aşılama malzemeleri.....	38
3.6.3. Aşılama ilgili detay çalışma.....	40
3.6.3.1. Döküm makinesi, malzeme çap ve boyları.....	40
3.6.3.2. Üretim değerleri.....	40
3.6.3.3. Aşılama çalışmaları.....	41
3.6.3.4. Aşılama ile ilgili yapılan çalışma sonuçları.....	43
3.6.3.5. Birinci deneysel çalışma.....	43
3.6.3.6. İkinci deneysel çalışma.....	47
3.6.3.7. Aşılama ile ilgili yapılan çalışma sonuçları.....	49
3.6.3.8. Araştırma sonuçları.....	49
3.7. Düktil Demir Malzeme Bileşimindeki Ana Elementler.....	50
3.8. Düktil Demir Malzemelerin Isıl İşlemi.....	54
3.8.1. Yumuşatma tavlama.....	55
3.8.2. Tam tavlama.....	56
3.8.3. Kritik sıcaklık altında tavlama.....	57
3.8.4. Sertleştirme tavlama.....	57
3.8.4.1. Normalleştirme tavlama.....	57

3.8.4.2. Çift normalleştirme.....	57
3.8.4.3. Su verme ve temperleme.....	58
3.8.5. Martemperleme.....	58
3.8.6. Ostemperleme.....	58
3.8.7. Yüzey sertleştirme.....	58
3.8.8. Nitrasyon.....	59
3.9. Düktil Demir Malzemeler Üzerine Yapılmış Patent Çalışmaları.....	59
BÖLÜM 4.	
DÜKTİL DEMİR BORU VE BAĞLANTI PARÇALARININ	
DÖKÜMÜ.....	67
4.1. Giriş.....	67
4.2. Düktil Demir Boru Üretimi.....	71
4.2.1. Savurma döküm.....	76
4.2.2. Savurma döküm makinesi.....	79
4.2.3. Sıvı metal.....	80
4.2.4. Yatay sürekli tavlama fırını.....	81
4.2.5. Düktil demir borulara uygulanan kaplamalar.....	83
4.2.5.1. Çinko kaplama.....	84
4.2.5.2. Çimento kaplama (sıvama).....	85
4.2.5.3. Bitüm kaplama.....	86
4.2.6. Son işlemler.....	87
4.2.7. Hidrolik test.....	87
4.3. Düktil Demir Boru Üretiminde Gelişmeler.....	87
4.4. Düktil Demir Boru Üretim Tesis Tasarımı.....	88
4.5. Proses Değişkenleri ve Döküm Hataları.....	88
4.6. Kalite Kontrol ve Fabrika Testleri.....	89
4.7. Özellikler.....	91
4.8. Düktil Demir Boruların Korozyona Direngelikleri.....	92
4.9. Düktil Demir Boru Bağlantı Parçalarının Dökümü.....	94
BÖLÜM 5.	
DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	97

5.1. Giriş.....	97
5.2. Metalografi.....	97
5.2.1. Numune kesme.....	97
5.2.2. Zımparalama ve parlatma.....	98
5.2.3. Mikroyapı inceleme.....	99
5.3. Mekanik Test ve Deneyler.....	103
5.3.1. Sertlik testi.....	103
5.3.2. Çekme testi.....	104
5.3.3. Çentik darbe testi.....	106
BÖLÜM 6.	
DENEYSEL SONUÇLAR VE İRDELEME.....	108
6.1. Düktil Demir Boru Numuneleri için Mikroyapı Çalışmaları.....	108
6.2. Düktil Demir Boru Bağlantı Parçası Numuneleri için Mikroyapı Çalışmaları.....	111
6.3. Düktil Demir Boru ve Bağlantı Parçası Numunelerinin Mikroyapı Karakterizasyonları.....	115
6.4. Sertlik (HB) Test Sonuçları.....	121
6.5. Çekme Test Sonuçları.....	122
6.6. Darbe Test Sonuçları.....	127
6.7. Sonuçlarının İrdelenmesi.....	130
KAYNAKLAR.....	145
ÖZGEÇMİŞ.....	149

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

A	: Yüzey Alanı
Fe	: Demir
Fe ₃ C	: Karbür
HB	: Brinel Sertlik
J	: Joule
M	: Modül
Mn	: Mangan
MPa	: Megapaskal
Ni	: Nikel
Si	: Silisyum
V	: Hacim

AWWA	: American Water Works Association - Amerika Su Çalışma Kurumu
ASTM	: American Society for Testing and Materials – Test ve Malzemeler için Amerika Cemiyeti
BCIRA	: British Cast Iron Research Association – İngiltere Dökme Demir Araştırma Kurumu
CE	: Karbon Eşdeğerliği

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1.	Savurma döküm yöntemi ile bir borunun üretimi.....	5
Şekil 2.2.	Merkezkaç kuvvetinin farklı değerleri için çap ve dönme hızı arasındaki ilişki.....	6
Şekil 2.3.	Katılaşma esnasında hacimdeki değişim.....	7
Şekil 2.4.	Yavaş soğuma esnasında alüminyum küpün büzülmesi.....	8
Şekil 2.5.	Farklı dökümlerin katılaşma davranışı.....	8
Şekil 2.6.	Tipik tane büyümesi.....	9
Şekil 2.7.	Gerçek savurma döküm a) Silindirik döküm, gerçek savurma döküm, b) Düşey döküm makinesi için metal kalıp.....	12
Şekil 2.8.	Gerçek savurma döküm yöntemi ile üretilen boru şeklindeki parça.....	13
Şekil 2.9.	Gerçek savurma döküm makineleri.....	13
Şekil 2.10.	Yarı savurma dökümde dökümler ne silindirik nede yuvarlaktır, fakat kendi eksenini etrafında döner ve yarı savurma döküm olarak adlandırılır. Oklar soğuma yönünü göstermektedir.....	15
Şekil 2.11.	Yatay eksenli savurma döküm makinesinin kesiti (kısa boru veya gömlek üretimi)	16
Şekil 2.12.	Döküm et kalınlığının döküm sonrası zamanla ilişkisi.....	17
Şekil 2.13.	Metal kalıplarda boru üretimi için kullanılan savurma döküm makinesi.....	18
Şekil 2.14.	a) Kalıp içinde eksik kaplama sonucu bozulma (şematik), b) Kalıp içinde fazla kaplama sonucu bozulma (şematik).....	22
Şekil 2.15.	Kalıpta katılaşan metalde ve çevresinde ısı transferine bağlı olarak değişen sıcaklıklar.....	22

Şekil 2.16.	Kalıp yüzey ve köşelerinde oluşan farklı hava boşlukları, girintili köşelerde hava boşluğu fazladır, çıkıntılı köşelerde hava boşluğu yoktur. Artan kaplama kalınlıkları katılaşmayı geciktirir ve hava boşluğu kalınlığını düşürür.....	23
Şekil 3.1.	a) Pik-Font (Gri) dökme demirin fleyk grafitlerden oluşmuş mikroyapısı, b) Düktil-font (GGG) dökme demirin küresel grafitlerden oluşmuş mikroyapısı.....	26
Şekil 3.2.	Döküm işlemi akış şeması.....	28
Şekil 3.3.	Uygulama adımları.....	28
Şekil 3.4.	Düktil demir kademeleri ve termik analiz yönteminin uygulanması.....	29
Şekil 3.5.	Şarjda çelik hurdası kullanım miktarına ve pik özelliklerine bağlı olarak dokuda perlit miktarının değişimi, A:Normal özelliklerde pik kullanımı, B:Yüksek özelliklere sahip sfero piki ile.....	32
Şekil 3.6.	Aşılama durumuna sıcaklığın etkisi.....	37
Şekil 3.7.	1370°C’ de uygulanan iki aşılama yönteminin karşılaştırılması..	38
Şekil 3.8.	KV1 malzemesinin standart mikroyapı dağılımı, a) İyi (1), b) Orta (2), c) Orta-kötü (2-3), d) Kötü (3)	41
Şekil 3.9.	Dağlamasız yapılar, a) Inobar – Glomag, b) Inobar – Glomag Im Giess-Strahl geimpft (Superseed).....	42
Şekil 3.10.	Dağlamalı yapılar, a) Inobar – Glomag (3 mm yüzeyden görüntü), b) Inobar – Glomag (Superseed), (1,5 mm derinden görüntü).....	43
Şekil 3.11.	Karbon oranına bağlı olarak grafit formundaki bölgesel değişim	44
Şekil 3.12.	Silisyum oranına bağlı olarak grafit formundaki bölgesel değişim.....	45
Şekil 3.13.	Aşılama çeşidine bağlı olarak grafit formundaki bölgesel değişim.....	45
Şekil 3.14.	Karbon oranına bağlı olarak sementit miktarındaki bölgesel değişim.....	46
Şekil 3.15.	Silisyum oranına bağlı olarak sementit miktarındaki bölgesel değişim.....	46

Şekil 3.16.	Aşılmalı çeşidine bağlı olarak sementit miktarındaki bölgesel değişim.....	47
Şekil 3.17.	a) Grafit yapısı küresel formlu, malzeme spesifikasyonu K9 ve K22' ye göre 1 ve ½ Nr. Uygun, mikroporozite kesitte dağınık olarak bulunmaktadır, b) Ana yapı ıslah yapısı, kesite karbürler > %8, Rest (kalıntı) Ostenitler ~%2.....	50
Şekil 3.18.	Azami parça et kalınlığına bağlı olarak Si miktarı ile önerilen Mn miktarının değişimi.....	52
Şekil 3.19.	Soğuma diyagramı.....	62
Şekil 3.20.	Beynitik yapı elde etmek için geleneksel tavlama, Kesikli çizgi patent, düz çizgi bilenen tavlama eğrisi.....	63
Şekil 3.21.	Patent ile bulunan termik tavlama ile termik ferritleme tavlama tekniklerinin karşılaştırılması.....	63
Şekil 3.22.	Düktül demir ana üretim adımları.....	64
Şekil 3.23.	Efektif küreselleştirici elementlerin zamana bağlı olarak sıvıda kalış yüzdeleri.....	64
Şekil 3.24.	Orijinal ilave, banyoda kazanım ve bekleme süresi ilişkisi verilmiştir. Patent konusu olan birden fazla küreselleştirici ilavesi öngörülmüştür.....	65
Şekil 3.25.	Düktül demir boru üretiminde ilave edilen Mg ve Ce'un etkisizleşme oranı. İki küreselleştirici ilavesinin sonucu, sıvıda kalan yüksek küreselleştirici bulunuşunun sağlanması. Bekleme etkisi az.....	65
Şekil 4.1.	Yıllara göre değişen dünya düktül demir üretimi (1950 – 2006)..	67
Şekil 4.2.	Fransa'da 300 yılı aşkın süredir serviste olan dökme demir borular. Dökme demir boruların ilk kullanıldığı örnekler 15. yy Almanya ve Fransa'sına aittir.....	71
Şekil 4.3.	Döküm yoluyla üretilen flanşlı dökme demir boru örneği.....	71
Şekil 4.4.	Savurma döküm tekniği ile üretilmiş eski pik borular, Sarıyer...	72
Şekil 4.5.	Boru yapımında kullanılan yatay eksenli savurma döküm makinesinin kesiti.....	72

Şekil 4.6.	1 kg düktil demir boru üretim akım şeması (İç çapı 100 mm - DN 100) olan düktil demir boru üretim girdi ve çıktıları referans alınmıştır)	74
Şekil 4.7.	Savurma döküm düktil demir boru üretim standartları.....	75
Şekil 4.8.	Savurma döküm makinesine sıvı alalım şarjı ve boru sıyırma	76
Şekil 4.9.	Düktil boru üretim akış şeması.....	77
Şekil 4.10.	Yeni nesil esnek savurma döküm boru üreticileri üretimlerini gömlek döküm tekniğine yaklaştırmışlardır.....	78
Şekil 4.11.	De Lavaud tipi savurma döküm makinesinde üretim aşamaları (şarj, katılma, boru sıyırma ve şematik gösterim).....	78
Şekil 4.12.	Boru başı mufu için kalıba yerleştirilen reçineli maçalar.....	80
Şekil 4.13.	Sıvı alalım küreleştirici ilavesi ve sıvının dönen kalıba verilışı	80
Şekil 4.14.	Katılma alalım kalıptan çıkartılmadan önce uygulanan işlemler.....	81
Şekil 4.15.	Hurda kırık borular.....	81
Şekil 4.16.	Tavlama fırını, a) Genel görünüş, b) Ön görünüş, c) Boru girişi, d) Tavlama.....	82
Şekil 4.17.	Düktil demir borulara uygulanan tavlama grafiği (35 dk tavlama/63m)	83
Şekil 4.18.	Düktil demir boru kaplama ve ana metal mikroyapısı.....	84
Şekil 4.19.	Boru yüzeyine çinko koruyucu kaplama uygulaması.....	85
Şekil 4.20.	Çimento kaplama işlemi.....	85
Şekil 4.21.	Çimento kütleme ve kürlenmiş iç yüzey.....	86
Şekil 4.22.	Boru dış yüzeyinin bitüm kaplanması ve sonlandırma.....	86
Şekil 4.23.	Hidrolik test uygulaması.....	87
Şekil 4.24.	Test yöntemleri, a) Sehim testi, b) Ovallık testi.....	90
Şekil 4.25.	Disamatik sistemde kalıp hazırlama, modeller ve döküm şekli...	94
Şekil 5.1.	Düktil demir boru ve bağlantı parçası numunelerinin kesilmesi ve kesilmiş örnekler.....	98
Şekil 5.2.	Buehler, Speed Grinder-Polisher marka zımparalama parlatma cihazı.....	98
Şekil 5.3.	Mikroyapı incelemesi için hazırlanan boru numuneleri.....	99

Şekil 5.4.	Mikroyapı incelemesi için hazırlanan boru bağlantı parçası numuneleri.....	99
Şekil 5.5.	Düktül demir boru ve bağlantı parçası mikroyapısı, a) Ferritik mikroyapı (istenilen/olması gereken yapı), b) Perlitik mikroyapı (grafitlerin dışındaki koyu alanlar perlit, bu yapı istenmez).....	100
Şekil 5.6.	Grafit şekil faktörü.....	100
Şekil 5.7.	Nikon Eclipse L150/150A modeli optik mikroskop.....	101
Şekil 5.8.	Mikroyapı karakterizasyonu, a) Dağlanmamış boru numunesi ve ölçümler, b) Dağlanmış bağlantı parçası numunesi ve ölçümler.....	102
Şekil 5.9.	Wolpert marka sertlik ölçme cihazı ve şematik gösterim.....	103
Şekil 5.10.	Çekme test numunesinin şekli.....	104
Şekil 5.11.	Düktül demir boru numunelerinin çekme testi öncesi resimleri...	105
Şekil 5.12.	Instron 3367 marka çekme test cihazı.....	106
Şekil 5.13.	Darbe numunelerinin üstten, yandan ve şematik görünümü.....	106
Şekil 5.14.	Düktül demir boru numunelerinin darbe testi öncesi resimleri....	107
Şekil 5.15.	Pendelschlagwerk marka darbe test cihazı.....	107
Şekil 6.1.	B.100.1 ve B.100.2 nolu düktül demir boru numunelerinin dağlamasız mikroyapı resimleri.....	108
Şekil 6.2.	B.100.1 ve B.100.2 nolu düktül demir boru numunelerinin %2 Nital ile dağlanmış mikroyapı resimleri.....	109
Şekil 6.3.	B.400.1 ve B.400.2 nolu düktül demir boru numunelerinin dağlamasız mikroyapı resimleri.....	109
Şekil 6.4.	B.400.1 ve B.400.2 nolu düktül demir boru numunelerinin %2 Nital ile dağlanmış mikroyapı resimleri.....	110
Şekil 6.5.	B.600.1 ve B.600.2 nolu düktül demir boru numunelerinin dağlamasız mikroyapı resimleri.....	110
Şekil 6.6.	B.600.1 ve B.600.2 nolu düktül demir boru numunelerinin %2 Nital ile dağlanmış mikroyapı resimleri.....	111
Şekil 6.7.	F.100.1, F.100.2 ve F.100.3 nolu düktül demir boru bağlantı parçası numunelerinin dağlamasız mikroyapı resimleri.....	111

Şekil 6.8.	F.100.1, F.100.2 ve F.100.3 nolu düktil demir boru bağlantı parçası numunelerinin %2 Nital ile dağlanmış mikroyapı resimleri.....	112
Şekil 6.9.	F.150.1 ve F.150.2 nolu düktil demir boru bağlantı parçası numunelerinin dağlamasız mikroyapı resimleri.....	112
Şekil 6.10.	F.150.1 ve F.150.2 nolu düktil demir boru bağlantı parçası numunelerinin %2 Nital ile dağlanmış mikroyapı resimleri.....	112
Şekil 6.11.	F.250.1 ve F.250.2 nolu düktil demir boru bağlantı parçası numunelerinin dağlamasız mikroyapı resimleri.....	113
Şekil 6.12.	F.250.1 ve F.250.2 nolu düktil demir boru bağlantı parçası numunelerinin %2 Nital ile dağlanmış mikroyapı resimleri.....	113
Şekil 6.13.	Düktil demir boru numuneleri için aynı büyütmeye karşılaştırmalı mikroyapıları, a) e=6 mm (B.100.1-B.100.2) – dağlamasız b) e=8,1 mm (B.400.1-B.400.2)- dağlamasız, c) e=9,9 mm (B.600.1-B.600.2) - dağlamasız, d) e=6 mm (B.100.1-B.100.2) – dağlamalı, e) e=8,1 mm (B.400.1-B.400.2)- dağlamalı, f) e=9,9 mm (B.600.1-B.600.2) - dağlamalı.....	114
Şekil 6.14.	Düktil demir boru bağlantı parçası numuneleri için aynı büyütmeye karşılaştırmalı mikroyapıları, a) e = 7,2 mm (F.100.1-F.100.2-F.100.3) – dağlamalı, b) e = 7,8 mm (F.150.1-F.150.2) – dağlamalı, c) e = 9 mm (F.250.1-F.250.2) – dağlamalı.....	114
Şekil 6.15.	Düktil demir boru numuneleri için et kalınlığı - nodül sayısı ilişkisi.....	115
Şekil 6.16.	Düktil demir boru bağlantı parçası numuneleri için et kalınlığı - nodül sayısı ilişkisi.....	116
Şekil 6.17.	Düktil demir boru ve bağlantı parçası numuneleri için savurma ve kuma döküm yöntemlerinde et kalınlığı – nodül sayısı ilişkisi.....	117
Şekil 6.18.	Düktil demir boru ve bağlantı parçası numuneleri için savurma ve kuma döküm yöntemlerinde et kalınlığı – ortalama grafit çapı ilişkisi.....	118

Şekil 6.19.	Düktül demir boru ve bağlantı parçası numuneleri için savurma ve kuma döküm yöntemlerinde et kalınlığı – ferrit oranı ilişkisi	118
Şekil 6.20.	Düktül demir boru ve bağlantı parçası numuneleri için savurma ve kuma döküm yöntemlerinde et kalınlığı – perlit oranı ilişkisi	119
Şekil 6.21.	Düktül demir boru ve bağlantı parçası numuneleri için savurma ve kuma döküm yöntemlerinde et kalınlığı – grafit oranı ilişkisi	119
Şekil 6.22.	Düktül demir boru ve bağlantı parçası numuneleri için savurma ve kuma döküm yöntemlerinde et kalınlığı – hale kalınlığı ilişkisi.....	120
Şekil 6.23.	Düktül demir boru ve bağlantı parçası numuneleri için savurma ve kuma döküm yöntemlerinde et kalınlığı – ostenit yarıçapının grafit yarıçapına oranı ilişkisi.....	120
Şekil 6.24.	Düktül demir boru ve bağlantı parçası numuneleri için savurma ve kuma döküm yöntemlerinde et kalınlığı – sertlik ilişkisi.....	121
Şekil 6.25.	Düktül demir boru ve bağlantı parçası numuneleri için savurma ve kuma döküm yöntemlerinde nodül sayısı – sertlik ilişkisi.....	122
Şekil 6.26.	Düktül demir boru numunelerinin çekme testi sonrası resimleri..	123
Şekil 6.27.	Düktül demir boru ve bağlantı parçası numuneleri için savurma ve kuma döküm yöntemlerinde et kalınlığı – çekme mukavemeti ilişkisi.....	125
Şekil 6.28.	Düktül demir boru ve bağlantı parçası numuneleri için savurma ve kuma döküm yöntemlerinde nodül sayısı – çekme mukavemeti ilişkisi.....	126
Şekil 6.29.	Düktül demir boru ve bağlantı parçası numuneleri için savurma ve kuma döküm yöntemlerinde et kalınlığı – % uzama ilişkisi...	126
Şekil 6.30.	Düktül demir boru ve bağlantı parçası numuneleri için savurma ve kuma döküm yöntemlerinde nodül sayısı – % uzama ilişkisi	127
Şekil 6.31.	Düktül demir boru numunelerinin darbe testi sonrası resimleri...	127
Şekil 6.32.	Savurma döküm düktül demir boru numuneleri için et kalınlığı – darbe direnci ilişkisi.....	130
Şekil 6.33.	Savurma döküm düktül demir boru numuneleri için nodül sayısı – darbe direnci ilişkisi.....	130

Şekil 6.34. Darbe test sonuçlarının et kalınlığına bağlı olarak karşılaştırılması.....	134
Şekil 6.35. Darbe test sonuçlarının nodül sayısına bağlı olarak karşılaştırılması.....	134
Şekil 6.36. Savurma ve kuma döküm parçalarda sıcaklığı bağlı olarak nodül sayısı – darbe enerjisi değişimi.....	135
Şekil 6.37. B.100.1 nolu numune, dağlanmış yapı.....	137
Şekil 6.38. B.400.1 nolu numune, dağlanmış yapı.....	138
Şekil 6.39. B.600.2 nolu numune, dağlanmış yapı.....	138
Şekil 6.40. Düktil demir boru numunelerinin dış kısmında bulunan ferrit ve perlit tabakası.....	139
Şekil 6.41. Düktil demirin sahip olması gereken küre sayısı ile modül arasındaki ilişki.....	141
Şekil 6.42. γ - hale (mandagözü) yapısının oluşumu.....	142
Şekil 6.43. Fe-C-Si alaşımlarında eşli büyüme bölgesi (ötektik bölge), ötektik üstü bileşime ($C > \%4,3$) sahip Fe-C-Si alaşımında katılaşma.....	143
Şekil 6.44. Düktil demirin katılaşması sırasında iki olasılığın gösterimi, a) Yavaş soğuma, γ zarf-hale idealden büyük, b) Hızlı soğuma, γ zarf-hale ideal boyutta ve dendrit uzantısı vermiştir.....	144

TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1.	Kalıpçının çekinti (çekme) toleransı.....	10
Tablo 2.2.	Savurma döküm uygulamaları.....	10
Tablo 2.3.	Savurma dökümün endüstrideki kullanım alanları.....	11
Tablo 2.4.	Savurma döküm boru üretimi için geliştirilmiş bir metal kalıbın bileşimi ve özellikleri.....	19
Tablo 2.5.	Metal, kum, reçine-kum ve grafit kalıpların mukayesesi.....	20
Tablo 2.6.	Metal kalıplar için malzemeler.....	20
Tablo 3.1.	F-1 sınıfı soremetal düktil demir piki ortalama analizi (%).....	30
Tablo 3.2.	Tipik Mg küreselleştirme alaşımları ve kullanılan işlem yöntemleri	34
Tablo 3.3.	Alaşım cinsi ve küreselleştirme işlemi tipine göre Mg verimi.....	35
Tablo 3.4.	Düktil demir için bazı ferrosilisyum esaslı aşılama malzemelerinin bileşimleri.....	38
Tablo 3.5.	İmalat için segman ölçüleri (1. yuva segman).....	40
Tablo 3.6.	KV1 malzemesine ait üretim özellikleri.....	40
Tablo 3.7.	Çeşitli aşılama malzemelerinin kimyasal bileşim ve tane büyüklükleri.....	42
Tablo 3.8.	Aşılama özelliklerinin karşılaştırılması.....	42
Tablo 3.9.	Farklı element miktarları ve aşılama malzemelerine bağlı olarak yapılmış deneyler.....	43
Tablo 3.10.	Dört farklı deney için ilave bilgiler.....	44
Tablo 3.11.	Farklı element miktarları ve aşılama malzemelerine bağlı olarak yapılmış deneyler.....	47
Tablo 3.12.	Sekiz farklı deney için ilave bilgiler.....	48
Tablo 3.13.	Yapılan 3 testte ilave edilen malzemeler ve zamana bağlı eriyikte kalan toplam miktarları.....	66
Tablo 4.1.	Düktil demir borular (K9-PN16) için boyutsal değerler.....	75
Tablo 4.2.	Düktil demir için fiyat, mekanik özellikler ve diğer özellikler.....	91

Tablo 4.3.	Düktül demir, gri dökme demir ve çelik dökümün (% 0,3 C) karakteristik özelliklerinin mukayeseli listesi.....	93
Tablo 4.4.	Düktül demir boru bağlantı parçaları ve sembolleri.....	95
Tablo 4.5.	Düktül demir boru ve bağlantı parçalarının standartlara uygun genel özellikleri.....	96
Tablo 5.1.	Boru ve bağlantı parçaları için çekme ve uzama özellikleri.....	104
Tablo 5.2.	Çekme deneyi için numune kalınlığı ve çapı.....	104
Tablo 5.3.	Çekme test numuneleri için ölçüler.....	105
Tablo 6.1.	Düktül demir boru ve bağlantı parçası numunelerinin faz yüzdeleri ve grafit özellikleri (B.Boru, F.Fitting-bağlantı parçası).....	115
Tablo 6.2.	Düktül demir boru ve bağlantı parçası numunelerinin ortalama sonuç değerleri.....	116
Tablo 6.3.	Düktül demir boru ve bağlantı parçası numuneleri için sertlik ölçüm sonuçları.....	121
Tablo 6.4.	Düktül demir boru ve bağlantı parçalarının çekme mukavemeti ve % uzama değerleri.....	125
Tablo 6.5.	Düktül demir boru numunelerinin darbe test sonuçları.....	129
Tablo 6.6.	Düktül demir boru ve bağlantı parçası için kimyasal bileşim.....	137

ÖZET

Anahtar Kelimeler: Düktil Demir, Modül, Mikroyapı, Grafit, Aşılama, Isıl İşlem

Mekanik özellikler bakımından çelik döküme özdeş, üretim yöntemi ve ucuzluk yönüyle pik (gri) dökme demir karakteri taşıyan düktil demir malzemeler bütün kesit ölçülerinde üretilebilir. Bununla birlikte sünek çok ince kesitler üretmek her zaman mümkün olmaz. İnce kesitlerde sünekliliği geliştirmek için ısıl işleme ihtiyaç duyulmaktadır.

Düktil demir borular 1970 yılından sonra su iletiminde yoğun olarak kullanılmışlardır. Bu boruların ana malzemesi olan düktil demir 1948 yılında tesadüfen bulunmuştur. Dökme demirler ailesinin en önemli üyesi olan düktil demir, küresel grafitli dökme demir olarak ta anılmakta olup yeni malzemeler gurubuna girer. Tecrübe bilgileri göstermiştir ki, korozyona direnç en az mekanik özellikler kadar önemlidir ve boru ömrünü etkilemektedir. Düktil demir borular, atası olan pik borulardan daha az oranda hasar göstermektedirler.

Bu çalışmada savurma döküm yöntemi ile üretilen düktil demir borular ve kuma döküm yöntemi ile üretilen düktil demirden imal boru bağlantı parçalarının metalografik ve mekanik özellikleri standartlar kapsamında araştırılmıştır. Et kalınlığı ve küre sayısına bağlı olarak numunelerde mikroyapı çalışmaları ve mekanik deneyler detaylı olarak yapılarak sonuçlar literatür ile karşılaştırılmıştır.

Sonuçlar aynı et kalınlığına sahip düktil demir boruların bağlantı parçalarına göre birçok bakımdan üstün olduğunu göstermiştir. Beklendiği gibi aynı et kalınlığında ki parçalarda savurma dökümdeki küre sayısının kuma dökümden 6 – 8 kat daha yüksek çıktığını göstermiştir. Boru mikroyapısında çok fazla (>1100 adet/ mm^2) küre olmasının, mekanik özellikleri olumsuz olarak etkilediği bulunmuştur.

INVESTIGATION OF NODULAR COUNTS IN DUCTILE IRON CASTINGS AND DETERMINATION OF EFFECT OF NODULAR COUNTS ON MECHANICAL PROPERTIES

SUMMARY

Key Words: Ductile Iron, Modulus, Microstructure, Graphite, Inoculation, Heat Treatment

Ductile iron which has high mechanical properties as steel can be produced in all thicknesses and cheap as gray cast iron. It is not possible to produce very thin wall thickness in all time. Thin wall thickness castings need heat treatment for ductility.

Ductile iron has been found accidentally in 1948 and it is the important member of cast iron family. It is also called nodular graphite iron which is classified as new material. Ductile iron pipes have been used in transmission and distribution of water after 1970. Experience showed that corrosion resistance is as important as mechanical properties and it effect pipe and fitting service life.

Microstructural studies and mechanical tests performed according to wall thickness and number of spheres were detailed and compared with literature.

The experimental results showed that centrifugally cast ductile iron pipe has higher mechanical properties than sand mould casting ductile iron fittings which has same wall thickness. It is found that in centrifugal casting, graphite nodule numbers are 6 – 8 times more than sand mould casting. More graphite nodules in pipe microstructure (>1100 count/mm²) affects mechanical properties negatively.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Döküm, sıvı veya ergimiş malzemenin bir kalıba dökülerek katılaştırılmasıdır. İkinci aşamada döküm ve kalıp birbirinden ayrılır. Döküm malzemeleri metal veya metal – dışı olabilir.

Döküm için kalıplar kum veya diğer seramiklerden yapılabildiği gibi, metal veya karbon (grafit) kalıpların da uygulanmada önemli bir yeri vardır. Seramik ve kum kalıplar her döküm için tekrar yapılır.

Savurma dökümünün temel özelliği dökümün katılaşması öncesinde ve sırasında döndürülen bir kalıp içine ergimiş metalin giriştir. Merkezkaç kuvveti proses çeşidine göre beslemede ve şekillendirmede önemli bir rol oynar. Savurma döküm için gereken teçhizat statik döküme oranla pahalıdır. Savurma dökümünün az üretim alanı gerektirmesi onun ilk maliyet dezavantajını yok eder. Savurma döküm; boru, gömlek, bağlantı parçaları, yüksek alaşım türbin kanatları, süs ve dışçilik parçaları ve diğer hassas dökümlerin seri olarak üretimini mümkün kılar.

Dökme demirler ailesinin en bilinen türü olan gri dökme demir, sayısız fayda ve kullanım alanına sahip olmasına rağmen düşük mekanik özelliği onu az tercih edilir yapar. Gri dökme demirin zayıf mukavemet ve süneklik özelliği düktil (küresel grafitli) dökme demir üretimi ile giderilmiştir. Düktil demir ile gri dökme demir bileşimleri arasında küçük sapmalar olmasına rağmen mekanik özellikler, metalografik özellikler, kullanım amaç ve alanları bakımından büyük farklar vardır. Gri dökme demirin yapısında grafitler lamel halindedir. Düktil demirin yapısında ise grafitler küre şeklindedir. Grafitlerin küresel hale dönüşümünü sağlamak için sıvı dökme demire magnezyum (Mg) veya seryum (Ce) saf veya alaşım halinde ilave edilir. Düktil demir talaşlı imalata elverişlidir ve korozyona karşı dayanıklıdır. Dökülecek parçaların tasarım bakımından sınırlanmasına gerek yoktur.

Dökme demirler ailesinin en önemli üyesi olan düktil demir, küresel grafitli dökme demir veya sfere demir olarak anılır. Düktil kelimesi “sünek/kırılmaz” anlamındadır ve yük altında esnek davranışı simgeler. Birçok toprak katmanlarında işletimde olan düktil demir boru ve bağlantı parçaları için ortalama 100 yıl ömür biçilmiştir. Savurma (santrifüj) döküm yöntemiyle üretilen bu boru ve bağlantı parçaları rakiplerinden göreceli olarak pahalı, fakat servis-bakım gereksinimleri çok azdır. Düktil demir boru ve bağlantı parçaları deprem direnci, hidrolik verim ve su kalitesini koruma yönüyle de çok iyi performans sağlar. Bu bağlamda imalat sırasında standartların belirttiği şekilde yapılacak üretim ve deneyler boru ve bağlantı parçalarında ömür, kullanım ve maliyet açısından büyük önem arz etmektedir [1].

Savurma döküm tekniği ile elde edilmiş yüksek nitelikli düktil demir boru ile kuma döküm yolu ile elde edilmiş bağlantı parçalarının incelenmesi çok önemli kamusal faydayı da yanında getirecektir. Giderek düşen malzeme kesit kalınlıklarının yapı ve özelliklere etkisi birçok uyarıcı sonucu da yanında getirecektir. Bu çalışma ile çekintisiz dökümün (savurma tekniği) fayda değeri çok sayıda küre oluşumu ile yok edilmekte midir sorusuna cevap aranacaktır. Diğer soru: Çekinti tehlikesi içeren (gravite döküm) bağlantı parçasının azalan mekanik özelliği makul sayıdaki küre oluşumu ile dengelenmekte midir? Boru ve bağlantı parçası üstünde yürütülen yapı – özellik incelemeleri ve mukayeseler bu malzemeleri kullanan kuruluşlar için yol gösterici olacaktır.

Bu çalışmada savurma döküm yöntemi ile üretilen düktil demir borular (GGG 40) ve kuma (dolu kalıba) döküm yöntemi ile üretilen düktil demir boru bağlantı parçalarının (GGG 40) metalografik ve mekanik özellikleri karşılaştırılmıştır. Farklı et kalınlıklarında seçilen numuneler üzerinde mikroyapı çalışmaları, çekme, sertlik ve darbe testleri uygulanarak çeşitli mukayeseler yapılmıştır. Küre sayısına bağlı olarak mekanik özelliklerin nasıl değiştiği tespit edilmiştir. Buradan elde edilen bulgular ışığında çeşitli oluşumların neden ve nasıl gerçekleştiği araştırılmıştır.

BÖLÜM 2. SAVURMA (SANTRİFÜJ) DÖKÜM

2.1. Giriş

Savurma dökümünün kökeni uzun zamana dayanmaktadır ve ilk patent 1809 yılında A.G. Eckhardt tarafından alınmıştır. Bu yöntem, 1920' den sonra büyük çapta dökme demir boruların üretimi için kullanılmış, daha sonraki yıllarda alaşım ve parçaların şekil ve çeşitleri daha da genişletilmiştir.

Dönmeyle meydana gelen merkezkaç kuvvet normal hidrostatik kuvvetler ile karşılaştırılır ve kuvvet iki şekilde kullanılır. Bunlardan ilki dökümde görülür ve burada kuvvet bir kalıbın yüzeyleri üzerine sıvı metali dağıtmakta kullanılır. Bu merkezkaç kuvvet içi boş silindirlerin ve diğer halka şeklindeki biçimlerin oluşturulmasını sağlar. İkincisi, katılaşma boyunca dökümde yüksek basıncın oluşmasıdır. Bu durum yönlendirilmiş katılaşma ile birlikte beslemeye yardım eder ve çökelti gazlarının ve metalik olmayan inklüzyonların ayrılmasını hızlandırır. Prosesin ana avantajları; silindirik dökümün oluşturulması ve ürünün yüksek metalurjik kalitesidir.

Boru ve tüpün dökümü kendi eksenini etrafında bir kalıbın dönmesiyle sağlanır. Boru veya tüp içindeki boşluk yalnız merkezkaç kuvveti ile meydana gelir ve giren metalin hacmiyle cidar kalınlığı belirlenir. Bu uygulama gerçek savurma döküme örnek olarak gösterilir. Düzensiz cidar kalınlığı veya değişen iç çaplı bir parça olduğu durumda, bir merkezi maça parçası iç çevreleri biçimlendirmede kullanılabilir. Besleyiciler katılaşma esnasında meydana gelen büzülme önler. Savurma döküm çeşitleri arasında yarı savurma döküm, savurmalı veya basınçlı döküm de gösterilebilir. Her iki durumda da, dökümler maça parçaları ve kalıp sayesinde tamamen şekillendirilir, merkezkaç kuvvet öncelikle besleme için bir basınç kaynağı gibi kullanılır. Dönme eksenini yatay, düşey veya eğik olabilir. Sıvı

metalin giriş yöntemi ve kalıp malzemesi itibariyle savurma dökümün önemli çeşitleri vardır. Savurma döküm yönteminin önemli avantajları aşağıda verilmiştir.

- a. Düşük yoğunluklu metalik olmayan inklüzyonlar iç yüzeye doğru taşınacağından, basit bir talaş kaldırma işlemi ile temiz bir döküm elde edilir,
- b. Yöntem oldukça yüksek bir döküm basıncı sağladığından ve dolayısıyla iyi besleme nedeniyle dökümün sağlamlık derecesini yükseltir,
- c. Sıvı metalin kalıba yüksek hızla beslenebilmesi döküm sıcaklığının daha düşük tutulmasına imkan verir. Düşük döküm sıcaklığı ise gaz absorpsiyonunu azaltır ve tane boyutunun küçülmesine sebep olur.

Savurma dökümün ilk yatırım maliyeti nispeten yüksektir. Genellikle belli aralıklarda az miktarda sıvı metal gerekir ve özgül ağırlıkları çok farklı metallerin alaşımları, katılaşmada tabakalaşma nedeniyle zor dökülürler.

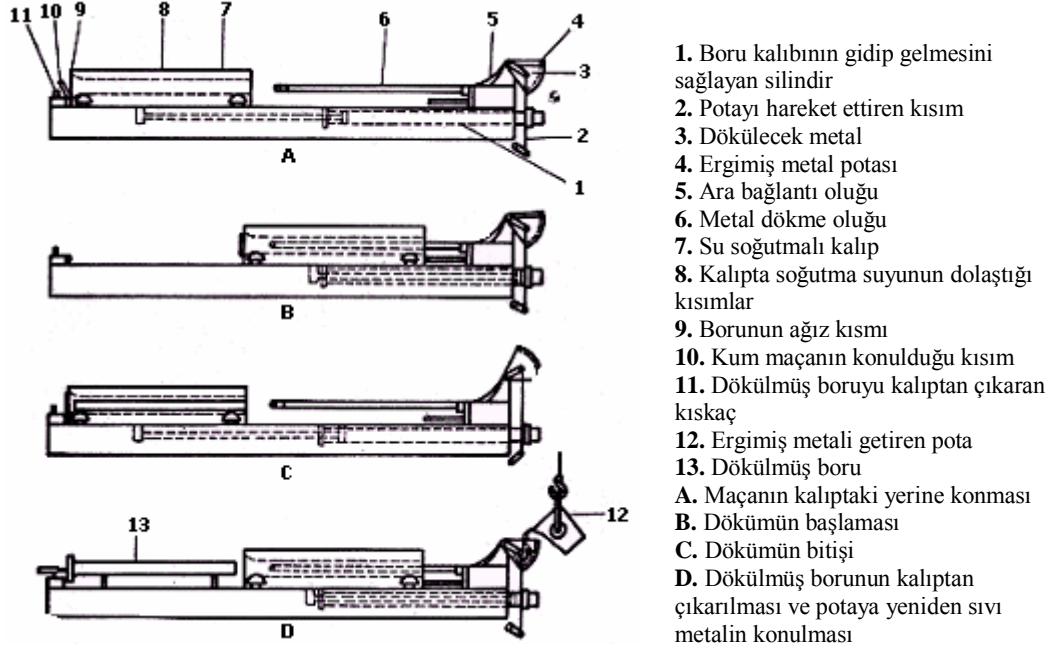
Otomasyon ve diğer imkanlar savurma dökümde gelişmeyi sağlamış olup, küçük dökümhaneleri devre dışı bırakmıştır. Birçok savurma döküm tesisi; makine bölümü, ısıl işlem, özel ergitme ve komple test bölümlerini içerir.

Ortalama olarak ilk yatırım maliyeti dövme ve ekstrüzyon tesislerinde en çok, statik kum dökümde en azdır. Savurma döküm ise ikisinin arasındadır. Savurma döküm müşteri talebine göre, dış çap, et kalınlığı, alaşım tipi ve işlenme durumu belirlenerek yapılır. Flanşlar, düzensiz dış şekiller dövme ile ekonomik olarak üretilirler, fakat bu uygulama için savurma döküm de uygundur. Her iki metot ta statik kum döküme göre yüksek verimlilik sağlar.

2.2. Savurma Döküm Prosesi

Savurma dökümde merkezkaç kuvvetlerinin oluşturduğu basınç, metalin kalıp cidarına homojen olarak dağılmasını ve parçanın dışının kalıbın iç şeklini almasını sağlar. Oluşan yüksek merkezkaç kuvveti sayesinde dökülen sıvı metal içinde bulunan düşük yoğunluklu kum ve cüruf tanecikleri, metal olmayan kalıntılar ve

gazlar dönme eksenine doğru sürüklenir. Dolayısıyla bu yöntemle parça yüzeyini gözeneksiz, temiz ve ince taneli olarak elde etmek mümkün olur (Şekil 2.1).



Şekil 2.1. Savurma döküm yöntemi ile bir borunun üretimi [2]

Savurma dökümde sıvı metal merkezkaç kuvveti altında kalıp cidarlarına doğru hareketlenir. Bilindiği gibi bir cismin üzerine etki eden merkezkaç kuvvet, dönme yarıçapı ve dönme hızının karesi ile orantılıdır.

$$F_c = m \cdot r \cdot \omega^2 = m \cdot v^2 / r \quad (2.1)$$

Burada;

F_c = Merkezkaç kuvveti (N),

r = Dönme yarıçapı (m)

m = Dönen cismin kütlesi (kg),

ω = Açısal hız (sn^{-1})

v = Çevresel hız ($\text{m} \cdot \text{sn}^{-1}$),

g = yerçekimi ivmesi (m/sn^2)

Aynı kütleye etkiyen yer çekimi kuvveti;

$$F_g = m \cdot g \quad (2.2)$$

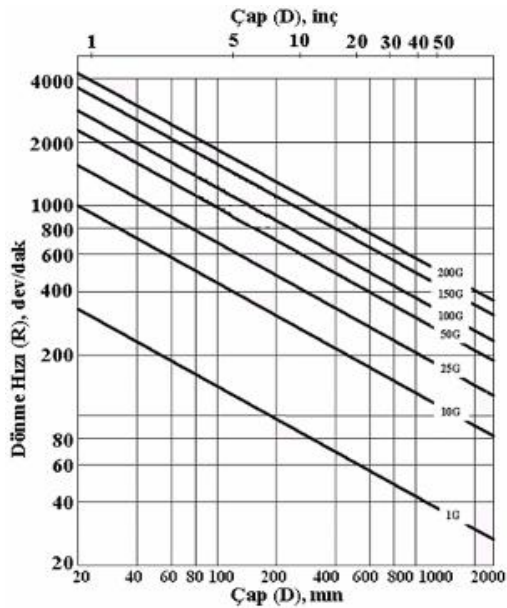
Dönme esnasında artan savurma kuvvetin, yerçekimi kontrollü düşey kuvvete oranı aşağıda verilmiştir. Daha uygun bir hız birimi olan, N (devir/dk) ile ifade edilir;

$$G_{factor} = \frac{F_c}{F_g} = \frac{r \cdot \omega^2}{g} \quad G_{factor} = \frac{r}{g} \left(\frac{\pi}{30} \right)^2 N^2 = \frac{0,11r \cdot N^2}{g} \quad (2.3)$$

$$N = \left[\frac{G_{factor} \cdot g}{0,001r} \right]^{1/2} = 29,9 \left(\frac{G_{factor}}{r} \right)^{1/2} = 42,3 \left(\frac{G_{factor}}{D} \right)^{1/2}$$

D = Dönme çapı (m)

Dönme hızı, çap ve merkezkaç kuvvet arasındaki ilişki Şekil 2.2' de grafiksel olarak gösterilmiştir. Bu ve benzeri grafikler veya çözüm grafikleri çoğunlukla gerekli merkezkaç kuvvetinin büyüklüğüne uygun olarak dönme hızının seçilmesinde kullanılır.



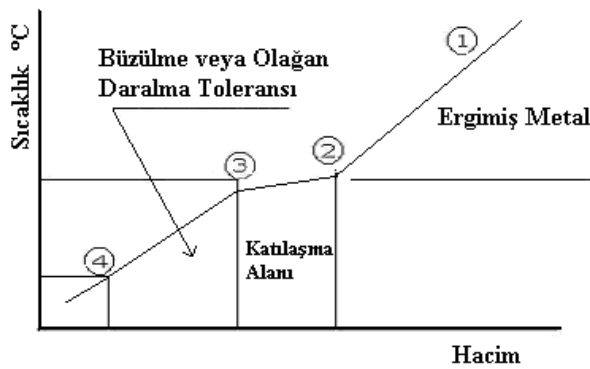
Şekil 2.2. Merkezkaç kuvvetinin farklı değerleri için çap ve dönme hızı arasındaki ilişki [2]

Gerekli kuvvetin seçimi için standart bir kriter yoktur. Ancak bazı araştırmalara göre minimum sınırın 3 – 4,5 G mertebesinde olduğu ileri sürülmüştür. Ancak yöntemin bütün avantajlarından yararlanmak için uygulamada çok daha yüksek kuvvetler kullanılmaktadır.

Örneğin dökme demir boru dökümünde optimum değerler 80 – 130 G arasında olmaktadır. 80 G’ den az ivme sağlayan hızlarda döküm yapıldığında türbülans oluşması söz konusudur. 160 G’ ye tekabül eden hızlardan daha yüksek hızlarda ise kalıp ömrünün azalması söz konusudur. Bir genelleme olarak, gerçek savurma döküm uygulamaları için 60 – 80 G, yarı savurma döküm için 15 – 30 G değer aralıkları verilebilir.

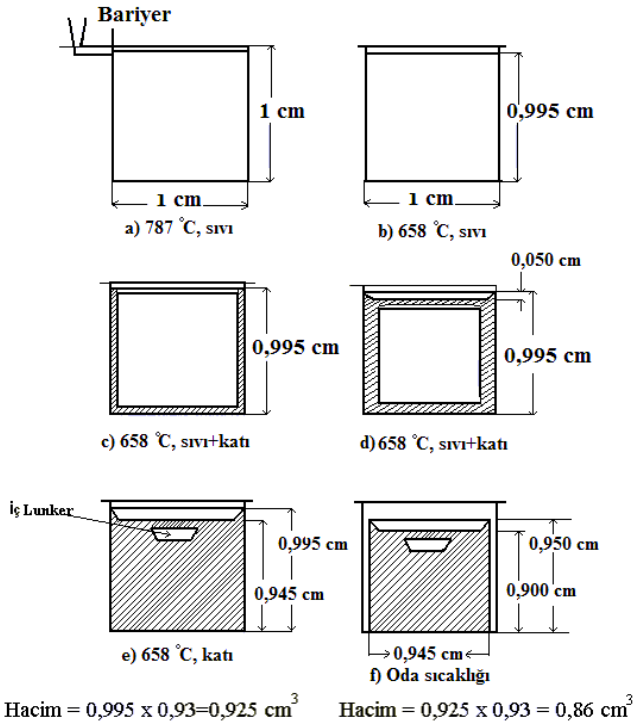
Savurma dökümde sıvı metal verme ve katılaşma dinamik şartta oluşur. Kalıp dönerken, döküm ve katılaşma gerçekleşir. Bazı hallerde (düşey savurma döküm), kalıp döküm sırasında hareketsizdir. Makine, dolum devam ederken veya tamamlandıktan sonra döndürülür. Yatay savurma dökümde kalıbın dönmesi metal verme sırasında yavaş, katılaşma sırasında hızlı olabilir.

Sıvı katı dönüşümü birçok metal ve alaşımda büzülme ile sonuçlanır. Bütün metaller ve alaşımları, sıvı fazdan katı faza geçerken “katılaşma çekintisi” denilen bir hacimsel daralmaya maruz kalırlar (Şekil 2.3’ deki 2 ve 3 nolu noktalar). Bunun miktarı %5 ve üzeri olursa önemli olur. Tedbir alınmaması durumunda yapıda dağılmış gözenekler, boşluklar meydana gelir. Döküm üretimi sırasında tedbir alınarak bu boşluk yönetilmelidir. Aksi durumda boşluk parça içinde oluşur ve sapma (ıskarta) nedeni olur.



Şekil 2.3. Katılaşma esnasında hacimdeki değişim [3]

Şekil 2.4 de saf alüminyum bir küpün katılaşması sırasındaki hacim daralması ve Şekil 2.5 de farklı dökümlerin katılaşma davranışları gösterilmektedir.



Şekil 2.4. Yavaş soğuma esnasında alüminyum küpün büzülmesi [3]

Döküm sıcaklığından katılaşıma bitimine kadarki hacim daralması;

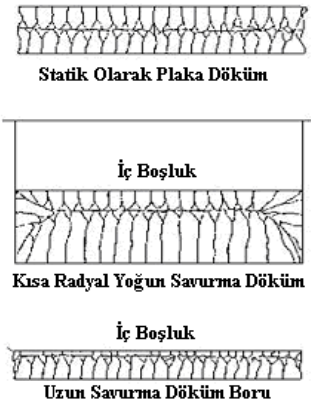
$$\Delta V = [1 - (0,995 \times 0,93)] / 1 = 0,075 \rightarrow \%7,5 \text{ (iç lunker)}$$

$$\Delta V = [1 - (0,995 \times 0,945)] / 1 = 0,059 \rightarrow \%5,9 + \%1,6 \text{ (iç lunker)} = \%7,5$$

Döküm sıcaklığından oda sıcaklığına kadarki hacim daralması;

$$\Delta V = [1 - (0,945 \times 0,900)] / 1 = 0,15 \rightarrow \%15 \text{ veya}$$

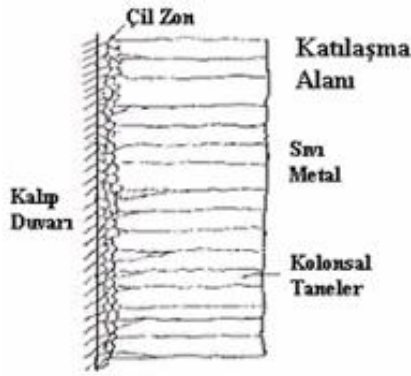
$$\Delta V = [1 - (0,925 \times 0,93)] / 1 = 0,14 \rightarrow \%14 \text{ olarak hesaplanır.}$$



Şekil 2.5. Farklı dökümlerin katılaşıma davranışı [3]

Savurma dökümde gaz ve çekme boşluğu statik döküme göre göreceli olarak çok azdır. Savurma döküm yapısında aşağıda verilen yapılar veya zonlar (bölgeler) oluşur (Şekil 2.6).

- Çil Zon: Küçük eş eksenli kristallerden oluşan kalıp yüzeyindeki ince ilk tabaka,
- Kolonsal Zon: Çil kristallerden gelişen ve kalıp yüzeyine dik büyüyen boyuna kristaller,
- Eşeksenli Zon: Kolonsal kristallerin önünde büyüyen çok sayıda büyük eşeksenli kristaller.



Şekil 2.6. Tipik tane büyümesi [3]

Bu zonlardan ilki ihmal edilebilecek kadar küçük bir alan kaplarken, ikinci ve üçüncü yapı katılma parametrelerine bağlı olarak gelişir.

Çıkıcı ve besleyici ilaveleri ile katılma çekintisi (boşluğu) sonradan kesip atılacak bu zonlardan sağlanır. Katı halde büzülme kalıba pay olarak verilmeli ve ister statik ister savurma döküm olsun kalıplar büyük yapılmalıdır.

Eğer kalıp olması gereken parça ölçülerinden büyük olarak yapılmamış ise parça istenenden küçük boyutlarda elde edilir. Bunun için toleransların iyi hesaplanıp verilmesi gerekir. Buna “kalıpcının çekinti toleransı” denir ve bu parçanın geometrisine ve döküm metoduna bağlıdır (Tablo 2.1).

Tablo 2.1. Kalıpcının çekinti (çekme) toleransı [3]

Döküm Alaşımı	Metre Başına Tolerans (mm)
Alüminyum alaşımları	13
Alüminyum bronz	21
Pirinç, sarı (kalın)	13
Pirinç, sarı (ince)	16
*Dökme demir, gri	8 ile 13 arasında
Dökme demir, beyaz	21
Kalay bronzu	16
Top metali	10 ile 16 arasında
Kurşun	26
Magnezyum	21
Magnezyum alaşımları (%25)	15
Mangan bronzu	21
Bakır- nikel	21
Nikel	21
Fosfor bronzu	10 ile 16 arasında
Çelik (karbonlu)	16 ile 21 arasında
Çelik (kromlu)	21
Çelik (manganlı)	26
Kalay	21
Çinko	14

*Dökme demirlerde çekme dökümün soğuma hızına bağlıdır. Hızlı soğumada çekilme büyük olur.

Tablo 2.2 de savurma döküm uygulamaları ve Tablo 2.3 de savurma dökümün endüstrideki kullanım alanlarına örnekler verilmiştir.

Tablo 2.2. Savurma döküm uygulamaları [3]

- Dirsekler	- Fren tambur gömlekleri
- Silindir gömlekleri	- Baraj açma silindirleri
- Tekstil merdaneleri	- Vana gövdeleri ve karteller
- Roket ve füze kanatçıkları	- Silindirler ve merdaneler
- Enjektör kutuları	- Kağıt haddeleri ve tamburlar
- Piston segmanları	- Basınç kapları
- Makaralar ve kasnaklar	- Pompa gömlekleri, bi-metal olarak
- Isı dönüştürücü tüpler	- Ekstrüzyon için cidar kovanları
- Menteşeler	- Vinç tamburu
- Kaynak çubukları	- Hidrolik ve Pnömatik silindir tüpleri
- Çarklar ve kanatçıklar	- Hassas dökümler
- Flanşlar	- Ocaklar ve fırın rayları
- Gaz türbin kanatları	- Dişliler, bi-metalik dişli boşlukları
- Şnorkel borular	- Dişçilik
- Silah gömlekleri ve yatakları	- Rotorlar
- Çeneli kavramalar	- Elektronik modül sargıları ve kapakları
- Basınç pervane ve kovanları	- Manşonlar
- Vanaların bilyeleri	- Yapısal sütunlar
- Motor pompalarını saran ceketler	- Türbin kanatları
- Elektrik motor pervaneleri (alüminyum ve bronz)	- Namlu kızağı kovanları ve yatakları
- Çelik hadde merdaneleri, bi-metalik ve çelik haddeler	- Deniz altında kullanılan kaldırma sütunları
- Yataklar, yatak burçları ve kafesler	- Dökme demir yağmur suyu boruları, döküm hali koşulu
- Isıya dayanıklı çelikler (dış döküm)	- Atomik güç merkezlerindeki reaktör tüpler ve silindirler
- Yalıtma segmanları ve metal O-ringler	- Somunların bağlanmasını sağlamak için kullanılan dirsekler
- Demir yollarında kullanılan araçların tekerleri ve yatakları	- Reaktör tüplerinde ve atomik güç eldesinde kullanılan silindirler
- Kirli su tasfiye için kullanılan dökme demir kanalizasyon boruları, döküm hali koşulu	- Düktil döküm yöntemiyle dökülen basınçlı borular (su boruları ve gaz boruları), döküm hali koşulu
- Kuyumculuk (altın, gümüş, platinyum, kurşun kalay alaşımı ve bronzlar)	- Yüksek sıcaklıklı ısıtıcılarda ısıya dayanıklı dairesel tüpler, döküm hali koşulu

Tablo 2.3. Savurma dökümün endüstrideki kullanım alanları [3]

Standart Endüstriyel Sınıflandırma (SIC)	Endüstri
13	Petrol ve doğal gaz üretimi
22	Tekstilde merdane üretimi
24	Kereste ve odun üretimi
26	Kağıt ve benzeri ürünlerin üretimi
28	Kimyasal ve benzeri ürünlerin üretimi
29	Petrol rafinerisi ve benzeri endüstriler
32	Taş, kil ve cam üretimi
33	Birincil metal üretimi
35	Makineler(elektrik hariç)
3519	İçten yanmalı motorlar
3523	Çiftlik makineleri
3531	İnşaat makineleri
3532	Maden makineleri
3533	Petrol sahasındaki makineler
3535	Konveyörler ve taşıyıcı takımlar
3536	Yük asansörleri ve vinçler
3537	Endüstriyel kamyonlar
3542	Makine aletleri
3544	Özel kalıplar ve takımlar
3547	Haddeleme makineleri
3549	Metal işleme makineleri
3551	Yiyecek üreten makineler
3561	Pompa ve kompresörler
3562	Bilye ve makaralı yataklar
3566	Dişliler
3567	Endüstriyel fırınlar ve ocaklar
3711	Motorlu taşıtlar
3714	Motor taşıt parçaları
3720	Uçak parçaları

Savurma dökümün avantajları;

- a. Üretim hızı yüksektir,
- b. Boru ve bunun gibi parçalar maça kullanılmadan dökülebilir,
- c. Gözeneksiz ve temiz bir içyapı elde edildiğinden, bu yöntemle dökülen malzemenin mekanik özellikleri diğer yöntemlerden daha üstündür,
- d. Parça toleransları dar, yüzeyleri kalitelidir,
- e. Yolluk sistemi olmadığından, hurdaya atılan malzeme çok azdır,
- f. Kalıbın ince cidarlı bölümleri kolaylıkla dolar,
- g. Ergimiş metali besleme hızı yüksek olduğundan, döküm sıcaklığı düşük seçilebilir,
- h. Yollukta (tandiş) az metal kaybı, kanal ve çıkıcı/besleyici gerektirmez,
- i. Metal dışı inklüzyonlar boru iç yüzeyinde toplanır ve talaşlı işlemlerle kaldırılabilir.
- j. Bi-metalik boru üretimi ve metal matris kompozit üretimine elverişlidir.

Savurma dökümün dezavantajları;

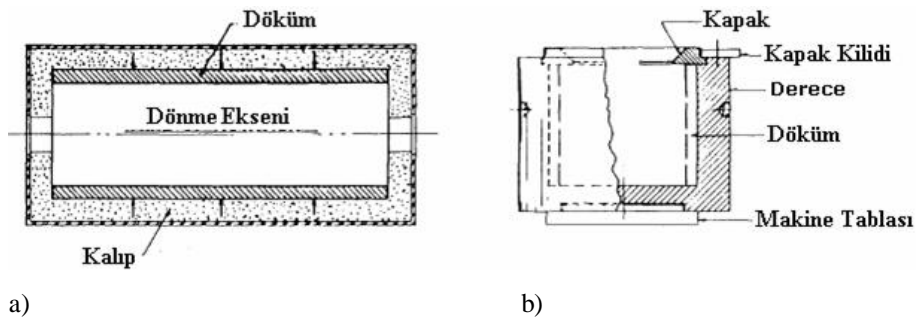
- Dökülebilen parça biçimleri sınırlıdır,
- Döküm makinesi yüksek bir yatırım gerektirir,
- Yoğunlukları farklı olan bileşenler içeren alaşımlarda ağırlık segregasyonu görülebilir.

2.3. Savurma Döküm Metodları

Farklı savurma döküm yöntemlerine geçmeden önce, temel olarak “dikey” ve “yatay” savurma döküm makinelerinin kullanıldığını belirtmek gerekir. Bu makineler dönme eksenine bağlı olarak tanımlanır. Savurma gücünün kullanıldığı üç döküm metodu vardır ve tümü savurma döküm diye anılırlar. Bunlar, gerçek savurma döküm, yarı savurma döküm ve savurmalı dökümdür.

2.3.1. Gerçek savurma döküm

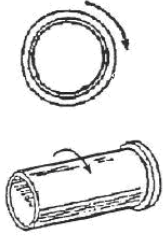
Sistemde maça yoktur. Sıvı metal ısı dış kalıp tarafından emilir. Havanın zayıf iletkenliği nedeniyle merkez kısımdan ısı kaybı yoktur veya çok azdır. Böylece dıştan içe mükemmel yönlendirilmiş katılaşma görülür. Taneler kolonsal formdadır. Dıştan başlayan katılaşma ve büzülme devamlı sıvı ile karşılanır ve son yapıda çekme porozitesi görülmez. Gerçek savurma döküm ve metal kalıp için örnek resimler Şekil 2.7’de verilmiştir.



Şekil 2.7. Gerçek savurma döküm

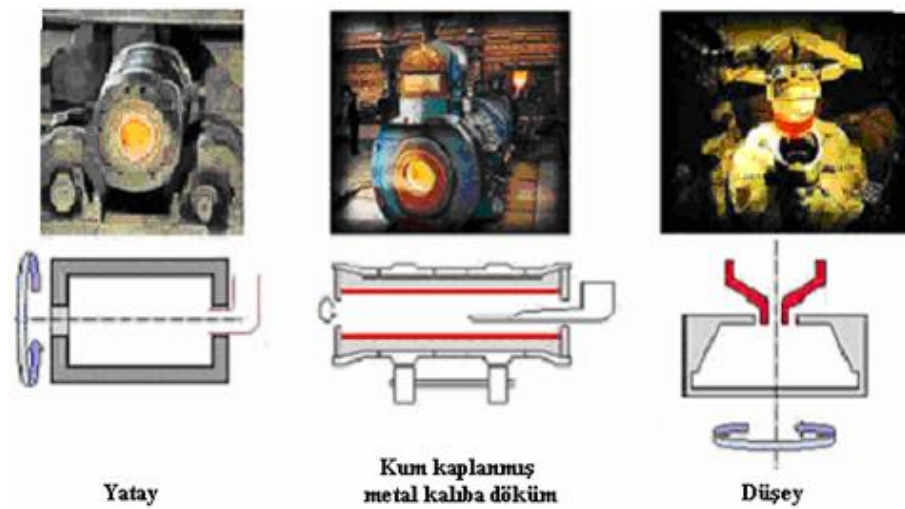
- Silindirik döküm, gerçek savurma döküm,
- Düşey döküm makinesi için metal kalıp [3]

Boru üretiminde (Şekil 2.8) genellikle tercih edilen yatay eksen savurma dökümde, iç boşluklar maça kullanılmadan elde edilebilir. Parçanın istenilen et kalınlığı, kalıp içine dökülen ergiyiğin miktarının ayarı ile mümkündür. Dönme eksenini yatay veya düşey olabilir. Dökülecek parça sayısı az ise kalıplar kum esaslı malzemedir yapılır. Seri üretimde ise su ile soğutulan metal kalıplar kullanılır.



Şekil 2.8. Gerçek savurma döküm yöntemi ile üretilen boru şeklindeki parça [4]

Şekil 2.9’ da dönme açısı yatay ve düşey olan bir gerçek savurma döküm makineleri görülmektedir. Altta iki teker yere sabitlenmiş olup üstündeki boru şeklindeki kalıbı bir motor yardımıyla döndürmektedir. Çıkan ürünün (boru) boyu isteğe göre, kalıp ve tekerler büyütülerek ayarlanabilir. Eksenel dönmeden dolayı olan merkezkaç kuvveti sayesinde eriyik kalıp içine homojen olarak dağılır. Bu özellik kullanılarak dökülecek malzemenin miktarı ayarlanır ve istenen boru kalınlığı elde edilir (bilinen yoğunluk, sabit boy ölçüsü ve et kalınlığıyla çap orantısı).



Şekil 2.9. Gerçek savurma döküm makineleri [5]

Şekil 2.9’ da yatay eksenli makinede tekerlerin erkek olduğu ve kalıbın dişi olduğu görülür. Kalıbın böyle tasarlanmasının nedeni üstündeki kalıbın dönerken sağa veya sola kaymasını önlemektir. Sol taraftaki motor çalıştığında belirli bir dönme kuvveti elde edilir. Bu kuvvet kayışlar yardımı ile tekere iletilir. Yakın taraftaki tekerin dönmesi yeterli olup, kalıbı döndürür. Kalıp dönerken düşmesini önlemek için ikinci teker konur. Bu ikinci teker kalıbın ileri geri oynama hareketi yapmasını önler. Tekerler yüksek hızlara ulaştığından ısınır ve bu ısınmanın kalıba geçip ergiyiği kötü etkilemesini önlemek için devamlı su tutulur. Tutulan suyun dışarıya çıkmasını ve yüksek hızda dönen kalıptan kaynaklanan herhangi bir kazayı önlemek için makinenin etrafına koruma paneli yerleştirilir.

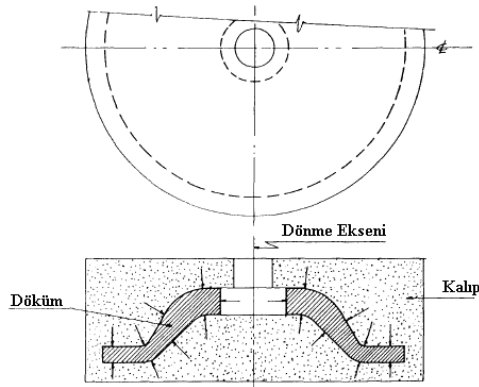
Kalıbın içine her dökümden sonra refrakter boya sürülür. Bu boya malzemenin yapışmasını önler ve yüzeyin temiz olmasını sağlar. İmalatçı tarafından uygun görüldüğü takdirde bazı alaşımları dökmeden önce kalıbın iç çevresine maçalar konur. Bu maçalar kumdan yapılıdır. Bilindiği gibi kumun ısı geçirgenliği düşüktür. Bu maçalar sayesinde kalıbın ısı kaybetmesi önlenir, soğuma gecikir, taneler daha büyük olur, malzemenin içinde ve dışında aynı büyüklükte taneler oluşur. Örnek olarak işlemede, işleme kabiliyetinin iyi olması için malzemenin her yerinde sertlik az olmalı ve genleşme farklılıkları olmamalıdır.

2.3.2. Yarı savurmalı döküm

İç kısmın düzensiz şekli nedeniyle maça kullanılır. Katılaşma hem içe, hem de dışa doğru devam eder. Besleme savurma kuvveti ile yapılıdır ve çok yüksek çıkıcı etkisi (30 m’ lik sıvı metal yüksekliği gibi) oluşturur. Muhtelif tipte yolluk ve kanallar kullanılır. Bazıları çıkıcı görevi görür.

Çok ince kesitli parçaların üretiminde de savurma döküm yönteminden yararlanılabilir. Bilindiği gibi çok ince kesitlerin statik döküm yolu ile dökülmesi zordur ve sıvı metal döküm boşluğunu tam olarak doldurmadan katılaşabilir, ince kesitlere de döküm tam olarak ilerlemeyebilir. Savurma döküm yöntemi uygulanarak metale merkezkaç kuvveti vasıtası ile ilave bir güç verilerek tam olarak parçayı doldurması sağlanır.

Genellikle düşey olan dönme ekseni aynı zamanda parçaların dönele simetri eksenidir ve kalıplar birkaç parça üst üste dökülebilecek şekilde düzenlenebilir. Kalıplar yaş kum, kuru kum, metal veya diğer uygun malzemelerden yapılabilir. Cüruf, oksit ve kum orta kısımda toplanır. Bu olay yoğunluk farkından yararlanılarak gerçekleşir. Yoğunluğu fazla olan ileri gider, az olan ise ortada toplanır (Şekil 2.10). Yarı savurma döküm, dönele simetriye sahip, ancak iç boşluk içermeyen tekerlek ve dişli taslakları gibi parçaların üretiminde kullanılır.



Şekil 2.10. Yarı savurma dökümde dökümler ne silindirik nede yuvarlaktır, fakat kendi eksenini etrafında döner ve yarı savurma döküm olarak adlandırılır. Oklar soğuma yönünü göstermektedir [3]

2.3.3. Savurmalı döküm

Bu metotta (genellikle düşey bazen yatay) merkezi bir yolluk vardır. Bu yolluk simetri eksenini (dönme ekseni) içine alır. Kalıp boşlukları salkım gibi, merkeze göre simetrik olarak dizilirler. Bu boşluklar radyal kanallarla yolluğa bağlıdır. Bu yöntemle sadece küçük dökümler, bağlantılar, vana gövdeleri, yolluklar, tıkaçlar üretilebilir. Sistemin ideal yönlenmiş katılma vermesi için, hünarli işçilik gerekir ve katılma uzak köşelerden başlatılıp yolluğa doğru ilerletilmelidir.

Parçalara ait kalıp boşluklarının kalıp dönme ekseninin dışına yerleştirilmesi bu tip dökümün özelliğidir. Metal, aynı zamanda dönme ekseni olan düşey bir yolluktan beslenir ve yatay yolluklardan geçerek kalıp boşluğuna ulaşır.

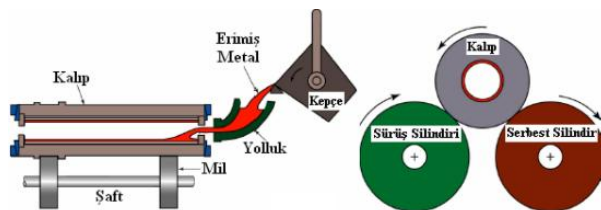
2.4. Savurma Döküm Makine Tipleri

Çok çeşitli savurma döküm makineleri vardır. Bunlardan önemli olanları ve yoğun olarak kullanılanları yatay ve düşey eksenli savurma döküm makineleridir. Bu iki önemli makine dışında yüz – plaka savurma döküm makineleri, eğimli eksen savurma döküm makineleri, dönen masa savurma döküm sistemleri, tepe ve alt savurma döküm makineleri, ferris tekeri savurma döküm makineleri, düşey hadde savurma döküm makineleri, babet savurma döküm makineleri, vakum savurma döküm makineleri ve hassas savurmalı döküm makineleri de kullanılmaktadır.

2.4.1. Yatay eksenli savurma döküm makineleri

Yatay eksenli savurma döküm makinesi ile genellikle uzun silindirik parçalar (boru gibi) üretilir. Yeraltında su ve gaz iletiminde kullanılan boruların dökümü çok önemlidir. Dış çapları aynı, iç çapları farklı çember şeklinde parçalar üretilir. Parça uzunluğu iç çapın iki katından fazla ise yatay döküm makineleri tercih edilir.

Statik yatay döküm, düşey kuma döküm ve savurmalı düşey dökümün birçok sakıncaları vardır (maça eğilmesi ve iç kesit üniformsuzluğu gibi). Bundan dolayı borular ve birçok silindirik parçalar yatay olarak savurma döküm tekniği ile dökülür. Kaliteli ve hızlı boru dökümünde, yatay eksenli savurma döküm makineleri çok popülerdir. Boru üretiminde, borunun ağız kısmı hariç maça kullanılmaz. Borunun iç boşluğu kendiliğinden oluşur. Sıvı metal, merkezkaç kuvvetin etkisi ile kalıp yüzeylerine yapışarak dökülecek parçayı meydana getirir. Savurma dökümde metal, özel durumlarda grafit veya kum kalıplar kullanılır. Döküm yapılırken kalıbın dönme sayısı (devir/dk) çok önemlidir (Şekil 2.11).

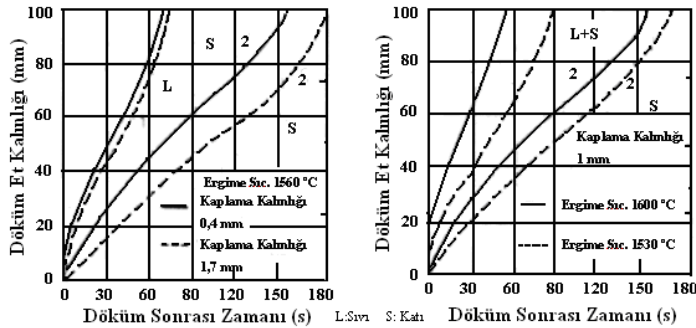


Şekil 2.11. Yatay eksenli savurma döküm makinesinin kesiti (kısa boru veya gömlek üretimi)

Yatay savurma dökümde, kalıp duvarı su ile soğutularak döküm katılaştırılır. Katılaşma dökümün dış çapından başlar, iç çapına doğru ilerler. Katılaşmayı aşağıdaki farklı parametreler etkiler.

- Kalıp kalınlığı, kalıp malzemesi ve ilk kalıp sıcaklığı,
- Kalıp kaplama kalınlığı ve termal iletkenlik,
- Döküm durumunda sıcaklık, döküm hızı ve dönme hızı,
- Sistemdeki titreşim.

Kalıp yukarıda verilmiş parametrelere göre katılaşmaya nispeten az etki yapar. Kalıpta kalınlığında yüksek titreşim olabilir. Ayrıca yukarıdaki parametreler sıvı metal sıcaklık derecesinde ve kalıp kalınlığındaki aşınmada çok etkilidir. Şekil 2.12’de kalıp kaplama kalınlığı ve katılaşma hızında fazla ısıtma (superheat) derecesinin genel etkileri görülmektedir. Bu şekilde öngörülen toplam katılaşma zamanı kullanılmıştır. Bi metalik boruların optimum döküm durumlarının özellik faydasına karar vermek için bu temel bağı ihtiyacı vardır.

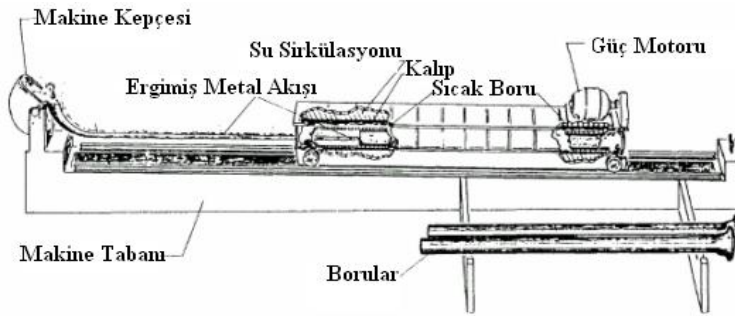


Şekil 2.12. Döküm et kalınlığının döküm sonrası zamanla ilişkisi [6]

2.4.1.1. De Lavaud prosesi

Boru üretiminde devrim niteliğindeki bu teknik 20.yy başlarında bir Brezilyalı (De Lavaud) tarafından bulunmuştur ve günümüzde en yaygın olarak kullanılan yöntemdir. Her iki dakikada bir döküm elde edilebilir. Modern iki kademeli ve eski 4 kademeli makineler kullanımdadır. Otomatik maça yükleyici ve tam boy çıkartıcı içerirler.

Borunun yapımı sırasında kalıbı taşıyan gövdenin ray üzerindeki hızı ve metal potasının dönme hızı iyi ayarlanmalıdır. Borunun şeklini veren metal kalıp, makinenin gövdesi içine yerleştirilmiştir. Kalıp, rulolar üzerinde kendi ekseninde dönmektedir. Kalıbın dönme hareketi, motor ve dişliler tarafından sağlanır. Bu arada kalıbın ileri – geri hareketi, ray üzerinde hareket eden tekerleklerle olur. Tekerleklerin dönüşü, bir hidrolik sistem tarafından sağlanır. Dökülecek olan ergimiş metal potaya doldurulur. Kalıp döndürülmeye başlanır. Ergimiş metal potadan oluğa verilir. Oluk içinde akan metal uçtan dönmekte olan kalıp içine dökülmeye başlar. Ergimiş metal bir spiral şeklinde kalıba yapışır ve 4 – 6 saniye içinde katılır. Kalıp aynı zamanda ray üzerinde hareket ettiği için oluk ucundan uzaklaşır. Böylece spiraller yan yana sıralanırken boruyu meydana getirirler (Şekil 2.13).



Şekil 2.13. Metal kalıplarda boru üretimi için kullanılan savurma döküm makinesi [3]

2.4.2. Düşey eksenli savurma döküm makineleri

Düşey eksenli döküm sabit kum kalıpta yapılabildiği gibi, savurma döküm tekniği de önemli bir seçenektir. Örneğin boru dökümü, kum kalıpların 20 – 25 tanesi bir araya konularak yapılır. Bu döküm yönteminin birçok sakıncası bulunmaktadır. Kum kalıp içine dik olarak konulan çok uzun maçalar zamanla eğilir. Maça desteği ise, kum yüzeye batarak borularda zayıf noktalar meydana getirir. Ayrıca borunun üst kısımlarında cüruf ve oksit toplandığından hata oranı yüksektir. Dökülen boruların yapısında büyük grafit yaprakçıkları olduğundan, dayanımları savurma döküm ürünlerine göre daha az olmaktadır.

2.5. Kalıplar

Savurma dökümde kullanılan kalıplar tükenen ve sabit (grafit, metal) kalıplar olmak üzere ikiye ayrılır. Uygulamada en çok kullanılan metal kalıplar içinde en uzun ömür çelik veya dökme demir kalıplara aittir. Bakır kalıplar demir – dışı döküm için tercih edilir. Dökme demir kalıplar savurma yöntemi ile üretilirler ve silindirik şekilde işlenmeleri zordur. Farklı sebeplerden dolayı dökme demir kalıplar tavsiye edilmez. Dökme demirler çeliğe göre maliyet avantajı göstermez, ayrıca su soğutmaya elverişli değildir. Su soğutmalı dökme demir kalıp çatlar ve kırılır. Çelik kalıpta bu problem görülmez. Çelik kalıp uzun ömürlü olduğu için çok ekonomiktir (Tablo 2.4).

Tablo 2.4. Savurma döküm boru üretimi için geliştirilmiş bir metal kalıbın bileşimi ve özellikleri [2]

Ürün	Çelik türü	Ağırlık, (kg)	İç çap, (mm)
Savurma döküm borular	21CrMo10 16CrMoNi	290' a kadar	300 – 2000

Gri dökme demir 200 MPa çekme gerilmesine sahiptir. Bu özelliği ile gri döküm çok ekonomik ve tatmin edici bir kalıp malzemesidir. Eğer üretim çok fazla değilse karbon çeliği kullanılabilir (AISI 1020 gibi). Kaba işlemeden sonra çelik, normalize ve temperleme (667 °C) ısıl işlemlerine tabi tutulur. Bu kalıplar üretim sırasında gerilim giderme tavlamasından geçirilir. Boru üretiminde kullanılacak kalıp çeliği SAE 4130 olarak daha çok önerilir.

Bir kalıp üretildikten sonra, kullanılmaya başlamadan önce bir ön işlem süreci gerekir. Kalıp 93 – 149 °C arasında bir sıcaklığa ısıtılır ve sonra içi amonyum persülfat ya da başka bir yumuşak dağlayıcıyla temizlenir. Bu işlem, kalıp içini yağ veya gres yağından temizlediği gibi, çok hafif dağlar. Bazen kaba bir temizlik için kalıbın içi hafifçe üflenerek temizlenir. Bu işlemler sonrasında kalıp temiz suyla tam ve dikkatli bir şekilde temizlenmelidir. Ön işlemin amacı, kalıp yüzeyini hafifçe pürüzlendirmenin yanı sıra kalıpta kalabilecek yağı da temizlemektir.

Alternatif kalıp malzemelerinin mukayesesi Tablo 2.5' de verilmiştir. Tablo 2.6 ise metal kalıp malzeme bileşimlerini vermektedir. Nihai ürün çok büyük değilse genellikle SAE 1020 gibi düşük karbonlu, normalize edilmiş ve 677 °C' de

temperlenmiş çelik kalıp kullanılır ve sonuç memnun edicidir. Öte yandan, boru üretiminde defalarca kullanılacak bir kalıcı kalıp için kalıp malzemesinin SAE 4130 gibi alaşımlı çelik olması istenir.

Tablo 2.5. Metal, kum, reçine-kum ve grafit kalıpların mukayesesi [3]

Değişken	Kum kalıp	Metal kalıp	Reçine kalıp ^(*)	Grafit
Yatırım maliyeti	Düşük	Yüksek	Düşük	Orta
Çalışma Verimi	Aynı metal kalıp veya derecenin kullanımı mümkündür	Saatte 60 döküme kadar üretim hızına erişilir	Günde aynı metal dökümden 10 veya daha fazla yapılabilir	İyi
Metal dökümde esneklik	Yüksek	Yok	Az	Yüksek
Kalıbın Ömrü	Uzun	2000 -30.000 döküm	Orta	5 – 100 döküm
Soğuma Hızı	Düşük, dökme demir için tavlama gerek yok	Yüksek	Orta, dökme demir için tavlama gerekli	Yüksek
Uygulamalar	Kalın kesitli borular ve haddelerin dökümü	Her kesite uygun	İnce kesitli borulara uygun	Kısa parçalar

^(*)Reçine kalıplar (kabuk kalıplar) temiz kum ile karışmış termoset plastikten yapılır

Tablo 2.6. Metal kalıplar için malzemeler [3]

Malzeme	Element						
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
SAE 4130 (De Lavaud)							
Re 25 – 30	0,28 – 0,33	0,2 – 0,35	0,4 – 0,6	0,035	0,040	0,80 – 1,10	0,15 – 0,20
Genel metal kalıpları, yüksek alaşım çelikleri							
SAE 1010	0,08 – 0,13	-	0,3 – 0,6	-	-	-	-
SAE 1020	0,18 – 0,23	-	0,6 – 0,9	-	-	-	-
SAE 1040	0,37 – 0,44	-	0,6 – 0,9	-	-	-	-

Dökme demir kalıplar 500 ile 1000 döküm arası ömür sergilerler, küçük parça dökümler (motor gömleği gibi) için çelik kalıp ömrü 1000 ile 3000 döküm arasındadır. Boru üretiminde kullanılan alaşımlı kalıp çeliklerinde ömür 2000 ile 30000 döküm arasında değişir. Bu kalıplarda rekor sayı 50000 döküm olarak kaydedilmiştir. Uzun kalıp ömrü, uygun bakım, pürüzlü noktaları düzleştirme ve erozyon hatalarının kaynatılması ile sağlanır. Kalıplar genellikle termal yorulmaya (ısıl kırılma) uğrarlar. Kalıp kullanılırken, ısıl genleşme yüzünden iç çap büyür. Döküm sıyrıldığında kalıp soğur ve çap düşer. Bu tekrarlı durum çatlak şeklinde net hasarlar oluşturur. Eğer bu kırık büyürse sıvı metal içeri sızar ve döküm kalıba yapışır. Dökümün çıkarılması kalıba zarar verdiği için kalıbı kullanışsız hale getirir.

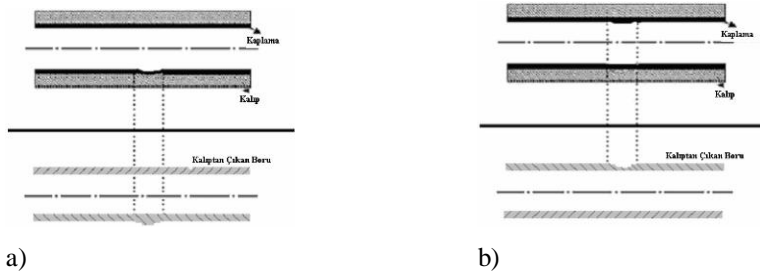
Eğer kalıp çok düşük et kalınlığına sahipse kalıpta az veya ihmal edilir gerilme oluşur. Kalıp ısındığında genişler, soğuduğunda daralır ve elastik limit içinde kalır. Eğer malzeme uygunsuzsa uzun ömür beklenir. İnce etli kalıp sıyırma sorunu oluşturur. Kalıp su soğutma nedeniyle, sıcak döküm çevresinde büzülür.

İnce kalıp et kalınlığı kalıp ömrünü azaltır. Diğer yandan çarpılma problemi de oluşabilir. Buna bağlı olarak döküm çıkartılamaz. Kalıp gerilim gidermesi iyi yapılmışsa da bu sorun oluşur. Kalıptaki üniformsuzluk ta çarpılma sebebidir. Doğal olarak kısa kalıplar uzunlara göre daha az çarpılır. Uzun kalıp et kalınlığı fazla olmalıdır.

2.6. Kalıp Kaplamaları

İster sabit kalıp ister kum kalıp olsun, savurma dökümde kalıp içleri daima kaplanır. Kaplama iki fonksiyonludur; birincisi dökümün kalıptan ayrılmasını sağlayan ayıraç, ikincisi relatif olarak soğuk kalıba, dökümün çillenmesini önleyici gizli yalıtıcıdır. Sabit kalıbın ömrü pik kalıp sıcaklığı ile ilişkilidir. Pik kalıp sıcaklığını azaltıcı her çaba kalıp ömrünü de arttıracaktır. Kalıp pik sıcaklığını azaltmak için, muhtelif metotlar vardır. Yalıtıcılık özelliklerinden dolayı kalıp kaplamaları pik sıcaklıklarını düşürürler. İlave olarak, mükemmel uygulama dökümün kalıptan mümkün olduğu kadar çabuk sıyırılmasıdır. Bu kalıp pik sıcaklığını düşürecektir.

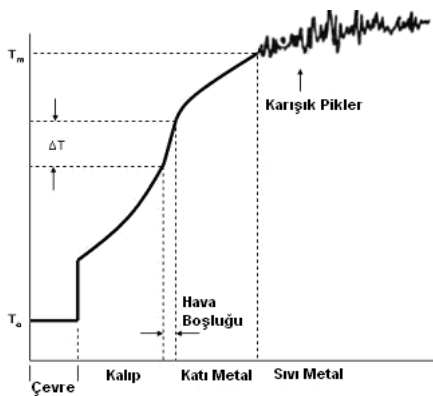
Kalıp ömrü çok karmaşık bir konudur. Temel olarak bir yorulma problemi. Kalıp malzemesinin yüksek çekme mukavemeti demek, yüksek yorulma mukavemeti demektir. Bu ise uzun ömür demektir. Kalıp sıcaklık çevriminden geçerken, kalıp malzemesinde yorulma gerilmeleri oluşur. Yüksek yorulma gerilmesi altındaki kalıp doğal olarak kısa ömür, düşük yorulma gerilmeli kalıp uzun ömür verecektir. İdeal olan hiç kaplama gerektirmeyen bir kalıpta, savurma döküm yapmaktır. Grafit veya karbon içlikli çelik ceketle yarı sabit kalıp döküm kaplama gerektirmez. Maalesef, karbon veya grafit içlik ömrü kısadır ve relatif olarak pahalıdır. Bundan dolayı birçok savurma döküm üretiminde, ister yatay ister düşey olsun kalıp kaplamaları kullanılır (Şekil 2.14).



Şekil 2.14. a) Kalıp içinde eksik kaplama sonucu bozulma (şematik)
b) Kalıp içinde fazla kaplama sonucu bozulma (şematik)

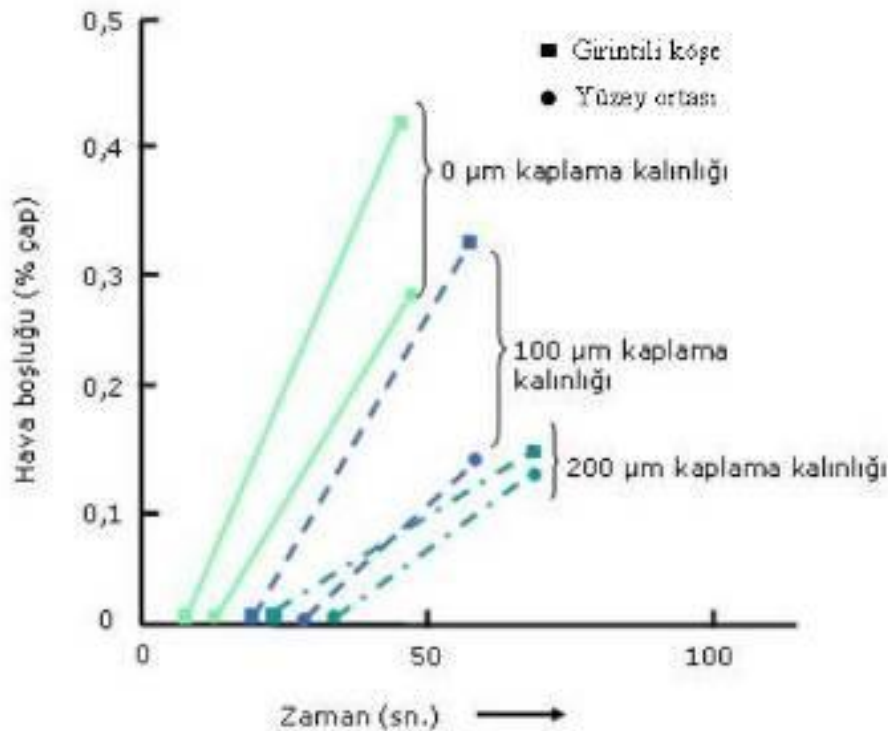
- Kalıp kaplaması kullanılmaması durumunda sıvı metal kalıba yapışır. Bu, dökümün kalıptan çıkarılmasını zorlaştırır ve metal kalıbın ömrünü azaltır,
- Kalıp kaplamasının çok ince olarak uygulanması ve kuru olmaması durumunda dökümün dış yüzeylerinde delikler oluşur (pinholler). Bu delikler boya içindeki sıvı (uçucu) maddelerden kaynaklanır,
- Kalıp kaplamasında kullanılan bağlayıcı miktarı az ise yüzeyde kaplama kalkar ve boya kalkması nedenli hatalara sebebiyet verir.
- Kalıp kaplamasının çok kalın olarak uygulanması sonucunda döküm yumuşak olur ve iç yüzeyde iri grafitler oluşur. Kalıp kaplamasının ince olarak uygulanması dışta D – tipi grafit oluşumuna yol açar ve sertlik artar (dökme demirler).

Önce sıvı metalin ve sonra da katı metalin ısını kaybetmesi zaman alır. Flemings [7] tarafından tanımlanan ve ısı kaybını (transferini) kontrol eden direnç faktörleri sıvı metal veya alaşım, katılaşıma, metal-kalıp arayüzey, kalıp ve kalıbın çevresidir (Şekil 2.15).



Şekil 2.15. Kalıpta katılaşılan metalde ve çevresinde ısı transferine bağlı olarak değişen sıcaklıklar [7]

Kaplamanın doğru seçilmesi ve kullanılması çok önemlidir. Kaplama işlemi dökümün toplam maliyetinin sadece % 0,5' ine eşittir. Diğer yandan kaplama işleminin yanlış yapılması ya da yanlış seçimi toplam maliyetin %5–10' una varan zarara yol açar. Kötü veya yanlış kaplamalar dökümdeki toplam zararı % 50'nin üzerine çıkartabilir. Diğer yandan yüksek kaliteli kaplamalar hataları azaltır ve zararı kabul edilebilir seviyede tutar. Günümüzde kullanılan değişik kaplama çeşitleri vardır. Bunun sebebi; metal ile kalıp yüzeyi arasında oluşabilecek yapışmayı önlemek; dökümün kalıptan ayrılmasını daha kolay hale getirmek, döküm yüzeyi kalitesini arttırmak ve kalıp içine sıvı metali daha rahat vermektir. Kalıp kaplamasının varlığı ısı akışında yüksek bir ısısal direnç oluşturabilir. Gözenekli kaplamanın ilave izole edici bir etkisi olacağı aşıkardır. 400 μm kaplamanın 200 μm kaplamaya göre sadece % 20 fazla izole edici olduğu görülmüştür. Yüzeyde kalınlığı fazla olan kaplamalar daha izole edicidir (Şekil 2.16). Kaplamanın yüzeyinin 400' lük zımpara kağıdı ile işlenmesi ısı transfer katsayısında keskin bir yükselişe sebep olur.



Şekil 2.16. Kalıp yüzey ve köşelerinde oluşan farklı hava boşlukları. Girintili köşelerde hava boşluğu fazladır, çıkıntılı köşelerde hava boşluğu yoktur. Artan kaplama kalınlıkları katılaşmayı geciktirir ve hava boşluğu kalınlığını düşürür [8]

Davies [8] kaplama kalınlığının sadece ısı transfer katsayısına etki ettiğini bulmuştur. Kaplanmış bir kalıbın ısısal iletkenliğini hesaplamada kullanılan en kritik parametrelerden biri, kaplama materyalinin termal iletkenliğidir. Gözenekli bir kaplamanın (her heterojen malzemede olduğu gibi) ısı iletimi; matris yapısına ve her fazdaki termal iletkenliğe bağlıdır. Gözenekli bir malzemenin termal iletkenlik özellikleri analiz edilirken; ısı kapasitesi ve radyasyon emişi de hesaba katılmalıdır. Grafit veya karbon kaplama pahalı ve kısa ömürlüdür. Kömür tozu ucuzdur, fakat onun dökümhane atmosferini bozması kullanımını sınırlamıştır. Kaplamaların ilk katılma hızını düşürmesi ve çil etkisini azaltması diğer önemli görevleridir. Kaplamalarda diğer arzu edilen durum iletim sistemlerini aşındırmamaları (jel sayesinde) ve kalıpta çabuk kurumalarıdır. Kaplama kalıba makul şiddetle yapışmalı ve döküm sonrası tamamen parça ile çıkmalıdır (kalıpta kalmamalı). Kaplama kalınlığı ve yüzey pürüzlülüğü ürüne göre değişir. Silika unu, bentonit ve diatomit en çok tercih edilen kaplama tozlarıdır. Grafit ve yüksek poroziteli zeolit ile takviye edilmiş bentonit tozları yeni kuşak kaplamalardandır. Tozların tane boyutları, bileşim ve karışım titiz şekilde ayarlanmalıdır. Grafit kaplama kuma dökümde tercih edilir. Grafit iletken olduğundan ve çok kaygan yüzey verdiğinden dolayı savurma dökümde tercih edilmez. Düşük çaplı savurma boru dökümlerde sıkça görülen yüzey pinholleri iyi kaplama uygulaması ile önlenir.

Stötze' nin [9] araştırmasına göre; kalıp kaplamalar ticari isimlerle anılmaktadır. Kaplamaların uygulama şekli, bağlayıcısı, metal döküm türü ve özelliklerine göre sınıflandırılmaktadır. Genellikle sulu ve alkollü seyrelticiler tercih edilir ve yoğunluk aralığı $1,1 - 2,4 \text{ g/cm}^3$ tür. Tozun seyreltilme yüzdesi 12–15 mertebesinde olup kaplama maliyeti $1,4 - 2,3 \text{ €/litre}$ dir. Kaplama hızları genellikle $2-4 \text{ m}^2/\text{dk}$ aralığındadır. Kaplamalarda en önemli ayırıcı unsur; kaplamanın yüksek refrakterliği, iyi ayrılma, yanmama ve S blokajı gibi özelliklerdir. S blokajı büyük silindirik düktül demir dökümlerde önem kazanır. Normal kalıp kaplamada bağlayıcıdaki S sıvı demire geçip Mg ile reaksiyona girer, dolayısıyla küresel grafit oluşumunu düşürür. Silico L 114 P kodlu kaplama S blokajı sağlar ve düktül demir dökümde tercih edilir.

BÖLÜM 3. DÜKTİL DEMİRLER

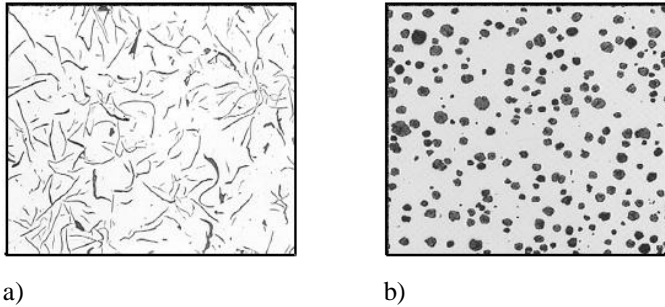
3.1. Giriş

Endüstri tarihi insanoglunun M.Ö. 5000'de meteorik demiri kullandığı ve M.Ö. 1200'de ise demiri ergitmeyi başardığını vermektedir. M.Ö.2400–1000 yılları arasında Batı Asya'da (Anadolu, Mezopotamya ve İran) demir ve bronz (Cu-%1-2 Sn) daha çok askeri amaçlarla kullanılmıştır. M.Ö.400'de Çinliler demir ergitme teknolojisini geliştirmişlerdir. Bu tarih dökme demirin doğum tarihi olarak kabul edilir ve bundan dolayı dökme demirler 2500 yıllık bir geçmişe sahiptir. M.S 1100'de dökme demir (Fe-C-Si alaşımı) Orta Asya ve Batı Asya'da geniş şekilde kullanılmış ve 300 yıl sonra da Avrupa'ya geçmiştir. M.S.1400–2000 arasında demir döküm endüstrisi büyük sıçrama yapmıştır.

Kroma alternatif sertleştirici arayan bilim adamlarının sistematik ve ısrarlı çalışmaları ile düktil demir tesadüfen bulunmuş ve uygulamada devrim niteliğinde olan çok önemli yararlar sağlamıştır.

“1940'lı yıllarda Amerikalı araştırmacılar aşınmaya dirençli malzeme geliştirme çalışmaları yürütmektedirler. Pik (gri) demire tüm akla gelen elementleri ilave etmekteydiler. Doğal olarak Mg etkileri de araştırılıyordu. Nisan 1943'te Klas 40 gri döküm - GG28 dökme demir (Fe–C–Si alaşımı) ile bir diğer dökme demire (Klas 20, GG14), 80 – 20 Ni-Mg alaşımı, kalıcı Mg miktarı % 0,15, %0,3, %0,4, %0,5 olacak şekilde verilmiştir. Bu işlemde sonra potada %0,5 Fe – Si ile aşılama yapılarak deney çubukları dökülmüştür. Çekme dayanımı deneyleri neticeleri sadece gri dökme demir özelliklerinin çok yüksek değerlere ulaştığını göstermekle kalmayıp, yepyeni bir malzemenin de üretilmiş olduğunu ortaya koymuştur. Gri dökme demirde 130 MPa olan çekme dayanımı, % 0,5 kalıcı Mg içeren yeni malzemelerde 5 kattan fazla (720 MPa) artmıştır. Yapılan mikroskobik çalışmalar grafitin lamel şeklinde olmayıp

o zamana kadar gözlenmemiş bir şekilde küresel olduğunu ortaya koymuştur. Böylece, yüksek karbon miktarına sahip, dokusunda küresel grafitlerin olduğu, mekanik özellikler bakımından çelik döküme özdeş ve üretim yöntemi yönünden dökme demir karakteri taşıyan yepyeni bir malzeme endüstriye kazandırılmıştır (Şekil 3.1). 7 Mayıs 1948'de Philadelphia dökümcüler toplantısında H. Morrogh tarafından döküm endüstrisi için yeni bir malzeme olarak tanıtılmıştır. Birbirinden bağımsız olarak İngiltere'de British Cast Iron Research Association (BCIRA) Ce kullanılarak, Amerika'da International Nickel Company ise Mg kullanarak düktil demiri elde etmeyi başarmışlardır [2].



Şekil 3.1. a) Pik-Font (Gri) dökme demirin fleyk grafitlerden oluşmuş mikroyapısı,
b) Düktil-font (GGG) dökme demirin küresel grafitlerden oluşmuş mikroyapısı

Pik demir mikroyapısının da görülebileceği gibi siyah yapraksı fleyk grafit kristaller dökme demirin mukavemetini, sünekliğini ve darbe direncini düşürür. Bu olumsuzluklar düktil demirde yoktur. Mekanik özellikler bakımından çelik döküme özdeş, üretim yöntemi ve ucuzluk yönüyle pik (gri) dökme demir karakteri taşıyan düktil demir, 1950'li yıllarda geliştirilmiş ve bunu takiben 1960'lı yıllarda ise yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır.

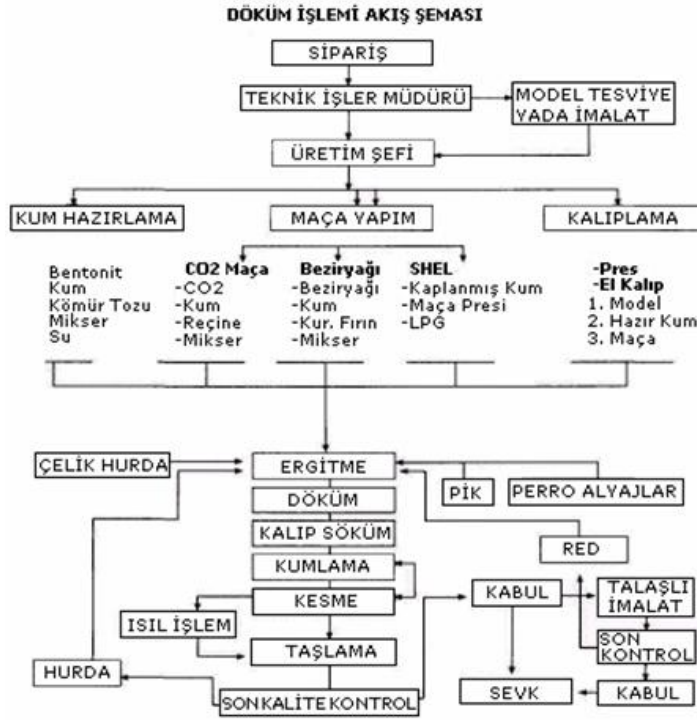
Düktil demir malzemeler bütün kesit ölçülerinde üretilebilir. Bununla birlikte sünek çok ince kesitler üretmek her zaman mümkün olmaz. İnce kesitlerde sünekliği geliştirmek için ısıtma işlemi gereklidir. Düktil demir, gri dökme demir gibi mükemmel akıcılığa sahiptir. İnce kesitlerde keskin kenarlardan ve sementitlerden kaçınmak için çok dikkat gerekmektedir. Düktil demir, çelik ve temper dökme demir ile karşılaştırıldığında hatasız döküm yapmak daha kolaydır. Kalıplamada ve dökümde de çok dikkat gereklidir. Düktil 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 aşılama yapılır. Ticari işlem uygulamalarında çok değişiklikler vardır. Genelde bileşim alanı gri dökme demire benzese de çok sayıda önemli farklılıklar vardır [6].

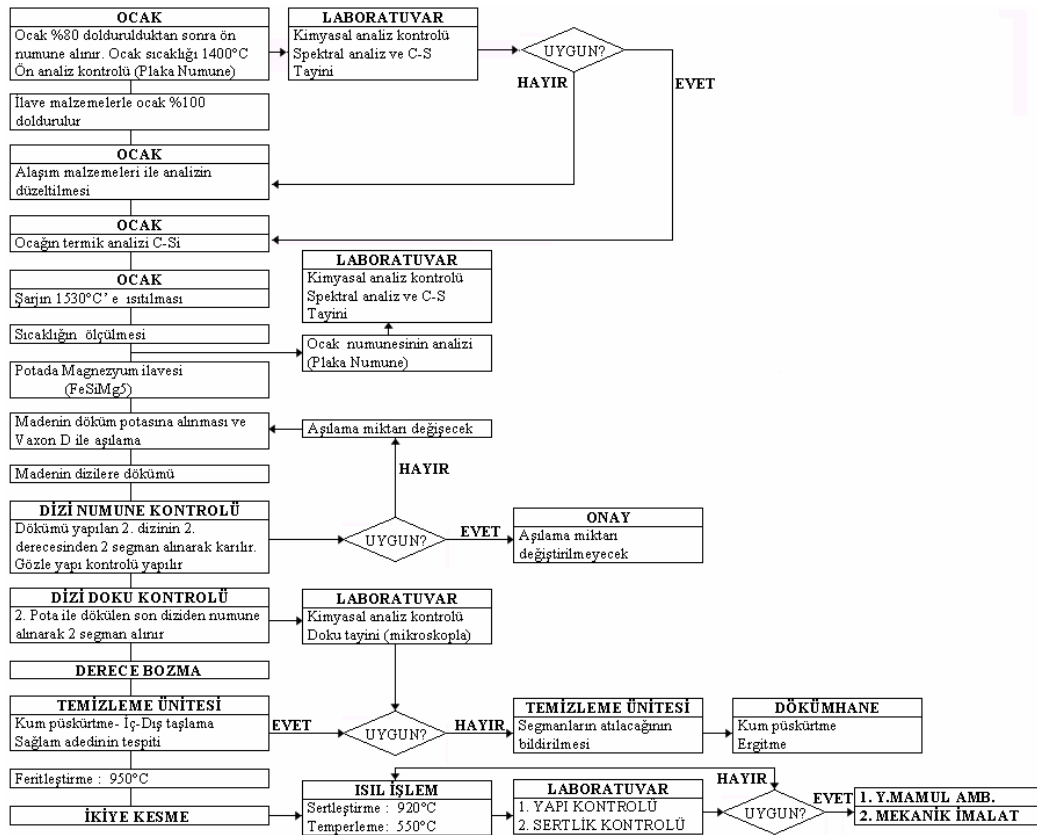
Düktil demir malzemeler çoğunlukla yaş veya kuru kum kalıba dökülürler. Düktil demir için döküm ortamı, gri dökme demirin ortamıyla aynıdır. Ancak birincisinde kumdaki nem oranı dikkatlice kontrol edilmelidir. Çünkü Mg ilave edilmiş sıvı metali kolay oksitlenebilmektedir. Kum içindeki toplam yanıcı madde oranı % 6–7 ile sınırlanır. Kullanılan kum karışımı ve kalıplama işlemleri gri dökme demir için belirtilen prensiplere uymaktadır. Santrifüj dökümde ise değişik parametreler dikkate alınır.

Mg ilavesi ve aşılama sonrası dökme demirin son kimyasal bileşimini tespit etmek için numune alınır. Burada önemli olan, artık Mg oranının belirlenmesidir. Bu amaçla grafitöz (çil uygulanmış = hızlı soğutulmuş) numunelerin spektrografik analizi tercih edilir.

Bileşim kontrolü açısından basit bir yöntem olan karbon eşdeğeri soğuma eğrisinden elde edilmektedir. Ancak ölçümün doğru olması, soğuma eğrisinin alınacağı numunenin beyaz dökme demir olarak katılaşmasını (grafitöz) gerektirir. Karbon eşdeğeri soğuma eğrisindeki ilk duraklama ile ötektik duraklama arasındaki sıcaklık farkına bağlı olmaktadır. Diğer elementlerin küçük etkileri ihmal edildiğinde ötektik duraklamanın mutlak değeri Si miktarına bağlıdır. Dolayısıyla (Toplam karbon = $C_1T_b - C_2T_0 - C_3$) bağıntısı ile belirir. Burada C_1 , C_2 ve C_3 malzeme ile ilgili sabitlerdir. T_b ve T_0 , birinci ve ötektik duraklama sıcaklıklarını göstermektedir. Sabit değerler tablo veya cetvellerden bulunabilir. Toplam karbon ve karbon eşdeğeri bilindiğinde silisyum oranı $\%Si = C_4$ (Karbon Eşdeğeri-Toplam $\% C$) bağıntısından bulunacaktır. Burada C_4 yaklaşık olarak 3,4' dür. Ancak kesin değer ayrı olarak yapılan silisyum analizi ile saptanabilir. Döküm malzeme özellikleri; yapısal ve termal şartlar dışında dökümhane şartlarından çok etkilenir. Örnek bir dökümhanede işlem adımları ve uygulama ağırlıklı faaliyetler ve yöntemler Şekil 3.2 – 3.4'de verilmiştir [1].



Şekil 3.2. Döküm işlemi akış şeması [1]



Şekil 3.3. Uygulama adımları [1]



Şekil 3.4. Düktil demir kademeleri ve termik analiz yönteminin uygulanması [11]

3.2. Düktil Demir Üretimde Kullanılan Şarj Malzemeleri

Şarj yapmak için kullanılan ham malzemeler ergiyiğin bileşimini belirler. Bu nedenle şarj kalitesi dikkatlice kontrol edilmelidir. Özellikle ham madde alımlarında bileşim, sağlanan kalite, teslim zamanı vb. faktörler net olarak belirtilmelidir [12].

Şarjın metalik bileşenleri, ergiyiğin çekirdeklenme potansiyeli üzerine büyük bir etkisi vardır. Çelik ve devir daim malzemesi (hurda) 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 sementit oluşumu için düşük potansiyel gösteren dökme demirleri üretmek için, dönüş hurdaları %50' den çok olmamalı, çelik bileşeni en çok %40 ile sınırlanmalı ve şarjda pik demir kullanılmalıdır. Şarj malzemelerinin temizliği de çil kama değerinde önemli rol oynar [13].

3.2.1. PİK

Dökme demir üretimi için pahalı olmakla beraber doğrudan yüksek fırın pikinin kullanılması özellikle bileşim denetimi açısından yararlı katkı sağlar. Buna ilaveten dökme demir üzerinde pikin özelliklerinden kaynaklanan kalıcı bir etki söz konusudur. Örneğin yapıda serbest karbür bulunmayışı, aşılamaya iyi cevap verışı, kararlı mikroyapı ve mekanik özellikleri sayılabilecek birkaç özelliktir [2]. Düktil demir üretiminde kullanılan ham demir, lamel grafitli dökme demir pikinden sadece kimyasal analizi ile farklılık gösterir (Tablo 3.1).

Tablo 3.1. F-1 sınıfı sorematal düktil demir piki ortalama analizi (%) [1]

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu	V	Ti	Al
4,305	0,165	0,0088	0,0255	0,011	0,080	0,030	0,0275	0,0345	0,032	0,0125

Düktil demir üretiminde kullanılan ham demirde, kükürt ve mangan miktarları düşük olmalıdır. S miktarı maksimum % 0,01, Mn ise maksimum % 0,2 olmalıdır. Bu şartın yanında sementit yapıcı ve stabilize edici elementlerin de düşük miktarlarda ve belirli sınırlarda kalmaları gerekmektedir. Bu nedenle yüksek fırın pikleri düktil demir için genellikle uygun özelliklerde değildirler. Özellikle yüksek kükürlü olduklarından bir kükürt giderme işlemi gerektirmektedir. Ayrıca düktil demir üretiminde bulunmaması gereken elementleri de içerirler.

Tablo 3.1’ de verilen pik analizi, yüksek saflık ve düktil demir üretimi için uygun özelliklerde olacak şekilde Kanada ve Norveç’te elektrik ark ocaklarında üretilmektedir.

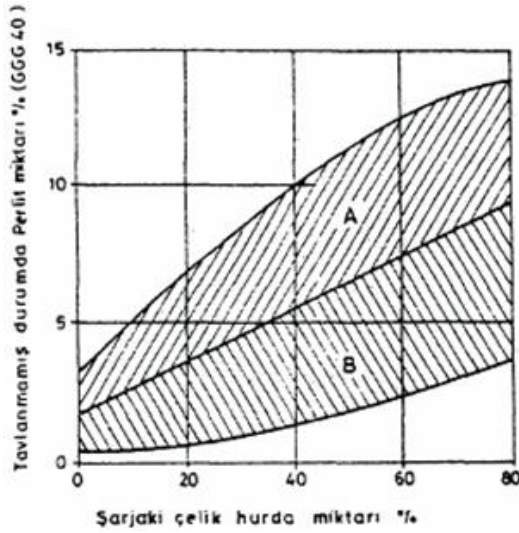
İstenmeyen elementleri cüzi miktarda bünyesinde bulunduran ve Avustralya ve Brezilya’ da mevcut olan demir cevherlerinden üretilen piklerde düktil demir üretimine çok elverişlidir. Son yıllarda ülkemizde de bu piklerin kullanım miktarları artmıştır [1].

3.2.2. Çelik hurdası

Düktil demir üretiminde şarjın teşkilinde çelik hurdası önemli bir malzeme olarak yerini korumaktadır. Kullanılan çeşitli çelik hurdalarının düktil demir özelliklerine etkisi çok sayıda araştırma ve incelemenin konusunu oluşturmaktadır.

Çelik hurda temininde ana unsur iyi kalite olmalıdır. İyi kalite bir taraftan kimyasal analiz, diğer taraftan şekil ve büyüklük özelliklerini kapsar. Çelik hurdada mangan miktarı ne kadar az ise, gerekli sfero piki miktarı o denli az olacaktır. Mangan miktarı yanında önemli olan diğer elementler, karbür yapıcı özellik taşıyan Cr, B, V, Mo' dir. Ayrıca küreselleşmeyi engelleyen veya bozan S, Pb ve Zn gibi elementlerde göz önünde tutulmalıdır. Hataların nedeni olarak görülen parametrelerin fazlalaşması karşısında, çoğu kez üretim bir sorun olur. Bu nedenle yukarıda verilen elementler değişmeyen ve cüzi denebilecek miktarlarda bulunmalıdır. Soğuk şekillenen sac artıkları kuvvetli bir şekilde paslandıklarından, indüksiyon ocaklarında cüruf miktarın artmasına da neden olurlar. Bütün bu sorunlara rağmen çelik hurdası, hem çok bulunabilirliği, hem de ekonomik oluşu nedeni ile kullanılmaktadır. Sfero piki kullanmaksızın üretilen düktil demirin metalurjik hata yüzdesi fazla olacaktır. Ayrıca kalitenin tutturulmasında daha çok ısıl işlem gerekecektir.

Ekonomik olarak değerlendirildiklerinde çelik hurdası fiyatının gerçek maliyetin tespitinde kabaca %50 daha fazla olarak alınmasının gerekeceğini ortaya koymaktadır. Böylece %50 çelik hurdası, %50 sfero pikinden ibaret olan bir şarj, sadece çelik hurdasından üretilenle karşılaştırıldığında bize %5 daha pahalı olacağını göstermektedir. Bu fark kabullenmesi gereken riskler karşısında, çelik hurdası kullanımının her zaman ekonomik sayılamayacağını kanıtı olmaktadır. Ayrıca bundan önceki kısımlarda vurgulandığı gibi, sadece çelik hurdasının kullanılması belli bir et kalınlığına kadar (30mm) ferritik düktil demir üretimini mümkün kılmaktadır (Şekil 3.5). Bu kalınlığın altında sfero piki kullanımı zorunludur [1].



Şekil 3.5. Şarjda çelik hurdası kullanım miktarına ve pik özelliklerine bağlı olarak dokuda perlit miktarının değişimi, A:Normal özelliklerde pik kullanımı, B:Yüksek özelliklere sahip sfero piki ile [1]

3.2.3. Düktil demir hurdası-devri daim malzemesi

Dökümhanelerin kendi devir daim hurdaları en değerli şarj malzemeleridir. Kimyasal analizi bilinir ve genellikle temizdir. Çok az istisna dışında şarj içinde düktil demir döküm hurdasından başka döküm hurdası girmemelidir. Çünkü bunlar ilave kükürt, fosfor ve bakır için kaynak olabilmektedir. O nedenle diğer dökümhanelerden gelen hurdalar kalite problemlerinden dolayı iyi bir şekilde analiz edilmelidir. Şarjda devir daim hurdasının payı istenilen son silisyum içeriğinden dolayı çok sınırlandırılır. Silisyum esaslı alaşımlarının kullanılmasından kaynaklanan sınırlama bu değerli şarj malzemesi ile problemler oluşturur. Saf magnezyum işlem metodu kullanarak bu sınırlama kaldırılır. Ancak hem gri dökme demir hem de düktil demir üreten bazı küçük dökümhanelerde ve ayrıca hem ferritik hem de perlitik düktil demir üretiminde her iki ürünün hurdaları titizlikle birbirinden ayrılmalıdır [2].

3.2.4. Direkt redüklenmiş demir cevheri

Direkt redüklenmiş demir cevheri, çok sayıda olmamasına rağmen bazı düktil demir üreticileri düşük ve hat frekanslı indüksiyon ocaklarında az miktarlarda (%5–10) kullanımı benimsemiş bulunmaktadır. Direkt redüklenmiş demir cevheri veya peletlerin analizlerine örnek olarak şu değerleri verebiliriz:

Fe metalik % 85, Fe oksit % 10, C% 0,4, Mn % 0,05, P% 0,03, S% 0,01

Görüleceği üzere direkt redüklenmiş demir cevherinin kimyasal analizinde, eser miktarda karbür yapıcı elementler bulunmakta, P ve özellikle S düktil demir üretimi için ideal miktardadır. Farklı araştırmalar, Avrupa fiyatlarında %20 redüklenmiş demir cevheri şarjı ile %8 nispetinde maliyette bir elverişlilik elde edildiğini ortaya koymaktadır [11].

3.2.5. Ferro alaşımlar ve silisyum karbür

Düktil demir üretiminde ferro alaşımların kullanılması, istenen analize ve şarj malzemelerine bağlı olarak değişir. Ferro alaşımların kullanılması söz konusu olduğunda, kimyasal analizlerin bilinmesi gerekir.

Silisyum karbürün kullanılması ile eriyikte hem silisyum hem de karbon miktarının arzu edilen düzeye getirilmesi sağlanır. Fakat esas elverişlilik, eriyiğin metalurjik kalitesinin ön bir aşılama işlemi yapılmışçasına olumlu kılınması ile döküm durumunda sementitlerin mevcudiyetinin önlenmesi olmaktadır.

Knothe, W. [14], çalışmasında SiC' ün yukarıda belirtildiği gibi çekirdekleşme düzeyini arttırıcı etkisini vurgulamakta ve küreselleştirme işlemi öncesi %0,2 miktarında eriyiğe vermektedir.

3.2.6. Karbon vericiler

Karbon vericiler özellikle pota indüksiyon fırınlarında ergitmeyle yaygın olarak kullanılır. Pazarda farklı tiplerde karbon vericiler vardır. 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 düktil demir kalitesini olumlu etkiler [12].

3.3. Küreselleştirme İşlemi (Magnezyum İşlemi)

Grafitin küre şeklini almasını sağlayan elementler sayıca çok fazla olmasına rağmen, pratik uygulama da genellikle, az miktarda Ca, Ce ve diğer toprak alkali metallere birlikte Mg kullanılır. Grafitin küreselleştirilmesi için gerekli olan Mg miktarı %0,02' den az olacağı gibi, şartlara bağlı olarak %0,02' den fazla da olabilir. Sadece Mg küreselleştirici element olarak kullanılması halinde, miktarı %0,02' den az olamaz. Ce, Ca gibi elementlerin birlikte kullanılması durumunda asgari Mg miktarı %0,01 civarındadır. Düktil demir küreselleştirme işlemleri ve uygun ilave yöntemleri için kullanılan çeşitli Mg alaşımları Tablo 3.2' de verilmektedir [15].

Tablo 3.2. Tipik Mg küreselleştirme alaşımları ve kullanılan işlem yöntemleri [16]

Alaşımlar	Teknik vasıtalar
NiMg, CuMg	Açık pota
FeSiMg %3/5 FeSiMg %5/7 FeSiMg%8/10 FeMg peletleri %6/10	Sandwich, Kapaklı pota Flotret, Inconod, Kalıp içinde gazal
Mg kaplı tel Mg kok FeSiMg %30-40	Daldırma, Dönen pota, Daldırılmış ilaveli pota
Saf Mg çubuk Saf Mg tozu	Konvertör, Basınçlı pota daldırma, Enjeksiyon

Düktil demir üretimi için geliştirilmiş birçok farklı küreselleştirme işlem yöntemi vardır. Açık pota, sandwich yöntemi, kapaklı pota yöntemi, ibrikli pota yöntemi, flotret yöntemi, vorteks yöntemi, inmold yöntemi, daldırma yöntemi, konverter yöntemi, enjeksiyon ve basınçlı pota kullanılan işlem yöntemleridir.

3.4. Grafiti Küreselleştirici Malzemeler

Küreselleştirme işlemi ile aşılama işleminin çok yönden birbirlerini etkilediğini vurgulamak lazımdır. Küreselleştirici elementler ön görülen bu işlem için gerekli miktarın üzerinde kullanıldıklarından, aşılama etkide gösterirler. Buna en iyi örneği,

Inmold yöntemi teşkil eder. Bu yöntemde aşılama yapılmamasına rağmen, iyi bir döküm dokusuna sahip olmaktadır.

Önceleri küreselleştirici olarak bilinen ve daha sonra lamel tipi grafit oluşumunu engelleyici etkisi tespit edilen Ce metali bugün hem küreselleştirici alaşımda, hem de aşılama malzemesinde bulundurularak kullanılmaktadır. Lantalyum elementi ise küreselleştirici olarak çok az etkinliğe sahip olmasına rağmen, bu özelliği Mg ve Ce ile birlikte kullanılması halinde artmaktadır.

Son 30 yılda küreselleştirici malzemeler konusu ile ilgili olarak yapılan çalışmalar neticesi, bugün sayılan çok fazla olan küreselleştirici malzeme mevcuttur.

Eriyik kükürt miktarı arttıkça küreselleştirici Mg miktarı fazlalaşmaktadır. Bundan önce de belirtildiği gibi Mg metali ve Mg koku eriyik S miktarı %0,12 olduğunda kullanılmaktadır [1].

3.5. Küreselleştirme Etkisinin Zamanla Azalması

Küreselleştirme işlemi sonuna doğru etki zamanla azalmakta ve Quasi-Flake olarak tanımlanan grafitler oluşmaktadır.

Etkinin zamanla kaybı ile ilgili olarak yapılan çalışmalar birçok faktörün geçerli olduğunu ortaya koymuştur. Bu olayın açıklanmasında ön sırayı, oksidasyon ile Mg'un yanması teşkil etmektedir. Mg verimi ile ilgili karşılaştırmalı bilgi Tablo 3.3' de verilmiştir [1].

Tablo 3.3. Alaşım cinsi ve küreselleştirme işlemi tipine göre Mg verimi [1]

Alaşım cinsi	Küreselleştirme işlemi tipi		
	Açık pota (%)	Daldırma (%)	Basınçlı pota (%)
Mg-Ni	50	60	-
Mg-Ni-Si	40	-	-
Mg-Fe-Si	35	45	-
Mg-Si	-	35	-
Mg kırpıntı	-	-	20
Mg ingot	-	-	50

Küreleştirme etkisinin azalması aşağıdaki faktörlere bağlıdır;

- a. İlk Mg miktarı ne kadar fazla ise etki kaybı o kadar hızlıdır,
- b. Sıcaklıkla etki kaybı artmaktadır,
- c. Cüruf miktarı etki kaybını arttırmakta olup, cürufun hemen ve çok temiz olarak alınması gerekir,
- d. Ocak astar malzemesinin etkisi, silika astar ile çalışmada, etki kaybı, bazik astara nazaran daha fazladır.

Etki kaybının artması kendisini hücre sayısının azalması ve grafit şeklinin bozulması ile gösterir [1].

3.6. Aşılama

Aşılama, eriyiğin çekirdek ihtiyacının uygun sayıya getirilmesidir. Bu çekirdekler grafitin kristalizasyonu ve büyümeleri için kaçınılmazdır. Bilindiği gibi homojen, yani aynı kristalografik özellikte malzemeler ile sağlanan çekirdekler olduğu gibi, ayrı bir malzemenin çekirdek yapıcı özelliği ile de sağlanabilir ve buna heterojen çekirdeklenme denilmektedir.

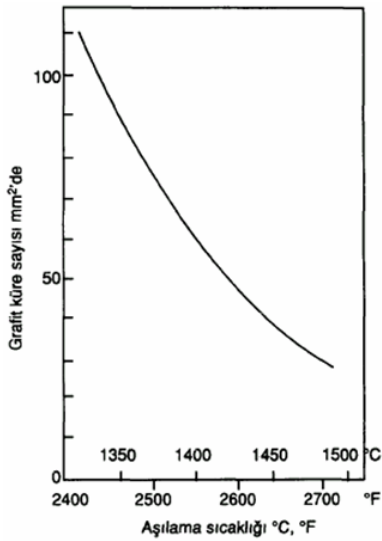
Düktil demir de aşılama ile küresel grafit kristallerinin oluşumunu sağlayan heterojen çekirdekler meydana getirilir. Böylece daha önce FeSiMg işlemi ile az veya çok yarı aşılansız durumda bulunan eriyik, aşılama yapılması ile çok sayıda çekirdeklere sahip olur. Bu durum karbür oluşumunu da önemli derecede etkiler ve önler. İnce kesitli lamel grafitli dökme demir üretiminde ergitme işlemi esnasında C veya Si miktarının SiC ile ayarlanmasında bir bakıma çekirdekleşme durumunun ideal kılınmasıdır.

Düktil demirlerde baz eriyiğin (hiçbir işleme tabi tutulmamış) Si miktarının, aşılama ile verilen Si miktarına oranı doku özelliklerini önemli derecede etkilemektedir. Bu oran çok büyük ise, yani aşılama ile verilen Si miktarı az ise, metalurjik kalite kötüdür. Bunun tersi olarak eriyik Si miktarı çok düşük ise grafit küre sayısı azalacak, döküm durumunda karbürler mevcut olacaktır. Bu nedenle

dökümhanelerde eriyik Si miktarı ve aşılama ile verilen Si miktarının toplamı sabit kalmak şartı ile bu belirtilen iki sınır içinde optimum oran tespit edilmelidir. Bu çalışma yapılırken, Mg' la küreleştirme işlemi için verilen Si miktarı nazarı dikkate alınmamalıdır.

3.6.1. Aşılama teknikleri

Genel olarak uygulanan çalışma şekli, aşılama malzemesinin döküm potasına, işlem potasından sıvı metalin dökülmesi esnasında verilmesidir. Aşılama sıcaklığı ile grafit küre sayısı arasındaki ilişki Şekil 3.6' da gösterilmekte ve sıvı metal sıcaklığı düştükçe, aşılama daha etkili olmaktadır. Düktil demir üretiminde ilk önce Mg işleminin ve sonra aşılamanın yapılması gereğini bu şekil kanıtlamaktadır. Çünkü küreselleştirme işlemi esnasında sıvı metalde bir soğuma meydana gelmekte ve bunu takiben aşılama için daha ideal şartlar oluşmuş olmaktadır.



Şekil 3.6. Aşılama durumuna sıcaklığın etkisi [1]

Şekil 3.7' de FeSiMg ile birlikte aşılama yapılmış ve sıcaklığa bağlı olarak grafit küre sayısı tespit edilmiştir. 1370°C eriyik sıcaklığında yapılan bu karşılaştırma grafit sayısı bakımından bir farklılığın mevcut olmadığını göstermektedir. Diğer taraftan bu neticeler, Düktil demir üretiminde Inmold yöntemi ile elde edilen olumlu doku özelliklerinin nedenini de ortaya koymaktadır.

CaSi alaşımının, düktil demir aşılanmasında ender kullanılmasının nedeni 1480°C' nin altında kolay bir şekilde çözünememesidir. Bütün aşılama malzemelerinde Al miktarı pinhole olarak adlandırılan ince gaz boşluklarına neden olduğundan azami %1 olmalıdır. Bazı durumlarda üretici firmadan bu miktarın %0,7 olması istenir.

Aşılayıcı miktarı %0,2' nin altında tutulduğu blok şeklinde kalıp içi aşılama uygulamaları da vardır. Tane büyüklüğüne gelince, genelde azami 13 mm olan aşılama malzemeleri kullanılır. İnce tanelerin aşılamada etkinlikleri iyi olmadığından, 1,5 mm' nin altı mümkün mertebe kullanılmamalı ve malzemeler kapalı bir şekilde muhafaza edilmelidir. Lamel grafitli dökme demirde olduğu gibi aşılama malzemesinin ilavesi ile etkinlik azami değerine erişmektedir.

Ce ile birçok aşılama malzemesinin etkisi arttırılmaktadır. Ce küre sayısını arttırmakta, zamanla etkinin azalmasını engellemekte ve beyaz katılaşmaya temayülü indirgemektedir. Bu sonuçlara uymayan yegane aşılama malzemesi SrFeSi olmaktadır. Ce'un etkisinin en fazla olduğu alaşım FeSi' dur. Düktil demirler de Ce, küreleşmeyi olumsuz etkileyici elementlerin bu etkilerini azaltan bir görev üstlenir. Genel olarak kullanılan FeSiMg alaşımlarının çoğunda az miktarda Ce (%0,01) vardır.

Ce ihtiva eden aşılama malzemelerinde Bi (en ideal %0,02) bulunması halinde küre sayısı kuvvetli bir şekilde artmaktadır. FeSi, Bi aşılama malzemelerinin kullanılmaları halinde yine zamanla bir etki azalması (küre sayısı) gözlenmesine rağmen, FeSi' a nazaran çok daha kuvvetli kalıcı bir etki mevcut olur (4–10 katı fazla). Aşılama etkinliğinin azalması ile ince parça kesitlerinde karbür oluşumu artar, kalın kesitlerde grafit yüzmesi olayı ile grafit patlaması riski fazlaşır.

Aşılama sonrası eriyik içinde bulunan SiO₂, CaO, Al₂O₃ ve BaO çekirdekleri moleküler hareketi yapar durumdadır. Yani serbest bir şekilde eriyik içinde hareket halinde olup, diğer bir parçacığa çarpmaları halinde daha büyük oksit taneleri oluşur. Bu hareket sıcaklık ve süreye bağlı kaldığında zamanla moleküler hareketi yapan parçacık sayısı azalır ve aşılama sonrasından itibaren kısa bir zaman biriminde aşılamanın etkinliği sürekli olarak düşer [1].

3.6.3. Aşılama ilgili detay çalışma

Dr. Savaş İZGİZ [17] tarafından, “Savurma döküm, düktil demir segman boru” üstünde yapılan yayınlanmamış araştırma çalışmasının detayları aşağıda verilmiştir:

3.6.3.1. Döküm makinesi, malzeme çap ve boyları

Bu çalışmada, savurma döküm tekniği ile DÜKER tipi makinede dökülen KV1 (segman kodu-GGG40) malzemeden boru şeklinde segmanlar üretilmiştir. Sertlik, bükme (eğme) mukavemeti, elastik modülü ile malzeme yapısı incelenerek, malzeme spesifikasyonu K9 (mevcut uygulama standardı) ile karşılaştırılmış ve normlara uygunluğu araştırılmıştır. Parça ölçüleri Tablo 3.5’ de verilmiştir.

Tablo 3.5. İmalat için segman ölçüleri (1. yuva segman) [17]

	Dış Çap	İç Çap	Genişlik	Et kalınlığı
Ölçüler (mm)	104,775	96,075	2,385	4,35

3.6.3.2. Üretim değerleri

KV1 malzemesine ait kimyasal analiz değerleri, küreselleşme malzemesi, aşılama malzemesi ve diğer döküm özellikleri Tablo 3.6’ da verilmiştir.

Tablo 3.6. KV1 malzemesine ait üretim özellikleri [17]

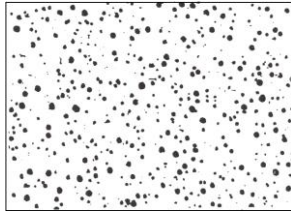
Analiz	% C % Si % Mn % P % S	3,85 1,80 0,11 – 0,13 0,04 0,01 – 0,014	Malzeme şartnamesi C=3,7-4,2, Si=2,4-3,2 Mn=max 0,5, P=max 0,3 S=max 0,05, Cr=max 0,2 Mg=ma x0,1
Küreselleştirme 280 kg sıvı GGG40 için	FeSiMg 5	5,5 kg	
Aşılama 140 kg sıvı GGG40 için	Baskete Inobar Glomag İlave aşılama Superseed	% 0,36 % 0,36 30 g	
Diğer Bilgiler	Döküm sıcaklığı (°C) Taşıma süresi (dk) Basketten curuf çekme (kez) Kalıp dönme süresi (sn) Kalıp soğutma süresi (sn) Kalıp kaplama süresi (sn) Kalıp devri (devir/dakika) Basket kalkma süresi (sn) İşlem potasına talaş ilavesi (kg)	1540 – 1545 2,5 2 150 120 60 1200 20 2	

3.6.3.3. Aşılama çalışmaları

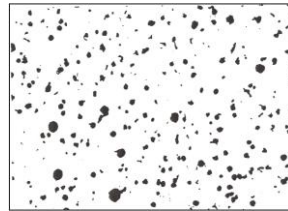
Aşılamanın bilimsel anlamı; ergimiş bir alaşımın özler veya çekirdekleyiciler ile beslenmesi ve heterojen kristallerinin (yani $MxOy$ ve $MxSy$ gibi) oluşumların kolaylaştırılması ve arttırılmasıdır. Sünme efekti (fading) olarak adlandırılan ve aşılama etkinliğinin azalması anlamına gelen fonksiyon kaybı çok önemlidir. Bu tanımlara göre aşılama döküm anından hemen önce gerçekleştirilmelidir. Aşılama iki yolla yapılabilir. İlki doldurma safhasında potaların içine, ikincisi ise (geçerli olan); döküm safhası anında döküm yolluğuna yapılan püskürtme aşılmasıdır.

Düktil demirlerde aşılama aşağıdaki etkileri gerçekleştirir;

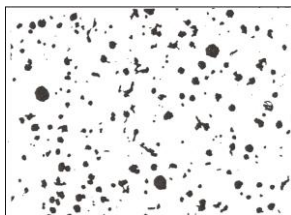
- Çil oluşumunu azaltarak mekanik özellikleri arttırır, işlenebilme kabiliyetini arttırır ve karbürleri yok eder,
- Genel niteliklerde iyileştirme ile birlikte grafit nodül sayısını arttırır,
- Maksimum mukavemet ve süneklik veren tamamen küreselleşmiş grafit nodülleri oluşturur (Şekil 3.8).



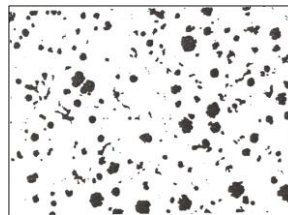
a)



b)



c)



d)

Şekil 3.8. KV1 malzemesinin standart mikroyapı dağılımı [17] ,

- İyi (1), x 100
- Orta (2), x 100
- Orta-kötü (2-3), x 200
- Kötü (3), x 200

Çeşitli firmaların patentli olarak ürettiği birçok aşılama bulunmektedir. Her aşılamanın yapıya etkisi farklı olmaktadır. Bu çalışmada kullanılan aşılama malzemelerinin kimyasal bileşimleri ve tane büyüklükleri Tablo 3.7’ de görülmektedir.

Tablo 3.7. Çeşitli aşılama malzemelerinin kimyasal bileşim ve tane büyüklükleri [17]

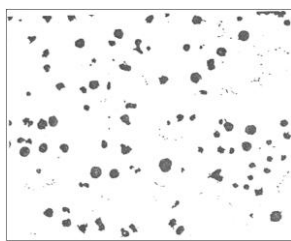
Aşılama Çeşitleri	Kimyasal Bileşim (%)						
	Si	Al	Ca	Ba	Bi	Sr	Mg
Inobar	60 – 70	Max. 1,4	0,5 – 1,5	7,0 – 9,5	-	-	-
Glomag	72 – 78	0,7 – 1,0	0,9 – 1,0	-	-	-	1,5
Superseed	73 – 78	max. 0,5	max. 0,1	-	-	0,6 – 1,2	-
Vaxon D	46 – 50	max. 1,0	0,6 – 0,9	-	-	-	1,0 – 1,5
FeSiMg5	43 – 48	0,5 – 1,0	0,8 – 1,2	-	-	-	5,5 – 6,5
				-			

Çalışmada kullanılan aşılama malzemelerinin karşılaştırmalı deneyleri ve yapıya etkileri Tablo 3.8’ de, mikroyapı resimleri ise Şekil 3.9 ve 3.10’ da verilmiştir.

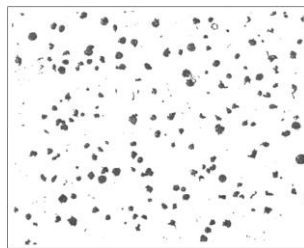
Tablo 3.8. Aşılama özelliklerinin karşılaştırılması [17]

Deney no	FeSiMg5 (kg)	İlave Aşılama (Superseed) (gr)	Basket Aşılama (gr)	Aşılama Malzemesi	Döküm Süresi (dk)	Döküm Hızı (kg/sn)	Doku Özellikleri		
							Grafit Notu ^(*)	Flotasyon	Sementit
1	5,5	-	1000	Inobar+Glomag	2,5	2	2 – 1	-	3,0 mm seyrek
2	5,5	20	1000	Inobar+Glomag	2,5	2	1 – 2	-	-
3	5,5	40	1000	Superseed+Glomag	4,5	2	3	-	3,5 mm Yoğun
4	5,5	-	1000	Superseed+Glomag	4,5	2	3	-	-
5	5,5	-	1000	Superseed+Glomag	4,5	2	3	-	-

(*) 1 – iyi, 2 – orta, 3 – kötü



a)

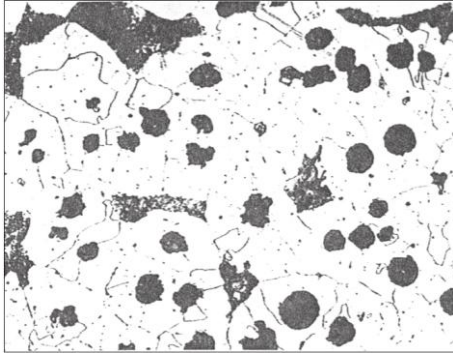


b)

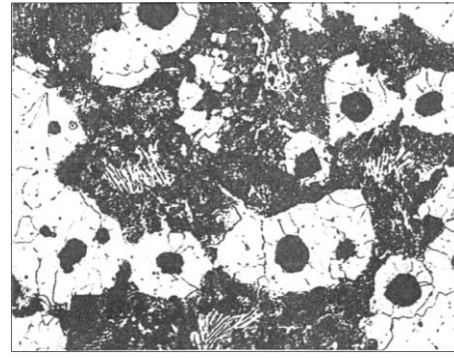
Şekil 3.9. Dağlamasız yapılar [17],

a) Inobar – Glomag, x 100

b) Inobar – Glomag Im Giess-Strahl geimpft (Superseed), x 200



a)



b)

Şekil 3.10. Dağlanmış yapılar [17],

a) Inobar – Glomag (3 mm yüzeyden görüntü), x 100

b) Inobar – Glomag (Superseed), (1,5 mm derinden görüntü), x 200

3.6.3.4. Aşılaiıcı çeşidinin ve miktarının döküm yapısına etkileri

KV1 malzemesi üzerinde birçok farklı deney yapılarak mikroyapıya en iyi etkiyi yapan aşılama şartları araştırılmıştır. Bu deneylerde C ve Si miktarının yanında aşılaiıcı çeşidi de değiştirilerek farklı kombinasyonlar denenmiştir.

3.6.3.5. Birinci deneysel çalışma

Bu deneysel çalışmada üç farklı aşılaiıcı türü ve iki element miktarındaki değişimler ile dört farklı deney yapılarak grafit formu ve mikroyapıdaki sementit miktarı yoğunluğu araştırılmıştır (Tablo 3.9 – 3.10 ve Şekil 3.11 – 3.16).

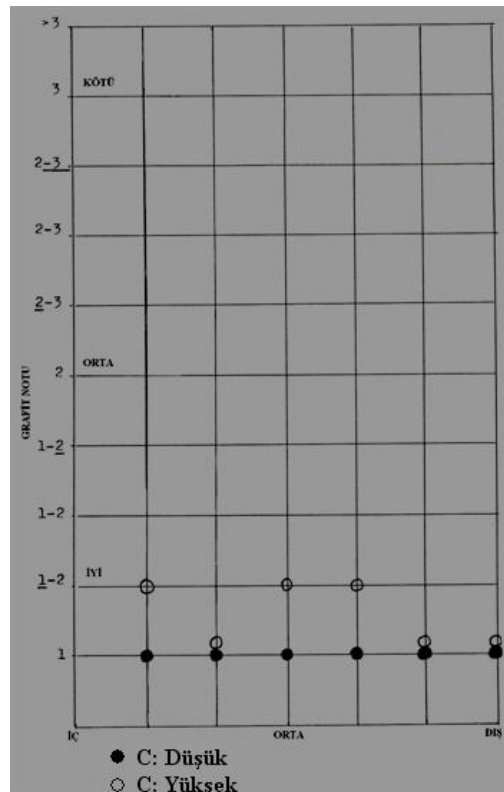
Tablo 3.9. Farklı element miktarları ve aşılama malzemelerine bağlı olarak yapılmış deneyler [17]

Faktör	Katılan Malzeme	Adım 1	Adım 2
A	Karbon (C)	3,80	3,90
B	Silisyum (Si)	1,40	1,80
C	Aşılaiıcı	Superseed+Vaxon D (70/30)	Superseed+Glomag (50/50)
Deneyler (2)	Adımlar		
	A	B	C
i	1	1	1
ii	1	2	2
iii	2	1	2
iv	2	2	1

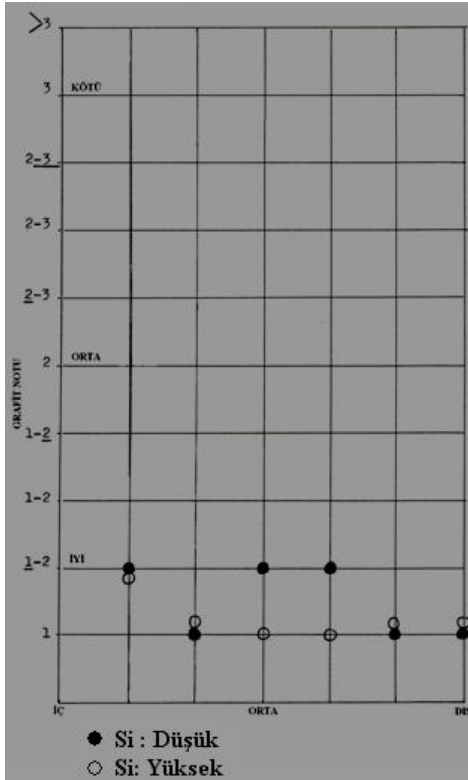
Tablo 3.10. Dört farklı deney için ilave bilgiler [17]

Deneyler		2.i	2.ii	2.iii	2.iv													
Özellikler																		
Aşılacağı Çeşidi		Superseed+Vaxon D	Superseed+Glomag	Superseed+Glomag	Superseed+Vaxon D													
Aşılama (%)		0,45+0,15	0,32+0,32	0,32+0,32	0,45+0,15													
FeSiMg5 (%)		1,96	1,69	1,69	1,96													
Kimyasal Analiz		Ocak	Ocak	Ocak	Ocak													
C		3,83	3,82	3,91	3,92													
Si		1,50	1,80	1,43	1,87													
Mn		0,11	0,12	0,11	0,11													
P		0,04	0,04	0,04	0,04													
S		0,013	0,013	0,013	0,013													
Kalıp soğutma süresi (sn)		120																
Kalıp dönme süresi (sn)		150																
Kalıp kaplama süresi (sn)		60																
Kalıp devri (devir/dakika)		1200																
Döküm sıcaklığı (°C)		1542	1539	1541	1544													
Mikroyapı Özellikleri	Ölçüm Yeri (Bölge) mm	Grafit Notu (*)	Flotasyon	Sementit (%)	Perlit (%)	Grafit Notu (*)	Flotasyon	Sementit (%)	Perlit (%)	Grafit Notu (*)	Flotasyon	Sementit (%)	Perlit (%)	Grafit Notu (*)	Flotasyon	Sementit (%)	Perlit (%)	
																		İç
	30	1	-	5	35	1	-	2	40	1	-	25	50	1	-	15	60	
	Orta	45	1	-	-	40	1	-	-	50	½	-	-	60	1	-	-	60
		60	1	-	-	40	1	-	-	50	½	-	-	60	1	-	-	60
		75	1	-	-	40	1	-	-	50	1	-	-	60	1	-	-	60
	Dış	90	1	-	-	40	1	-	-	50	1	-	-	60	1	-	-	60
	Sonuç						EN İYİ				EN KÖTÜ							

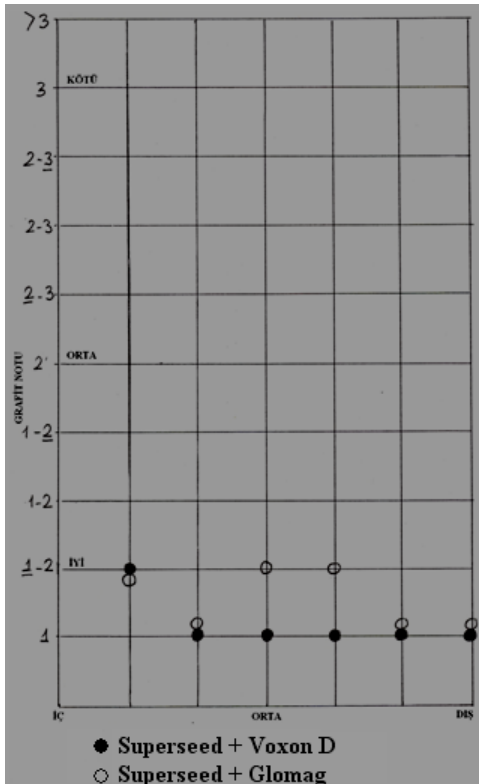
(*) 1 – iyi, 2 – orta, 3 – kötü



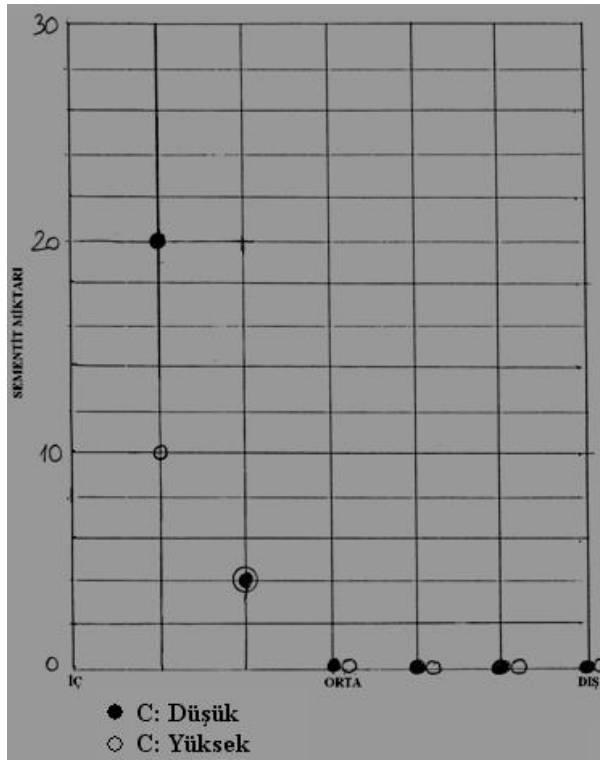
Şekil 3.11. Karbon oranına bağlı olarak grafit formundaki bölgesel değişim [17]



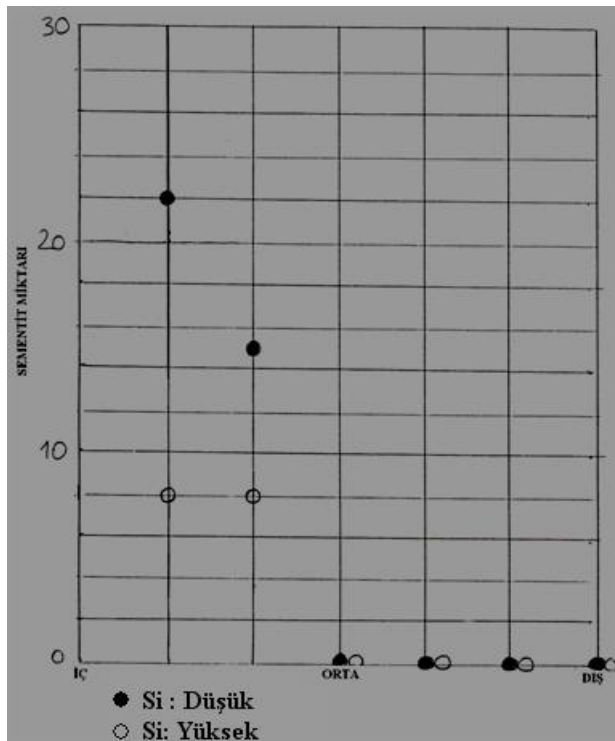
Şekil 3.12. Silisyum oranına bağlı olarak grafit formundaki bölgesel değişim [17]



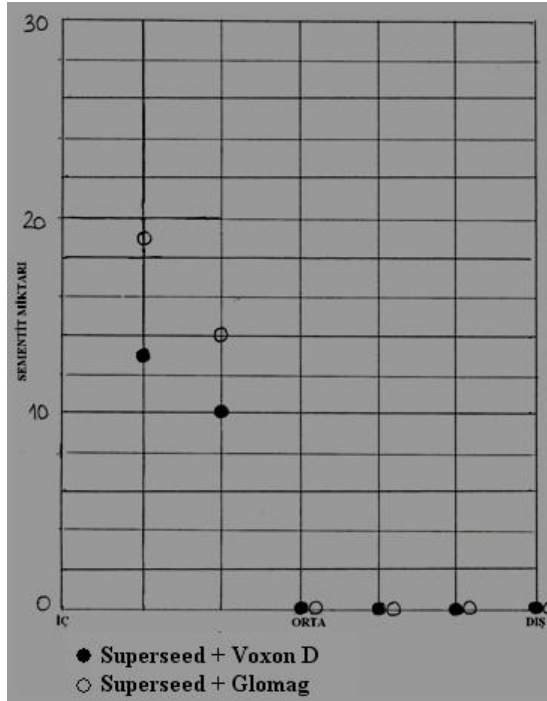
Şekil 3.13. Aşılama çeşidine bağlı olarak grafit formundaki bölgesel değişim [17]



Şekil 3.14. Karbon oranına bağlı olarak sementit miktarındaki bölgesel değişim [17]



Şekil 3.15. Silisyum oranına bağlı olarak sementit miktarındaki bölgesel değişim [17]



Şekil 3.16. Aşılacağı çeşidine bağılı olarak sementit miktarındaki bölgesel değişim [17]

3.6.3.6. İkinci deneysel çalışma

Bu deneysel çalışmada üç farklı aşılacağı türü ve beş element miktarındaki değişimler ile sekiz farklı deney yapılarak grafit formu ve mikroyapıda ki sementit miktarı yoğunluğu araştırılmıştır (Tablo 3.11 – 3.12).

Tablo 3.11. Farklı element miktarları ve aşılama malzemelerine bağılı olarak yapılmış deneyler [17]

Faktör	Katılan Malzeme	Adım 1	Adım 2				
A	Karbon (C)	3,80	3,90				
B	Silisyum (Si)	1,40	1,80				
C	Mangan (Mn)	0,15	0,30				
D	Bakır (Cu)	1,25	1,75				
E	Kalay (Sn)	0	0,05				
F	FeSiMg5	1,70	2,00				
G	Aşılacağı	Superseed+Glomag (50/50)	Superseed+Vaxon D (70/30)				
Deneyler (2)	Adımlar						
	A	B	C	D	E	F	G
i	1	1	1	1	1	1	1
ii	1	1	1	2	2	2	2
iii	1	2	2	1	1	2	2
iv	1	2	2	2	2	1	1
v	2	1	2	1	2	1	2
vi	2	1	2	2	1	2	1
vii	2	2	1	1	2	2	1
viii	2	2	1	2	1	1	2

Tablo 3.12. Sekiz farklı deney için ilave bilgiler [17]

Deneysel		2.i				2.ii				2.iii				2.iv				2.v				2.vi				2.vii				2.viii													
Özellikler																																											
Aşılavıcı Çeşidi		Superseed+Glomag				Superseed+ Vaxon D				Superseed+ Vaxon D				Superseed+Glomag				Superseed+ Vaxon D				Superseed+Glomag				Superseed+Glomag				Superseed+ Vaxon D													
Aşılama (%)		0,32+0,32				0,45+0,15				0,45+0,15				0,32+0,32				0,45+0,15				0,32+0,32				0,32+0,32				0,45+0,15													
FeSiMg5 (%)		1,69				1,96				1,96				1,69				1,96				1,69				1,69				1,96													
Kimyasal Analiz		Ocak		Pota		Ocak		Pota		Ocak		Pota		Ocak		Pota		Ocak		Pota		Ocak		Pota		Ocak		Pota		Ocak		Pota											
C		3,83		3,73						3,82								3,92		3,92						3,91																	
Si		1,50		2,96						1,80								1,87								1,43																	
Mn		0,11		0,13						0,30								0,11								0,30																	
P		0,04		0,04						0,04								0,04								0,04																	
S		0,013		0,014						0,013								0,013								0,013																	
Cr		0,02		0,03																																							
Cu		-		1,25				1,75		1,25				1,75				1,25		1,75				1,75				1,25		1,75													
Sn		-		-				0,05						0,05				0,05						0,05				0,05															
Mg		-		-																																							
Kalıp soğutma süresi (sn)		120																																									
Kalıp dönme süresi (sn)		150																																									
Kalıp kaplama süresi (sn)		60																																									
Kalıp devri (devir/dakika)		1200																																									
Döküm sıcaklığı (°C)		1542								1539								1544								1541																	
Mikroyapı Özellikleri		Ölçüm Yeri (Bölge) mm		Grafit Notu (*)		Flotasyon		Sementit (%)		Perlit (%)		Grafit Notu (*)		Flotasyon		Sementit (%)		Perlit (%)		Grafit Notu (*)		Flotasyon		Sementit (%)		Perlit (%)		Grafit Notu (*)		Flotasyon		Sementit (%)		Perlit (%)		Grafit Notu (*)		Flotasyon		Sementit (%)		Perlit (%)	
				İç		15	1	-	2	92	1	-	25	98	1	-	25	98	1	-	10	95	1	-	10	95	1	-	5	90	1	-	5	98	1	-	20	95	1	-	15	95	
		Orta		30	1	-	2	92	1	-	25	98	1	-	15	98	1	-	10	95	1	-	10	95	1	-	3	90	1	-	2	98	1	-	15	95	1	-	15	95			
		Dış		45	1	-	-	92	1	-	2	98	1	-	-	98	1	-	2	95	1	-	-	95	1	-	-	90	1	-	-	98	1	-	3	95	1	-	3	95			
				60	1	-	-	92	1	-	-	98	1	-	-	98	1	-	-	95	1	-	-	95	1	-	-	90	1	-	-	98	1	-	-	95	1	-	-	95			
				75	1	-	-	92	1	-	-	98	1	-	-	98	1	-	-	95	1	-	-	95	1	-	-	90	1	-	-	98	1	-	-	95	1	-	-	95			
				90	1	-	-	92	1	-	-	98	1	-	-	98	1	-	-	95	1	-	-	95	1	-	-	90	1	-	-	98	1	-	-	95	1	-	-	95			
Sonuç		EN İYİ								EN KÖTÜ İRİ GRAFİTLER SEMENTİT YOĞUN												EN İYİ																					

(*) 1 – iyi, 2 – orta, 3 – kötü

3.6.3.7. Aşılama ile ilgili yapılan çalışma sonuçları

Birinci deneysel çalışmanın sonuçları

- Karbon oranı düşük ve silisyum oranı yüksek olduğunda ve aşılama çeşidi Superseed+Glomag olduğunda mikroyapıdaki grafit formu iyi olmaktadır.
- Karbon ve silisyum oranı yüksek olduğunda ve aşılama çeşidi Superseed+Vaxon D olduğunda mikroyapıdaki sementit miktarı düşmektedir

İkinci deneysel çalışmanın sonuçları

- C düşük, Si düşük, FeSiMg5 düşük ve aşılama çeşidi Superseed+Glomag olduğu durumda mikroyapıdaki grafit formu iyi olmaktadır.
- Mn düşük, C yüksek, Si düşük, Sn düşük, Cu düşük, FeSiMg5 düşük ve aşılama çeşidi Superseed+Glomag olduğu durumda sementit miktarı düşüktür.

3.6.3.8. Araştırma sonuçları

- Aşılama malzemesi, aşılamanın yapıldığı an ve aşılama miktarı küre sayısını dominant etkileyen faktörlerdir.
- Aynı malzemedan üretilmiş ürün üzerine yapılan çalışmalarda, aşılama miktarının %0,36' dan %0,64' e yükseltilmesi ile nodül sayısı %23 artmakta ve sementit oranı %10' dan %1' e düşmektedir.
- Küre sayısı=1219,36+589,28xAşılama miktarı-630x(%)FeSiMg5, (Rc=0,88 doğruluk oranı)

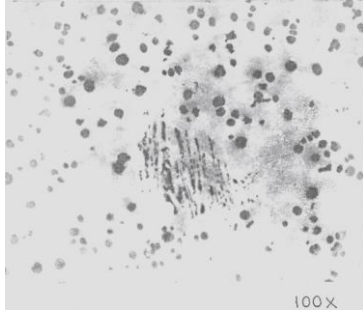
Yedi adet KV1 malzemesi kontrol edilmiştir.

Sertlik : 110 – 113 HB arasındadır (K9 normuna göre 104 – 112 HB)

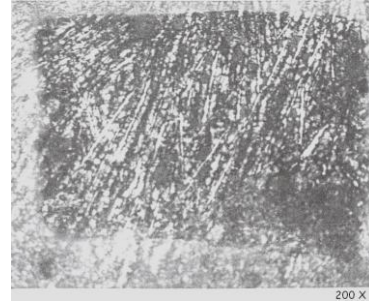
Eğme (Bükme) mukavemeti : 1132 – 1839 MPa arasındadır (K9 normuna göre 1300 MPa)

Elastik modül : 127.830 – 138.266 MPa arasındadır (K9 normuna göre 150.000 MPa)

Grafit Yapısı : Küresel formlu (K9' a göre 1 ve ½ numara uygun).
Mikroporozite (Şekil 3.17) kesitte dağınık olarak görülmektedir.



a)



b)

Şekil 3.17. a) Grafit yapısı küresel formlu, malzeme spesifikasyonu K9 ve K22' ye göre 1 ve ½ numara uygun, mikroporozite kesitte dağınık olarak bulunmaktadır, x 100
b) Ana yapı ıslah, kesitte karbürler >%8, Diğerleri (kalıntı) Ostenitler ~%2, x200 [17]

Ana doku : Islah dokusu (menevişlenmiş martensit). Tek tek bulunan karbürler de kabul görebilir.

Kesitte karbürler : > %5,

Diğerleri (kalan) ostenitler : ~%2 (ısıt işlem)

3.7. Düktil Demir Malzeme Bileşimindeki Ana Elementler

Karbon (C)

C içeriği uygun grafit hacmini sağlayacak şekilde minimum ve C yüzmesini en aza indirecek şekilde maksimum olmalıdır [18]. Düktil demirde C oranı %3–4 arasında değişir. Grafit kürelerin sayısı, C yüzdesine doğrudan bağlıdır. Bir başka deyimle C yüzdesi arttıkça grafit küre sayısı da artar. C oranındaki artış ayrıca akışkanlık ve beslenme özelliklerini de iyileştirerek dökülebilirlik kabiliyetini artırır. Karbon eşdeğerliğinin (CE) 4,3' den daha büyük değerleri grafit kürelerinin oluşumu ve büyümesini teşvik eder. CE, 4,6' dan daha büyük olan bileşimlerde ve 2,54cm' den daha kalın kesitlerde grafit kürelerinin döküm parçasının üst yüzeyine doğru yüzmesi (flotasyon) ve C segregasyonuna neden olması olağandır [19].

Silisyum (Si)

Düktül demirde, Si miktarı normal olarak %1,80 ile 2,80 arasındadır. Si miktarı C eşdeğerliğini etkilediği için grafitleşme ve C segregasyonu üzerinde de önemli rol oynar. Si, ötektoid dönüşümde oluşan ferritin oranı ve sertliği arttırarak dökme demir mukavemetinde de bir artış meydana getirir. Bundan dolayı Si içeriğini kontrol altında tutmak gerekir. Si daha çok FeSi olarak işlem sonunda sıvı metale ilave edildiğinde (aşılama) grafit küre sayısının kontrolü açısından daha etkin olur [19, 20, 21].

Kükürt (S)

Düktül demirde S'ün en önemli etkisi grafitleri küreleştirmek amacıyla ilave edilen Mg miktarını arttırmaktır. Küresel grafitin çekirdeklenmesi için Mg işlemi (küreleştirme) ve aşılama esnasında S içeriğinin minimum olması gereklidir. Dökme demirde Mg ilavesinden önceki S oranı ergitmedeki uygulamanın ve şarj bileşiminin fonksiyonu olarak değişiklik gösterir. Mg ilavesinden sonraki S oranı yaklaşık %0,015 civarındadır [11, 21].

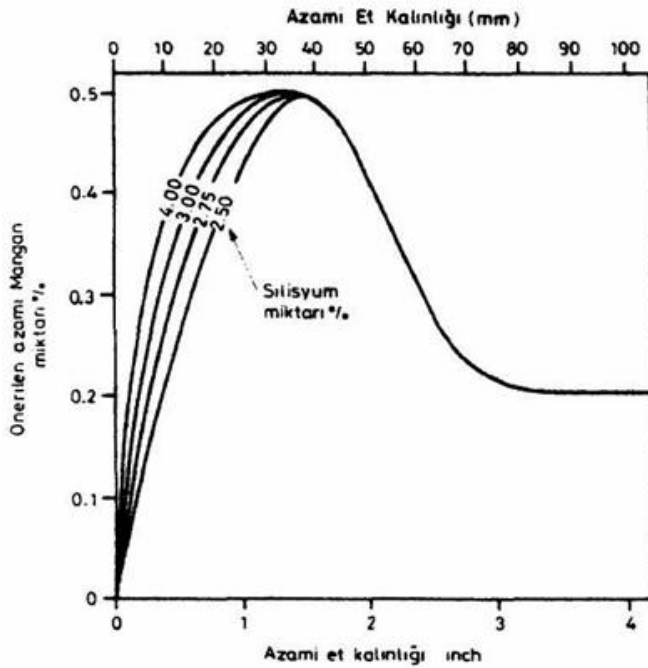
Fosfor (P)

Gri dökme demirde olduğu gibi düktül demirde P, steady olarak bilinen çok kırılğan bileşiğin oluşumuna yol açar. Darbe geçiş sıcaklığına önemli derecede etki eder. P, malzeme tokluk ve sünekliğini kötü yönde etkilediği için genellikle %0,05 maksimum değerinde sınırlanır [19, 21].

Mangan (Mn)

Önem sırasında C ve Si'dan sonra yer alan elementtir. Döküm halinde karbürlerin oluşmasını önlemek için Mn oranının kontrol altında tutulması gerekir. Mn orta dereceli bir karbür oluşturuca etkisi olduğundan oranı Si yüzdesi ve kesit aralığına bağlı olan bir maksimum değerde sınırlanır.

Kesit (cidar) kalınlığı 25 mm veya biraz fazla olan ince dökümlerde, Mn'nın karbür oluşumunu teşvik edici etkisi, artan Si miktarı ile karşılanmakta ve bu durum döküm inceldikçe devam etmektedir. 12 mm kesit kalınlığındaki bir döküm parçası için Si oranında %2,5' ten % 3,0'e artış, Mn oranının %0,25' ten %0,35' e artmasına imkan verir. Kalın kesitli döküm parçalarında segregasyon nedeniyle bu tür Mn artışı söz konusu olmamaktadır. Mn tercihli olarak sıvı içine segrege olur. Soğuma ne kadar yavaş olursa bu segregasyon daha çok olacaktır. Ortalama %0,4 Mn içeren alaşımda son katılaştıran sıvıdaki Mn oranının %2,5 veya daha fazla olabileceği kanıtlanmıştır. Özellikle, nispeten kalın kesitlerde bu segregasyon Si tarafından engellenemez. Zira Si segregasyonu tam tersinedir. Yani ilk katılaştığında zenginleşir. Şekil 3.18' de nispeten kalın kesitli düktil demirde manganez dağılımı gösterilmektedir [11].



Şekil 3.18. Azami parça et kalınlığına bağlı olarak Si miktarı ile önerilen Mn miktarının değişimi [11]

Magnezyum (Mg)

Mg sadece küresel grafit elde etmek için gerekli değildir. Aynı zamanda etkili aşılama ve yeterli küreleşmeyi sağlamak içinde gereklidir. Küresel grafit üretmek için gerekli Mg içeriği genellikle %0,04–0,06 arasındadır. İlk başta S içeriği

%0,015' in altında ise daha düşük Mg içeriği (%0,035–0,04 alanı içinde) uygun olacaktır. Mg 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. Düşük seviyelerde Mg'yu muhafaza etmek dros oluşumunu en aza indirir. Optimize edilmiş bir Mg içeriği yüksek küre sayısı ve küresellik elde etmek için gereklidir. Yine de Mg genellikle onun küreselleştirme etkisinin güvenilirliğini geliştirmek için nadir toprak elementlerinin küçük miktarı ile bağlantılı olarak ilave edilir [15, 21].

Seryum (Ce)

Ce çok güçlü karbür kararlaştırıcıdır. Ce ile işlem görmüş demirler %3,80' nin üzerinde C içeriğine ve çok fazla FeSi aşılama yapmaya sahip olmalıdır. Ce, küresel grafit oluşumunu engelleyen istenmeyen kalıntı elementlerini etkisizleştirmek ve aşılama 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. Ce grafit yapısını geliştirmek için çoğu Mg ilave alaşımları ve aşılama yapıcıların ikincil unsuru gibi ilave edilir. Hurda düktil demirin tekrar ergitilmesi esnasında uzaklaştırılır [6].

Küresel olmayan grafiti teşvik eden ikincil elementler;

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

Al: %0,13 üzerinde, As: %0,09 üzerinde, Bi: %0,002 üzerinde, Pb: %0,005 üzerinde, Sn: %0,04 üzerinde, Ti: %0,04 üzerinde, Antimonit, Te ve Se dahi zararlıdır. Bu elementlerden iki ya da daha fazlasının birleşmesi daha fazla zararlı olabilir. Ca ile birlikte Ce ve diğer nadir toprak elementlerinin ilavesi engelleyici elementlerin zararlı etkilerinin çoğunu etkisizleştirir ve çoğu FeSiMg küreselleştirici alaşımları %0,3-1,0 Ce ve diğer nadir toprak elementlerini içerir. %0,5-1,0 Ca dahi genellikle vardır [22].

Perliti teşvik eden ikincil elementler;

Ni, Cu, Mn, Sn, As ve Sb' nin hepsi perliti teşvik eder ve artan etkiye göre burada sıralanır. Bu elementler ham malzemelerin kalıntı elemanı olarak demire girebilir, %0,3' e kadar Cu ve %0,1' e kadar Sn tam perlitik yapılar gerekli olduğu zaman pota ilaveleri olarak kasten kullanılabilir. Hemen hemen bütün kalıntı elementler perlit oluşumunu teşvik eder ve onların etkilerini birbirine bütünler. Bundan dolayı yüksek saflıkta bir şarj normal dökümde tam ferritik yapıları ya da daha az tavlmalı ferritik yapıları başarmak için gereklidir [6].

Karbürleri teşvik eden ikincil elementler;

Mn ve Cr bütün mekaniksel özellikleri etki eden en önemli iki elementtir. Cr miktarı %0,1'in altında, Mn miktarı da %0,5 civarında olmalıdır. Aksi takdirde yapıda serbest karbürlerin mevcudiyetine rastlanır. Karbür oluşumunu Mn ve Cr gibi teşvik eden diğer elementler V, B, Te ve Mo'dir. Bu elementlerin tavsiye edilen maksimum % oranları Cr=0,05, V=0,03, B=0,003, Te=0,003 ve Mo= % 0,01-0,75 olmalıdır. Ancak bu değerler döküm parçasının kesitini göz önüne almayan ortalama değerlerdir. Belirtilen elementlere ilaveten Ni ve Cu ilaveleri ile de daha tok daha mukavemetli, yüksek sıcaklığa ve korozyona direnci daha yüksek alaşımlar elde edilir [1, 18, 23].

3.8. Düktil Demir Malzemelerin Isıl İşlemi

Düktil demir; ısıl işlemler için son derece uygun malzemedir. Bu nedenle, özellikleri çok geniş bir aralıkta değişecek şekilde üretilebilirler. Yapıdaki C miktarı, alaşım ilavesi, dökümhane işlemlerinin kontrolü ve/veya ısıl işlemlerle, yaklaşık olarak sıfırdan %0,80 ve fazlası arasında herhangi bir değere ayarlanabilir. İstenen özelliklerin matris yapısına bağlı olarak değişmesi yüzünden matris yapısı tamamen ferrit, perlit+ferrit, tamamen perlit, martenzit, beynit veya tamamen ostenit olabilmektedir.

Yapılan işlemlerin kontrolü ile ısıtma işlemi ihtiyaç duyulmadan çeşitli matris yapılarına uygun düktil demir üretilebilir. Bununla beraber gerek gerilim giderme gerekse daha yüksek mekanik özelliklerinin elde edilmesi için ısıtma işlemi kaçınılmaz olmaktadır.

Düktil demir dökümde çok yumuşak bir yapı arzu ediliyorsa dökümün sertliğini arttırıcı Mn, P, Cr, Ni ve Mo gibi alaşım elementlerini mümkün olduğu kadar az içermelidir.

Özet olarak ısıtma işlemleri; gerilim gidermek, döküm halindeki karbürleri parçalamak, matris yapısını değiştirmek, yüzeylerin sertleşmesini sağlamak ve temper gevrekliğini minimuma indirmek amacıyla uygulanırlar. İkisi dışında bütün ısıtma işlemleri, belli bir sıcaklık aralığında metalografik olarak özelliklerin değişmesi esasına dayanırlar. Dökme demirin metalografik yapısının değişim sıcaklığı, içerdiği Si oranına bağlı olarak değişir [24, 25].

3.8.1. Yumuşatma tava

Bu ısıtma işleminin amacı döküm durumunda mevcut olan karbürleri parçalamak ve ferritik yapıda matris oluşturmaktır. Yumuşatma tava dökme demirler, içyapılarında bulunan serbest ve/veya perlit içindeki sementitin ferrit ve grafit fazlarına ayrışacağı sıcaklıklarda yeterli sürelerde tutularak mümkün olduğu kadar yumuşak bir içyapı durumu elde edilir. Yumuşatma tava, ferrit tava, ferritleme veya grafitleme olarak da adlandırılmaktadır. Yumuşatma tava'nın bir diğer yararı da yavaş soğutmaya dikkat edilmesi halinde parça içindeki iç gerilmelerin de giderilmesidir. Yumuşatma tava çok değişik sıcaklıklarda yapılabilir. Çok uzun tava sürelerinde alaşımsız dökme demirlerde 400 °C'den itibaren perlit az da olsa parçalanmaya başlamaktadır. Ancak perlit parçalanmasının hızı 620 °C'den sonra hızla artmakta ve kritik sıcaklığın hemen altında en yüksek değerine ulaşmaktadır. Bu sıcaklık alaşımsız ve az alaşımlı dökme demir türleri için 740 ile 829 °C arasında değişmektedir. Dökme demirlerde içyapının ferritlenmesi sementit içinde bulunan karbonun grafit fazı oluşturacak şekilde yayınması ile olur. Karbonun daha düşük yoğunluklu grafit olarak ayrışmasında hacim artmaları ve malzemenin "büyümesi"

söz konusudur. Bu hacim artışı malzemenin kimyasal bileşimine, tav süresine ve tav sıcaklığına bağlıdır. Kritik sıcaklık bölgesinin seviyesi kimyasal bileşime ve alaşım elementi miktarına bağlıdır, özellikle Si etkisi büyüktür; Si'un her %1'lik artışı otektoid sıcaklığı 25 °C artırır, bunun yanında C yayınmasını da teşvik eder. Ostenit bölgesini genişleten alaşım elemanları dönüşüm sıcaklığını düşürürler. Nitekim %1 Sn bu sıcaklığı 10 °C, %1 Ni ise 30 °C düşürür. Cr katkıları kritik sıcaklığı yükseltir, buna karşın V katılmasıyla vanadyum karbür oluştuğundan önemli bir etki görülmez. Mo ise ostenit dönüşümünü geciktirir ve kritik sıcaklığın düşmesine neden olur. Yumuşatma tavı sıcaklıklarında yeni grafit çekirdeklerinin oluşumu mümkün olmadığından perlit parçalanması ile açığa çıkan C yayınarak en yakın, grafit çökeltisi üzerinde kristalleşir. Bu olayı kolaylaştıran veya engelleyen her etki parçalanmayı da etkiler. Cu ve Sn gibi alaşım elemanları grafit çökeltilerinin üzerine veya çevresinde biriktiklerinden, C yayınmasını yavaşlatırlar ve yumuşatma tavı sırasında perlit parçalanmasını yavaşlatırlar. Nikelin ise bu olaylara önemli bir etkisi yoktur. Alaşım elemanlarının miktarı ayrıca sementitin kararlılığını belirler. Si ve Al gibi sementitte çözünemeyen ve ferritte biriken elementler sementitin kararlılığını düşürürler. Yani Si ve Al ferritlenmeyi teşvik ederler. Buna karşın karbür oluşturan elementler sementit içinde tercihen çözünürler ve bu fazın kararlılığını artırır. Bunlar arasında Cr, Mn, V ve yüksek derişikliklerde S sayılabilir. Bu elementler sementitin parçalanmasını yavaşlatırlar ve hatta tümüyle önlerler. Bunlar arasında Cr en etkin olanıdır [26].

3.8.2. Tam tavlama

Karbürlerin parçalanması 900 °C' de 2 saat beklemeyle gerçekleştirilebilir. Kalın kesitli döküm parçaları için, sıcaklığı homojenleştirmek amacıyla her 2,5 cm için 1 saat fazla bekletme yapılır. Bekletmeden sonra parça 690 °C' ye soğutulup bu sıcaklıkta 5 saat süre ile bekletilir ve oda sıcaklığında soğutulur.

3.8.3. Kritik sıcaklık altında tavlama

Döküm parçalarının karbürsüz ve tamamen ferritik yapıda olabilmeleri için kritik dönüşüm sıcaklığının 55 °C altında yaklaşık olarak 5 saat tutulur. Parça, her 2,5 cm kalınlık için bir saat bekletilir. Daha sonra 595 °C' ye kadar yavaş soğutularak havada soğutmaya bırakılır.

3.8.4. Sertleştirme tava

Sertleştirme ısıl işlemi genel olarak normalleştirme, su verme ve temperleme işlemlerini kapsar.

3.8.4.1. Normalleştirme tava

Yapıyı ostenit hale getirmek için gerekli sıcaklık karbürler mevcutsa 900 °C olarak, değilse Al sıcaklığının 30 °C üzerinde seçilir. Bu sıcaklıkta bekletme süresi 1 saat, kalınlığın her 2,5 cm' si için 1 saat şeklinde olmalıdır. Soğutma ise genellikle normal havada yapılır. Kalınlığı 2,5 cm' den fazla olan parçalarda normalleştirmeyi kolaylaştırmak için ilave olarak gerilimi giderme tavlama gerekebilir. Normalleştirmenin bir başka uygulaması ise 900 °C' den kritik sıcaklığın 30 °C üstüne kadar fırında soğutup, bu sıcaklıkta kısa süre bekletip havada soğutmak şeklindedir. Bilinen normalleştirmeye nazaran yüzde uzama ve darbe direncinde belirgin bir artış saptanabilmektedir [27].

3.8.4.2. Çift normalleştirme

Normalizasyon ısıl işleminin diğer bir türü olan bu ısıl işlemle, akma mukavemeti %2 ve sertlik %10 azalmakta, buna karşılık uzama değeri %50 ve darbe direnci %50 – %150 arasında artmaktadır. Bu işlemle ilk olarak 925 °C' de homojenleştirme uygulanır. Daha sonra üst kritik sıcaklığın 28 °C üzerinde soğutulur ve bir süre tutularak bilinen normalleştirme işlemi uygulanır [28].

3.8.4.3. Su verme ve temperleme

Normalleştirmeye nazaran çok üstün özellikler sağlamadığı ve çatlama tehlikesinin varlığından genellikle pek uygulanmaz. A₁ 'in üzerinde 50 °C sıcaklıkta 1 saat kadar tutulduktan sonra, parçaya genellikle 100 °C' lik yağ banyosunda su verilir ve yapı martensit hale dönüşür. Ostenit - martensit dönüşümde soğuma hızı önemlidir ve büyük ölçüde alaşımlandırma ile etkilenir. Su vermeyi takip eden işlem temperlemedir. Seçilen temper sıcaklığına bağlı olarak değişen sertlik değerleri elde edilir. Süre yaklaşık olarak parçanın her 2,5 cm kalınlığı için 2 saat olarak alınabilir [27].

3.8.5. Martemperleme

Çeliklerde olduğu gibi düktil demirlerde de uygulanır. ostenitleme işlemi takiben parça Ms sıcaklığının 50 °C üzerinde tuz banyosunda belirli bir süre bırakılır ve havada soğutur. Bu işlemde yapı martensitik olup yüksek mukavemet ve süneklik beraberce elde edilir [27].

3.8.6. Ostemperleme

Bu ısıl işlem ile aşınmaya dayanıklı ve yüksek sertlik, mukavemet ve tokluk özelliklerine sahip beynitik yapı elde edilir. Isıl işlem ostenitleme ile başlar. Malzeme 200 – 400 °C arasında bir tuz banyosuna ostenit-beynit dönüşümü tamamlanana kadar bırakılır. Daha sonra havada soğutulur. Erişilen sertlik değeri 220 – 450 HB arasında değişir. Isıl işlem sıcaklığı düşükçe sertlik artar [27].

3.8.7. Yüzey sertleştirme

Düktil demirler kolayca alev veya endüksiyon sertleşmesine tabi tutulabilir. Parçanın maksimum sertliğe haiz ve bu sertliğin derin olması için yapının sertleştirme işleminden önce perlitik olması ve bileşimin %1,5 – 2 Ni ihtiva etmesi gerekir. Yapı perlitik ise su vermeden önce parçayı yüksek sıcaklıkta uzun müddet tutup su vermek lazımdır [27].

3.8.8. Nitrasyon

Parçalar azot ortamında 2 – 3 saat bekletildikten sonra 60 Rc sertliğe ulaşır. Yorulma mukavemeti 170 – 210 MPa' dan 270 MPa' a artar. Si nitrojen difüzyonunu azaltmasından dolayı yüksek olması istenmez [27].

3.9. Düktil Demir Malzemeler Üzerine Yapılmış Patent Çalışmaları

US Patent No 3 415 307 – 1968 [29]: Metal kalıba dökülen düktil demir borular karbürlü yapıya sahiptir. 0,127 mm kalınlığındaki sıvı püskürtme kaplama sıvı metalin eşit dağılmasını sağlar. Böylelikle daha düzenli yapı oluşturularak döküm sonrası mikroyapıda karbür azalır. Eğer kum astar veya ıslak püskürtme refrakter kaplama uygulanırsa katılaşma ve soğuma hızı yeteri kadar düşürülür. Perlitik yapı az miktarda karbür veya ferritle elde edilir. Kaplama kalınlığı çok yüksek olduğu için karbürlü çil yapı perlitte dönüşür. Her iki halde de istenen mekanik özellikleri elde edebilmek için borunun tavlama sıcaklığına çıkarılır (938 °C), daha sonra sıcaklık düşürülerek ferritleme tavlama sıcaklığına ugratılır (746 °C). Perlitik yapıya sahip boruya yalnızca ikincil ferritleme tavlama sıcaklığıyla ulaşılır. Darbe direnci bu durumda büyük ferrit tane boyutları yüzünden bozulacaktır.

Grafit küreleri sayıları ve boyutları katılaşma hızı ve grafitizasyon potansiyeli ile ilgilidir. Çok yüksek soğuma hızı grafit nodüllerinin küçük olmasına sebep olur. Bu küçük grafit nodülleri başlangıçta oluşur. Katılaşma hızının çok artması ile grafitizasyon bastırılır ve yüksek oranda sementit oluşur. Sementitin grafit büyümesini kestiği birçok mikroyapı gözlemleriyle ispatlanmıştır. Katılaşma hızı yavaşladığında ise primer sementit oluşumu azalır. Bu durumda da grafit küreleri hızlı büyür ve perlit oluşur. Ostenit katılaşma sıcaklığı altında oluşur ve perlit+grafit'e veya ferrit+grafite dönüşür. Halbuki bunlar difüzyon reaksiyonudur. Ferrit+grafit'e dönüşüm normal döküm pratiğinde kolay olarak oluşmaz. Bundan dolayı dökümü ferritik yapıya dönüştürmek için uzun süreli tavlama çevrimi gerekir. Diğer taraftan perlit+grafit'e dönüşüm kolay oluşur ve normal aşılama ile yavaş soğumada gerçekleşir.

Aşılama ilavesi ve dökümden önce aşılama ilavesinin yerleştirilmesi genel bir uygulamadır. Boru dökümünde FeSi ve CaSi' li metal kalıp üstündeki kaplamalar ticari yaş kalıp kumlarının bir tarzıdır. Burada aşılama ilavesi kaplamaya karıştırılır veya kaplamanın üstüne giydirilirler. Bu durum doğal olarak küçük grafit kürelerini oluşturacaktır ve çil yapısı az olacaktır. Bu tip borularda kolay bir tavlama ile karbür ve perlit giderilir. Çünkü bu yöntemle yapılan aşılama ile elde edilen yapı elamanları çok küçüktür. Toz aşılama ilavesi, kum kaplanmış kalıp yüzeyine verildiği takdirde döküm yapısı daha küresel, az karbürü ve az miktarda ferritli olur. Her aşamada şartlar ne olursa olsun borulardan ferritik bir yapı elde etmek için mutlaka tavlama yapılmalıdır.

Bu patentte döküm yapısı çilsiz ve yüksek oranda ferritik olarak elde edilmiştir. Kompozisyon, aşılama, katılma hızı ve soğutma hızı kontrol edilerek bu sağlanmıştır. Daha önceki uygulamalarda son çekirdekleyiciler sıvı metali boşaltma sırasında ilave edilmiştir. Ancak bu uygulamanın optimum küreselleşmeyi vermediği tespit edilmiştir. Bu metot çilsiz perlit esaslı mikroyapı vermiştir.

Bazı boru üretimlerinde metalik kalıba FeSi ve CaSi kaplamalar uygulanır ve bu kaplamalar FeSi olduğu için aşılama görevi görür. İnce grafit kristalleri oluşur ve çil oluşumu azalır. Daha yuvarlak küreler, daha az karbür yapıları görülür. Bu durum karbür oluşumu yerine grafitizasyonu sağladığı için ferritik yapı döküm elde edilir. Bununla beraber ferritik tavlama süresi de düşmüş olur.

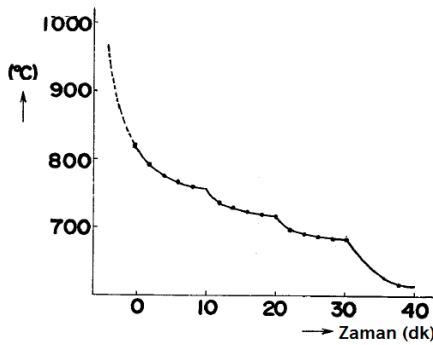
Doğru aşılama, doğru sıcaklık aralığı ve bileşimde ise karbür oluşumu bastırılıp grafitizasyon tamamlanır ve son yapı tamamen ferritik olur. Bu yeni teknik ultra geç aşılama olarak anılır ve sıvı önce ostenite dönüşür sonrada ostenit, ferrit+grafit'e dönüşür. Boru toplam kompozisyonları C 3,1 – 3,4, Si 2,8 – 3,3, Mg 0,03 – 0,06' dir. Bu kompozisyona sahip boruda %5' ten az perlit oluşur ve hiç karbür oluşmaz. Kompozisyon aralığı C 3,0 – 3,7, Si 2,3 – 3,75, Mg 0,02 – 0,07 gibi genişletilebilir. Bu kompozisyon %75'ten az perlit verir ve çil yapı oluşmaz. Grafit küreleri ise çok ve ince boyutludur. Böyle bir boru 746 °C' de basit bir ferritleme tavlama ile hedeflenen mekanik değerleri verir.

Sıvı metalin uygun aşılması kaçınılmazdır ve bu durum katılaşma sırasında aşılama ajanının metale geçmesi ile ilgilidir. Grafitleşmeyi sağlayan çekirdekler katılaşma sırasında ve hemen öncesinde sıvı içinde dağılırlar. Aşılama prosedürleri tercihen potada Mg' la beraber, sıvı metal kalıba dökülürken granül olarak, kalıp yüzeyindeki kaplamaya toz olarak ve sıvı metal huzmesi kalıba akarken aşılama ajanı toz püskürtülebilir. Bu durumda kalıp içerisinde aşılama ajanının oluşturduğu bir sis bulutu oluşur. Ultra geç aşılamanın mekanizması aşılama ajanının bir ölçüde çözülmesini sağlar ve bütün parçalanmış katı partikül aşılama ajanları sıvı içine gömülür. Yeteri kadar homojenizasyon zamanı kalmadığı için etkili bir grafit çekirdeklenmesi verir. Son Mg ilave prosedürü ise dökümden dakikalar önce yapılır. Mevcut yenilikçi metotta prosedür buna benzerdir ancak aşılama ajanı miktarı sıvı kompozisyonuna bağlı olarak belirlenir.

Ultra geç aşılama prosedürü aşağıdaki gibidir;

- a. Chute (yollukta) Aşılama: Sıvı metal potadan üniform hızla yolluğa giderken aşılama ajanı katılır. İşlem döküm süresi boyunca devam eder. Aşılama ajanı miktarı boru ağırlığının %0,05 - %0,20 arasındadır. Ortalama katkı oranı boru ağırlığının %0,12'si kadardır. Küçük boyutlu granül şeklinde aşılama ajanları ilave edilir. Büyük aşılama ajanları katılaşma boyunca sıvıda kalabilir.
- b. Spout (huzmede) Aşılama: Sıvı metal kalıbın yüzeyine çarptığında aşılama ajanı sürekli bir şekilde toz halinde ilave edilir. Miktarı ise boru ağırlığının %0,25 ile %0,75' i kadardır. Bu ağırlıklar FeSi' daki Si yüzdesine göre değişebilir.
- c. Kaplamada Aşılama: Kalıp kaplama iki tabakalı olabilir. İlk tabaka refrakter kaplamadır. İkinci tabaka CaSi aşılama ajanı içeren tabakadır. Buna kuru püskürtme tabakası da denir. Kalıp yüzeyinin mm^2 ' sine 5 – 15 g ilave edilir. Bu ise 1 ton metalde 560 – 1865 g aşılama ajanı yapmaktadır. Tercih edilen kaplama ise mm^2 'ye 10 g' dir. Bu boru çapına göre değişim gösterir. Bu tür kaplamalı aşılama, ıslak püskürtme kaplama olarak bilinir. Püskürtme çamuru şeklinde verilir ve refrakter malzeme bentonit-silika kumudur ve sıcak kalıba uygulanır. Bu kaplama yeteri kadar aşılama ajanı içerir. Ayrıca kaplamadaki pürüzlü yüzey dönen kalıpta metal tutunmasını da sağlar. %60 Si, %30 Ca' lu CaSi bileşimleri aşırı geç aşılama için en çok tercih edilir ve uygundur. 100 mesh tane boyutu tercih edilir [29].

US Patent No 4 157 111 – 1979 [30]: Yüksek sıcaklıktaki gaz dökümün boşluğuna üflenir. İlk safhada kalıp içersindeki metal kızıl – sıcak şarttır. Buraya sıcak gazın gönderilmesi dökümün soğuma hızını azaltır. Bunun sonucu olarak yapıdaki sert oluşumlar azalır. Bu patentteki en önemli yenilik tavlamanın kalıp içindeki boruya yapılmasıdır. Bu işlemler sonucu iç gerilmeler alınır ve borunun fiziksel mukavemeti artar. Bunun alternatifi olan klasik uygulamada borular kalıptan çıkarılır ve yatay tavlama fırınına sürülür. Bu kalıptan çıkarma, fırına gönderme ve çekme bir takım dezavantajları yanında getirir. Örneğin kalıptan çıkarılan boru hızlı soğur. Tavlama fırınına gidinceye kadar sıcaklık çok düşmüştür. Doğal olarak fazla yakıt harcanır. Özellikle çapı 500 mm’ den büyük olan borular için büyük alan ihtiyacı vardır. 600 mm çapında, 6 m uzunluğunda ve 15 mm et kalınlığında bir boru düşünelim. Böyle bir borunun analizi ise C:%3,4, Si:%2,6, Mn:%0,4, P:%0,05, S:%0,01 ve Mg:%0,04’dür. Bu borunun soğuma diyagramı Şekil 3.19’ da verilmiştir.



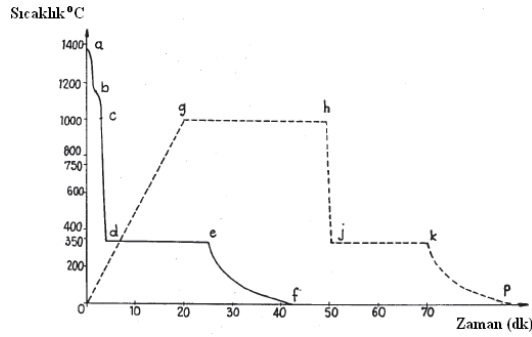
Şekil 3.19. Soğuma diyagramı [30]

Bu boruda Si miktarının %2 - %3 arasında kalması ferrit miktarını yüksek tutmak için zorunludur. Bu oranı üzerindeki Si miktarı boruyu kırılgan yapar. Bu diyagramda verilen kesikli noktalı kısımlar önerilen tavlama bölgesidir ve %85 ferrit, %15 perlit, %0 sementit ve % 80 küreselleşme elde edilir. Bu boru Ar₁ sıcaklığından yavaş soğutulmalıdır. 950 °C’ den yukarıda tavlama sementiti dekompoze eder [30].

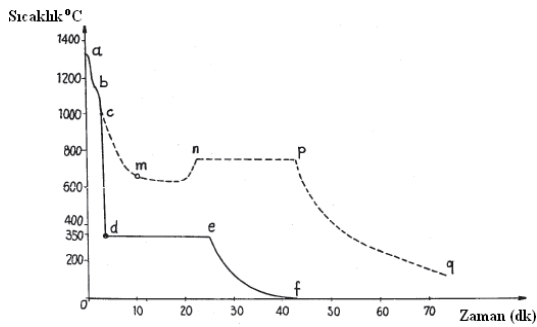
US Patent No 3 954 133 – 1976 [31]: Bu patent düktil demir boru üretimi ile ilgilidir ve yüzeyde çil olmaksızın ferritik yapı elde edilir. Bu ise kontrollü düşük oranda ısı kaybı sayesinde sağlanır. Isı kaybı ise fırında veya izole edilmiş savurma döküm kalıpları ile olur.

US Patent No 4 448 610 – 1984 [32]: Metal kalıpta savurma dökümle elde edilen borunun içersine üniform su spreyini (1000 °C' den 350 °C' ye kadar soğutmak için) kapsar. Sonrasında boru kalıptan çıkarılır ve bir fırın içinde izotermal beynitleme gerçekleşir. Bundan sonra atmosferde soğutulur. Bu yolla hafif, çok iyi bir mukavemet özelliğine sahip ovalleşmesi makul seviyede olan bir boru elde edilir.

Şekil 3.20, beynitik boru elde etme diyagramı (üstteki çizgi normal ısıl işlem, alttaki beynitik yapı için ısıl işlem) ve Şekil 3.21'de patent konusu ısıl işlem eğrisiyle alışıl gelmiş ısıl işlem eğrisi verilmiştir.



Şekil 3.20. Beynitik yapı elde etmek için geleneksel tavlama, Kesikli çizgi patent, düz çizgi bilenen tavlama eğrisi [32]



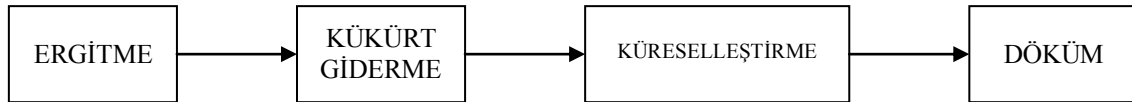
Şekil 3.21. Patent ile bulunan termik tavlama ile termik ferritleme tavlama tekniklerinin karşılaştırılması [32]

1600 mm çapındaki borular, refrakter kaplamalı ve su soğutmalı kalıpta üretilir. Sonra, boru 800 ile 1000 °C mertebesinde bekletilir ve tamamen ostenit yapısı elde edilir. Bu kademedan sonra bütün boru uzunluğu boyunca su hava ile karışık bir şekilde borunun iç yüzeylerine püskürtülür ve 250 – 400 °C' ye getirilir. Bu işlem sayesinde ostenit, beynitik yapıya dönüşür. Boru kalıptan çıkartılır ve bir fırında

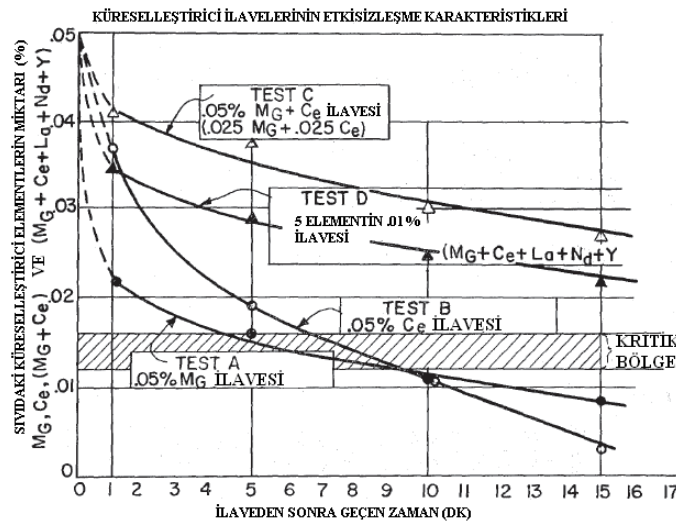
bekletilir. Fırındaki bekletme sıcaklığı 450 – 250 °C arasındadır. Deneyle göstermiştir ki bu uygulama sayesinde boru ağırlığı kayda değer şekilde düşmüştür. Çalışma basıncında fazla ovallık vermeyecek şekilde arttırılmıştır.

US Patent No 4 619 713 – 1986 [33]: Kalıptaki boru A₁ sıcaklığı üstünde iken çıkartılır. Perlit oluşumuna müsaade etmeyen bir hızla soğutulur. Ostenit sıcaklığı bölgesinde bekletilir. Hızlı soğutma bir kere durdurulursa (Ms üstünde) yavaşça soğutulur. Belirlenen zaman boyunca sabit sıcaklıkta boru tutulur (Ms üstü). Son olarak sıcaklık indirilir.

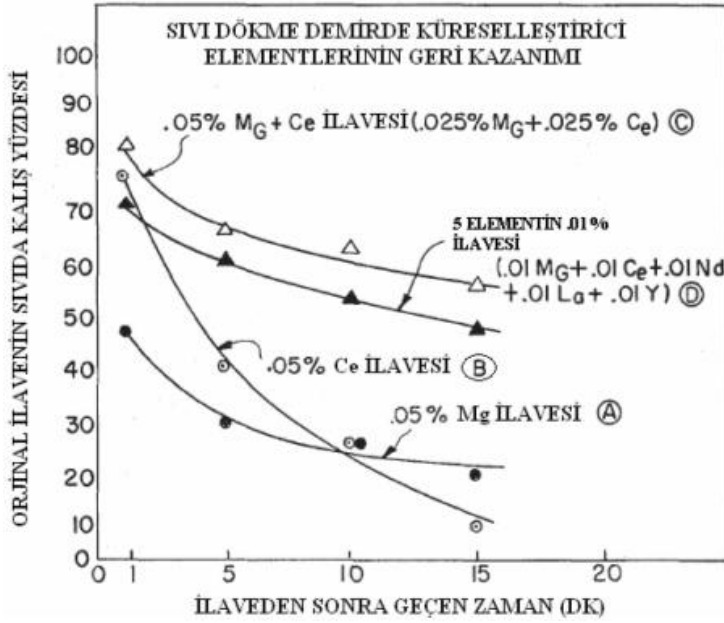
US Patent No 3 905 809 – 1975 [34]: Düktil demir üretim prosesi, banyoya düşük – kükürtlü dökme demir katmayı, en az iki grafit – küreselleştirici element içermeyi kapsar. Her küreselleştirici element içeren ilave malzeme düşük konsantrasyondur. Bu yolla küreselleştirici banyoda uzun süre kalır ve istenen yapıyı verir. Herhangi bir elementin konsantrasyonu küresel (nodüler) grafit üretmek için tek başına yetersizdir. Birden fazla küreselleştirici element ilave edilirse her anlamda (verim, banyoda kalış, kayıp, az curuf gibi) yarar sağlanır (Şekil 3.22 – 3.25).



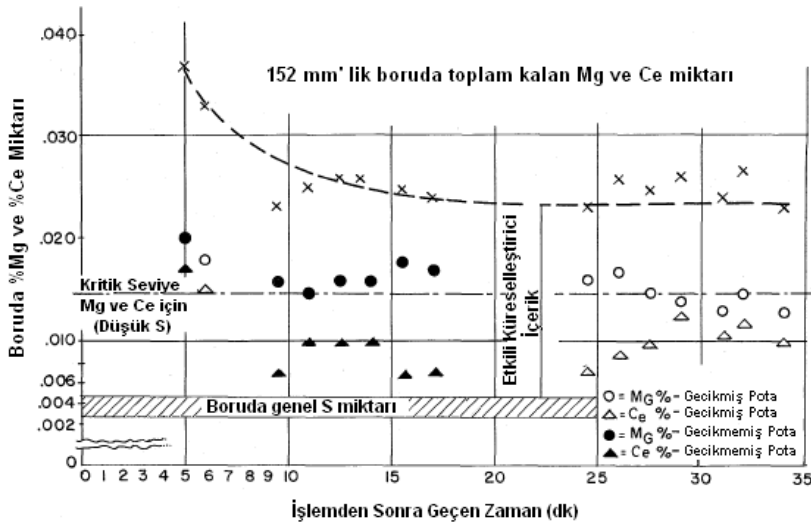
Şekil 3.22. Düktil demir ana üretim adımları [34]



Şekil 3.23. Efektif küreselleştirici elementlerin zamana bağlı olarak sıvıda kalış yüzdeleri [34]



Şekil 3.24. Orijinal ilave, banyoda kazanım ve bekleme süresi ilişkisi verilmiştir. Patent konusu olan birden fazla küreselleştirici ilavesi öngörülmüştür [34]



Şekil 3.25. Düktil demir boru üretiminde ilave edilen Mg ve Ce'un etkisizleşme oranı. İki küreselleştirici ilavesinin sonucu, sıvıda kalan yüksek küreselleştirici bulunuşunun sağlanması. Bekleme etkisi az [34]

Uzun yıllar düktil demirde Mg ilavesi, Mg içeren alaşım veya Mg şeklinde yapılmıştır. En dikkat çeken zorluk şiddetli reaksiyon ve beyaz duman (MgO 'lu) oluşumudur. Beyaz parlak ışık gözü bozar. Diğer dezavantaj ise yüksek reaktiflik sonucu sıvı banyoda az Mg kalmasıdır. İlave olarak Mg kaybı, buharlaşma, oksidasyon ve kükürtle birleşme sonucunda görülür. Mg kaybı etkisizleşme – fading olarak anılır.

Bu dezavantajlar Mg' un ilavesinin şekli ile azaltılır. Mg' u basınç altında vermek veya sarmak bunlardan birkaçıdır. Sıvı alaşım Mg' lu bileşik üstüne dökülür. Diğer taraftan Ce' da küreselleştiricidir, az reaktiftir ve kazanımı yüksektir. Ce, ötektik üstü düktil demirde tercih edilir. Karbür yapıcıdır ve Mg' a göre daha kötü küreselleştiricidir.

Bu patent ile küreselleştirici ilave yüzdesi düşürülmüştür. Ayrıca küreselleştirici ilavesi ile doğan duman ve sis miktarı azaltılmıştır. Etkisizleşme (fading) azaltılmamıştır. Küreselleştirici seçimi ve miktarı da çalışılmıştır.

% 6' dan az küreselleştirici element içeren ilaveler seçilmiştir. Bu yolla duman azalmış, etkisizleşme azalmış, döküm için ilave ihtiyacı azalmış ve curuf (dros) azaltılmıştır.

Tablo 3.13'de düşük kükürtlü dökme demir sıvı sıcaklığının küreselleşmeye etkisi görülmektedir. Tablo 3.13'de verilen sonuçların elde edildiği sıvı alaşım analizi %C:3,4–3,6, %Si:1,9–2,1, %Mn:0,25–0,30, %S:0,005–0,012, %P:0,04–0,06'dır [34].

Tablo 3.13. Yapılan 3 testte ilave edilen malzemeler ve zamana bağlı eriyikte kalan toplam miktarları [34]

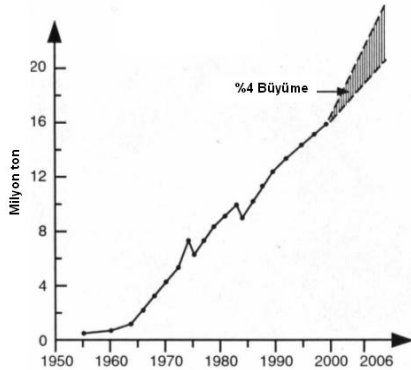
Test	İlave edilen elementler	Toplam ilave miktarı (%)	Zamana bağlı eriyikte kalan toplam miktarlar (dk)			
			1	5	10	15
A	Mg	0.05	.022	.016	.011	.008
B	Ce	0.05	.037	.019	.011	.003
C	Mg+Ce	0.05 (0.025Mg+0.025 Ce)	.041 (.020) (.021)	.037 (.017) (.020)	.030 (.015) (.015)	.027 (.013) Mg (.014) Ce

BÖLÜM 4. DÜKİL DEMİR BORU VE BAĞLANTI PARÇALARININ DÖKÜMÜ

4.1. Giriş

Düktil demir borular 1970 yılından sonra su iletiminde yoğun olarak kullanılmışlardır. Bu boruların ana malzemesi olan düktil demir 1948 yılında tesadüfen bulunmuştur. Dökme demirler ailesinin en önemli üyesi olan düktil demir, küresel grafitli dökme demir olarak ta anılmakta olup yeni malzemeler gurubuna girer. Düktil kelimesi “Sünek-kırılmaz” anlamındadır ve yük altında esnek davranışı simgeler. Birçok toprak katmanlarında işletimde olan düktil borular için ortalama 100 yıl ömür biçilmiştir. Bu borular rakiplerinden göreceli olarak pahalı, fakat servis-bakım gereksinimleri (ve masrafları) çok azdır. Düktil borular deprem direnci, hidrolik verim ve su kalitesini koruma yönüyle de rakipsizdirler.

Dünya düktil demir üretimi 20 milyon ton/yıl civarındadır ve bunun %25 – 30’u düktil demir boru üretiminde (dolayısıyla tüketimine) kullanılır (2006). Nüfus oranını dikkate alınırsa Türkiye düktil boru talebinin 60 bin ton/yıl’ı aşkın bir mertebede olduğu söylenebilir (Şekil 4.1).



Şekil 4.1. Yıllara göre değişen dünya düktil demir üretimi (1950 – 2006)

Yeni yüzyılın başında (2000+) Dünyada 1 milyardan daha fazla insan içilebilir su bulamamaktadır. 2.5 milyara yakın insan ise güvenli su arıtma hizmetlerinden yoksundur. Kentleşme ve nüfus artışına bağlı olarak durum kötüleşmektedir. Doğal olarak bulunan ve iletilen su giderek daha kıymetli hale gelmekte ve kalitesini korumak ise sorun olmaktadır. İçme suyunun iletiminde;

- a. Borulu ve basınçlı iletim sağlamak ve kaçak oranını düşürmek,
- b. Yabancı ve zararlıların suya karışmasını önlemek,
- c. Tat ve doyum özelliklerinin kalıcı olmasını sağlamak ana unsurları oluşturur.

Bu beklentileri düktil demir borular rakiplerine göre büyük oranda sağlar ve bundan dolayı düktil demir borular su şebekelerinde çokça tercih edilen, göreceli olarak yeni malzemedir. Birçok açıdan düşünüldüğünde düktil demir borular diğer alternatiflere göre daha avantajlıdır. Trafik – deprem yüklerine ve noktasal yüklere dayanım, basınç oynamalarını tolere etme ve düşük pompaj maliyeti diğer pozitif unsurlardır.

Türkiye coğrafi konumu ve jeolojik yapısı itibari ile bir fay hattı üzerinde bulunduğundan sık sık depremlere maruz kalmaktadır. Diğer taraftan çok süratli bir kentleşmenin gözlemlendiği şehirlerimiz adeta şantiye görünümündedir. Bunun doğal sonucu olarak, yapılan kazı çalışmalarında suni olarak yer hareketleri oluşmaktadır. Ayrıca ani ve noktasal yük ve hasar tehlikesi doğmaktadır. Her ne sebeple olursa olsun yer hareketlerinden en çok etkilenen ve zarar gören yapılar, şehirlerin alt yapılarıdır. Bir deprem afetinin ardından hasar gören şehir içme suyu şebeke hatları yüzünden insanların en doğal ihtiyaçlarından biri olan su temin edilemeyecektir. Diğer yandan büyük şehirlerimizin içme suyunu karşılayacak su rezervleri çok sınırlı olduğundan zor şartlarda temin edilmiş ve şehirlere kadar getirilmiş olan içme suyunun hiç ziyan edilmeden tüketiciye ulaştırılması da büyük önem taşımaktadır. Bunun uygun malzeme ile yapılmış sağlıklı çalışan bir alt yapı ile gerçekleştirilebileceği açıktır. Kısacası şehir içme suyu şebeke hatlarında kullanılacak malzemenin seçimi yapılırken genel şartlara, şehirlerin kendilerine özgü özel şartlarda eklenerek projeler geliştirmek en uygun davranış olacaktır. Kullanılacak malzemelerin seçiminde aşağıda belirtilen kriterlerin dikkate alınmasında büyük yarar vardır. Bunlar;

- a. Seçilecek malzemedeki beklenen teknik özellikler,
- b. Seçilecek malzemenin montaj, bakım ve onarımı ile işletme kolaylığı,
- c. Seçilecek malzemenin ne kadar süre ile hizmet vereceği (ömür),
- d. Seçilecek malzeme için işletim ve ömür boyu maliyet.

Seçilecek malzeme mukavemet ve korozyona dirençlilik yanında küçük çaptaki yer hareketlerini yutabilecek (kırılma tokluğu yüksek) nitelikte olmalıdır. Bunun için deforme olmadan esneyebilen, eğilebilen ve darbelere karşı dirençli malzemelere ihtiyaç vardır. Bu beklentiyi düktil demir borular büyük ölçüde karşılar.

Eski gri döküm (font) borular da bütün metalik borularda olduğu gibi içte taşlaşma ve kireç bağlama mutlaka meydana gelir. Bunun sonucunda gerek çap düşmesi, gerek pürüzlülüğün çok artması nedeniyle, boru hattının su iletme özelliği çok azalacağından, hattın randımanı çok düşer. Eski su akış miktarını elde etmek için basıncı arttırmak gerekeceğinden, pompalar zorlanır, elektrik akımı ve yakıt harcaması artar. Bu negatif unsurlar düktil demir borularda yoktur.

İçme suyu şebeke hatlarında kullanılacak olan boru ve ek parçalarından beklenen iyi özellikler araştırılıp uygun malzemenin tespiti yapılırken malzemenin spesifik yapısı yanında, bakım onarım ve işletme kolaylığının da dikkate alınması büyük önem taşımaktadır. Altyapı inşaatlarında kullanılacak malzemenin kaliteli olması yanında zamandan ve iş gücünden tasarruf sağlayabilmek amacıyla kolay monte edilebilen, ileriye dönük olarak da bakım, onarım ve işletme giderleri düşük olan ürünlerin seçilmesi ekonomik açıdan büyük öneme sahiptir. Bu konuda çelik, pik, düktil demir boru ve bağlantı parçaları arasında bir araştırma yapıldığında; çelik boru ve eklerinde gerek yeni hatlar döşenirken gerekse sonradan ortaya çıkabilecek arızalarda uygulanan ekleme yöntemi “Kaynaklı Birleştirme” yöntemidir. Kaynak yapılırken kaynak yapılan bölgede istenmeyen gerilme kuvvetlerinin oluşacağı ve bunun sonucu olarak ta kaynak bölgesinde mukavemet kaybı meydana geleceği aşikardır. Ayrıca yine yüksek sıcaklık nedeni ile kaynak bölgesindeki boru izolasyonlarının tahrip olacağı ve ileride bu bölgelerde korozyondan kaynaklanan problemlerle karşılaşılacağı açıktır. Ayrıca kaynak işleminin yapılabilmesi için bir kaynak jeneratörünün gerekliliği ve bunun taşınması gibi zorluklar göz ardı edilemez.

Pik boru ve bağlantı parçaları, lamel grafitli yapıya sahip son derece gevrek ve kırılğan malzemelerdir. En küçük yer hareketlerinde derhal kırılarak büyük emeklerle ve mali külfetlerle şehre kadar getirilmiş olan içme suyunun israf olmasının yanında abone hizmetlerinin de aksamasına neden olurlar. Bağlantı ve eklerde sızdırmazlık sağlanması için genellikle eski kurşun kalafat tekniği kullanılır. Bu hem çok zaman alıcı, hem ekonomik açıdan pahalı, hem de sağlıksız bir yöntemdir. Ayrıca bağlantıyı gerçekleştirebilmek için birçok ekipmana da ihtiyaç vardır. Bu sebeplerden dolayı alt yapılarda pik boru ve bağlantı parçalarını kullanmak çok dezavantajlıdır.

Düktil demir boru ve bağlantı parçaları kullanıldığında ise eklemler muflu (geçmeli) olarak yapılmakta ve sızdırmazlık ise lastik contalarla sağlandığından hem yeni döşenen hatlar hem de ileride ortaya çıkabilecek arızaların giderilmesinde zaman ve işgücünden önemli ölçüde tasarruf sağlanmaktadır. Ayrıca düktil malzeme ile yapılan işlemlerde ilave ekipmanlar kullanmaya ihtiyaç yoktur. Bütün bunlar göz önüne alındığında altyapı yatırımlarında düktil demir malzemenin üstünlüğü tartışılmaz.

Düktil boru ve bağlantı parçaları muflu ve lastik contalı montaj sağlayabilen yapıda imal edilmiş olması sebebiyle altyapı inşaatlarında kullanıldığında, çelik, pik ve diğer alt yapı malzemelerinden çok daha uzun ömürlü ve sağlıklı hizmet verebilirler. Ayrıca altyapı inşaatları sırasında kaynak jeneratörü vs. gibi ilave ekipmanlara ihtiyaç yoktur. Diğer taraftan düktil boru ve bağlantı parçaları imalat sırasında dış yüzeyleri önce püskürtme çinko daha sonra bitüm ile iç yüzeyleri ise yüksek kaliteli çimento ile kaplanmış olduklarından hem korozyona karşı iyi korunmuş hem de katodik koruma gibi ilave ve pahalı bir sisteme ihtiyaç göstermezler. Bütün bunların ışığı altında gerçekçi ve objektif bir değerlendirme yapıldığında, şehir içme suyu şebeke hatlarında neden düktil boru ve bağlantı parçalarının kullanılması gerektiği kolayca görülebilir. Kısacası düktil boru ve bağlantı parçalarını kullanmak demek; daha sağlam, daha uzun ömürlü, işletme giderleri bakımından uzun vadede daha ucuz, en az su israfı ve çok daha önemlisi içme suyu abonelerine kesintisiz hizmet verebilmek demektir

4.2. Düktil Demir Boru Üretimi

Düktil demirin, dökme demirler (gri döküm, temper döküm) ve çelik döküm vb. içindeki payı giderek artmaktadır. 1991’de toplamın %30’una yaklaşan düktil döküm payı 2005’ te %50’ lere ulaşmıştır. 20 milyon ton/yıl’a yaklaşan düktil demir döküm içinde muflu ve flanşlı boru payı üçte bire yaklaşmıştır. Örneğin ABD’de 2000 yılında üretilen toplam 4 milyon ton düktil demir dökümün 1,25 milyon tonu boru üretimine gitmiştir. Ülkemizdeki toplam demir dökümler içinde düktil demirin payı %25’e yakındır. Savurma döküm düktil boru üretimimiz 2004 yılında 100 bin ton/yıl kapasite ile Samsun’da başlamıştır (Samsun Makine Sanayi A.Ş.).

Fransa Kralı XIV. Lui’ nin talimatı ile Paris’te döşenen dökme demir borulardan bir kısmı hala kullanılmaktadır. 1664 yılında üretilen bu boruların 350 yıl sonra – bugün – hala iş görüyor olması dikkat çekicidir (Şekil 4.2 – 4.4). 1950’lerden itibaren düktil demir malzeme yüksek mukavemeti ve darbe direnci özelliği ile gri dökümün yerini almaya başlamıştır. 1970 ortalarında bütün büyük pik-gri döküm boru üreticileri düktil demire dönmüşlerdir. Gelişmiş ekonomilerde toplam dökümün (demir dışı dahil) % 15’i boru ve fittings, % 2’si pompa ve kompresör üretimine gitmektedir.



Şekil 4.2. Fransa’da 300 yılı aşkın süredir serviste olan dökme demir borular. Dökme demir boruların ilk kullanıldığı örnekler 15. yy Almanya ve Fransa’sına aittir [35]



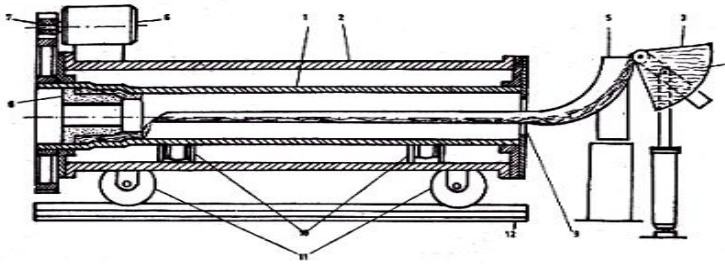
Şekil 4.3. Döküm yoluyla üretilen flanşlı dökme demir boru örneği [35]



Şekil 4.4. Savurma döküm tekniği ile üretilmiş eski pik borular, Sarıyer

Düktül boruların üretimi dünya genelinde De Lavaud savurma döküm yöntemi ile gerçekleştirilmektedir. Savurma dökümün ilk endüstriyel uygulamasına dökme demir boruların üretilmesiyle başlanmıştır. Savurma döküm ekipmanlarında ve girdilerinde sağlanan gelişmelerle birlikte boyutsal tolerans ve uyulması gereken metalurjik esaslarda esneklik ve güvenilirlik elde edilmiştir.

Düktül demir boru üretimi 3 değişik döküm metodu ile gerçekleştirilebilir. Bunlar; gravite döküm, sürekli döküm ve savurma dökümdür. Gravite döküm ve sürekli döküm ile gerçekleştirilen boru üretimlerinde sınırlamalar söz konusudur ve bu yöntemler fazla yaygın değildir. Bununla birlikte düktül demir boruların savurma döküm metodu ile dökümü, dünya genelinde en yaygın olarak kullanılan üretim yöntemidir. Şekil 4.5’ de elektrik motorlu eski tip savurma döküm makinesinde boru üretimi şematik olarak verilmiştir.



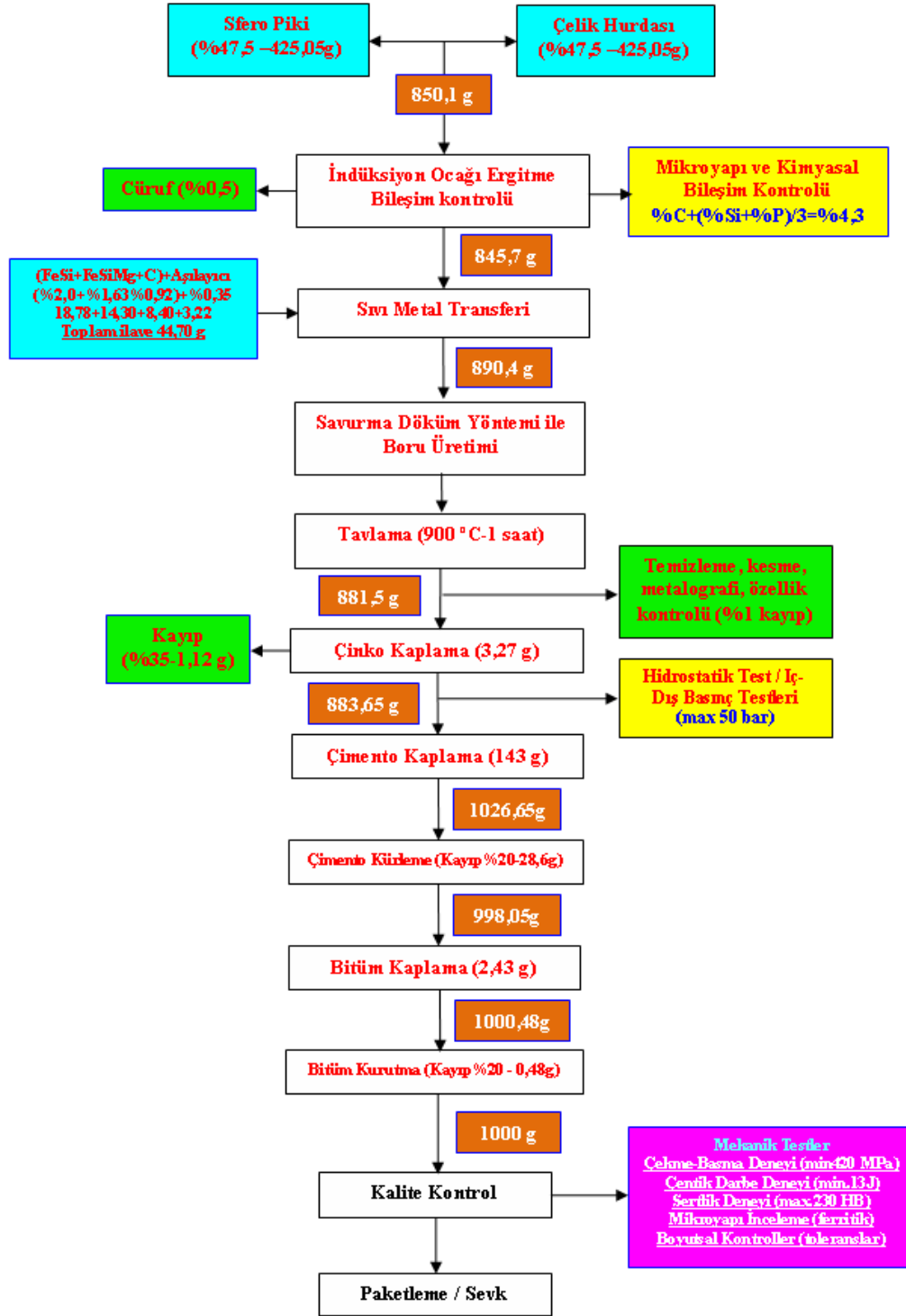
1 Kalıp, 2 Gövde, 3 Pota, 4 Ergimiş metal, 5 Maden dökme oluğu, 6 Motor, 7 Dişliler, 8 Kum maça, 9 Bilezik, 10 Ruleler, 11 Tekerlekler, 12 Ray

Şekil 4.5. Boru yapımında kullanılan yatay eksenli savurma döküm makinesinin kesiti

Düktül demir boru (DIP), dökme demir endüstrisinin bir ileri açılımıdır. 1940’larda dökme demir metalurjisinin gelişmesi ile dökme demirlere, süneklik, yüksek mukavemet ve kırılma öncesi az bir deformasyon kabiliyeti verilmiştir. Düktül demir

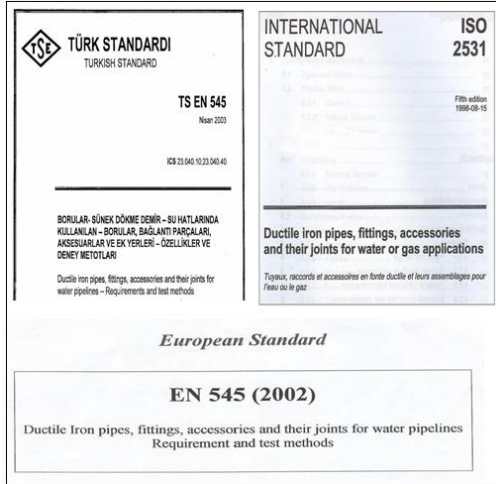
boru olarak anılan bu malzeme büyük avantaj sağlamış ve onları yüksek basınçlı sistemlerin (su, gaz vb.) standart borusu yapmıştır.

Gelişen teknolojiyle birlikte günümüzde düktil demir borular 80–2000 mm (en çok tercih edilen aralık, muflu ve flanşlı) nominal çaplarda, 4–9 m (6 m standart uzunluk) uzunluk aralığında üretilebilmektedir. Savurma dökümde kullanılan kalıplar çeşitli çeliklerden (alaşımli) yapılmaktadır. Kalıp, roller üzerinde kendi eksenine etrafında döner. Kalıbın dönme hareketi, motor ve dişliler tarafından sağlanır. Bu arada kalıbın ileri – geri hareketi, ray üzerinde hareket eden tekerleklerle olur. Tekerleklerin dönüşü, hidrolik sistem tarafından sağlanır. Döküme başlamadan önce kalıbın manşonlu ucu bir maça ile kapatılır. Metal dökme oluğu kalıp içine tümüyle girer. Dökülecek olan sıvı metal potaya doldurulur. Kalıp döndürülmeye başlanır. Sıvı metal potadan oluğa verilir. Oluk içinde yönelen metal oluk ucundan dönmekte olan kalıp içine dökülmeye başlar. Sıvı metal bir spiral şeklinde kalıba yapışır ve 4–6 sn içinde katılaştır. Kalıp aynı zamanda ray üzerinde hareket ettiğinden oluk ucundan uzaklaşır. Böylece spiraller yan yana sıralanırken boruyu meydana getirirler. Oluğun ucu bileziğe gelince borunun yapımı tamamlanmış olur. Bu arada potadaki ergimiş alaşım da tükenmiş olur. Dökülen sıvı metalin kalıp yüzeyine yapışmasını önlemek için ince toz halinde silis, grafit, bentonit ve alüminyum oksit karışımları kullanılır. Bu karışımlar, kalıbın dönme hızı düşürülerek ve kalıp, oluğa yaklaşırken serpilir veya oluğun metal akan ucunun altına yerleştirilen bir borudan döküm yapılırken atılır. Sıvı metalin verilmesi sırasında kalıbı taşıyan gövdenin (arabanın) ray üzerindeki hızı, döküm kalıbının dönme hızıyla iyi ayarlanmış olması gerekir. Kalıp, dökülecek boru çapına göre değişen hızlarda döndürülür. Katılma bitince makine durdurulur. Baştaki kum maça sökülür. Kalıp içindeki kızıl renkteki boru, iç kısmından tutan özel kısıkaçlarla dışarı çekilir. Kızgın haldeki boru, $\cong 500$ °C sıcaklıkta bekleyen tav fırınına gönderilir. Boru farklı sıcaklık ve zonlarda $\cong 40$ dk tavllanır. Böylece ani soğuma nedeniyle boru kesiti boyunca meydana gelen küresel grafit ve sert beyaz yapı, ferritik düktil demir yapısına dönmüş olur. Dökülmüş boruların iç yüzeyi çimento, dış yüzeyi ise çinko veya çinko/alüminyum kaplamadır. Çinko kaplama üzerindeki son tabaka ise 150 °C sıcaklıktaki bitüm banyosuna daldırılarak veya püskürtme ile uygulanan bitüm kaplamadır. Şekil 4.6' da, 100 mm iç çaplı düktil demir boru için girdi ve çıktılar verilmiştir.



Şekil 4.6. 1 kg düktil demir boru üretim akım şeması (İç çapı 100 mm - DN 100) olan düktil demir boru üretim girdi ve çıktıları referans alınmıştır)

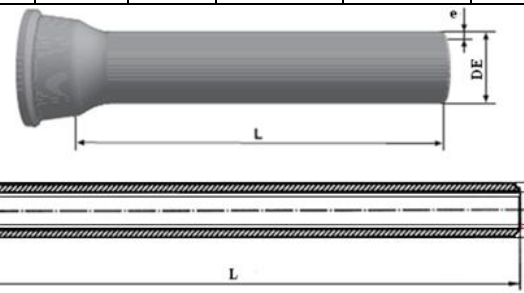
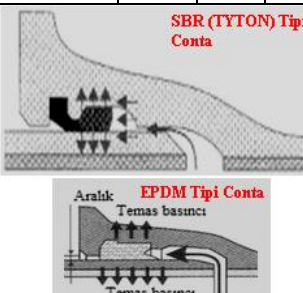
Savurma döküm yöntemi ile düktil demir boru üretimi standartlaştırılmıştır. ISO 2531 ve EN 545 ana standartları oluşturur (Şekil 4.7). Standartlarda her türlü işlemler, boyutlar, toleranslar (Tablo 4.1) ve performans değerleri verilmiştir.



Şekil 4.7. Savurma döküm düktil demir boru üretim standartları

Tablo 4.1. Düktil demir borular (K9-PN16) için boyutsal değerler

Boyutlar (mm)										
İç Çap (DN)	Dış Çap (DE)			Borunun Çevresi Ort.	Kullanım Boyutu (L)	Et Kalınlığı (e)	Beton Kaplama Kalınlığı (s)	Muf		
	Nom.	Max.	Min.					ID	P	B
100	118	119	115,2	370,5	6	6,0 / 4,7	4	121,9	80	174,2
150	170	171	167,1	533,8	6	6,0 / 4,7	4	175,3	85,9	219,2
200	222	223	219	697,1	6	6,3 / 4,8	4	229,3	93,7	277,4
250	274	275	270,9	860,4	6	6,8 / 4,5	4	281,9	95,3	338,3
300	326	327	322,7	1023,7	6	7,2 / 5,6	4	335,3	95,3	382,5
400	429	430	425,5	1347,1	6	8,1 / 6,4	5	442,0	127	507,5
500	532	533	528,2	1670,5	6	9,0 / 7,2	5	548,6	127	612,6
600	635	636	631	1939,9	6	9,9 / 8,0	5	655,3	127	722,1

Ağırlık (kg)				
İç Çap (DN)	Beton Kaplama (L=6m)	Muf	Borunun Kaplama Mufu Ağırlığı	Borunun Toplam Ağırlığı
100	12,4	4,3	95	107,6
150	19	7,1	144	163,2
200	25	10,3	194	219,2
250	31	14,2	255	286,2
300	37	18,6	323	360,8
400	84	29,3	482	566
500	106	42,8	669	774
600	126	59,3	883	1007,4

4.2.1. Savurma döküm

Savurma dökümünün en önemli özelliği sıvı metalin katılaşma esnasında dönen kalıp boşluğuna üniform bir şekilde beslenmesidir (Şekil 4.8). Santrifüj kuvvet, döküm şeklinin oluşturulmasında ve sıvı metalin beslenmesi sırasında önemli bir rol oynamaktadır. Proses avantajları; silindirik formlarda dökümler için uygunluk ve ürünün yüksek metalurjik kalitesidir. Savurma dökümde göze çarpan özellikler dökümün bütünlüğü, kalitesi, yüksek yoğunluğu ve metal olmayan inklüzyonları barındırmamış olmasıdır. Kalıp üzerine etki eden merkezkaç kuvveti, dönme hızının karesi ve dönme yarıçapı ile orantılıdır (v^2/r). Santrifüj kuvvet çoğu zaman yerçekimi ivmesinin (g) katları mertebesinde seçilebilir. Böylece kalıpla iyi bir temas, kuvvetli sıcaklık gradyanı elde edilir.



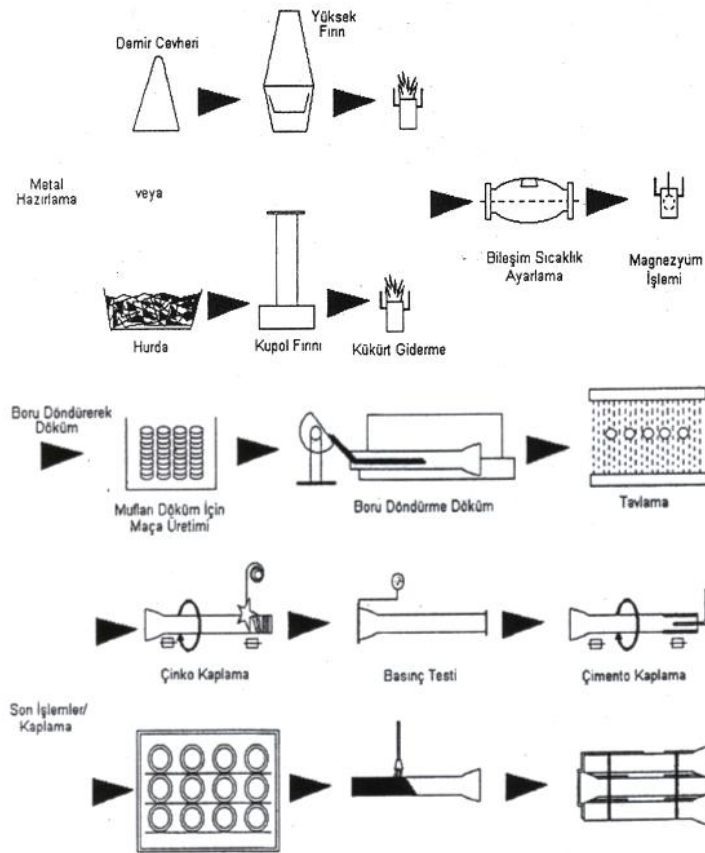
Şekil 4.8. Savurma döküm makinesine sıvı alaşım şarjı ve boru sıyırma

Döküm hızını kontrol eden birinci faktör, döküm işleminin, sıvı metalin soğuyup hamur haline geçmeden bitirilmesi gereğidir. Bununla beraber çok yüksek döküm hızları türbülansa ve hatta sıvı metalin saçılmasına yol açabilir. Oysa yavaş hızda dökümün, yönlendirilmiş katılaşma ve beslemeyi teşvik etmek gibi uygulamada büyük önem taşıyan avantajları vardır.

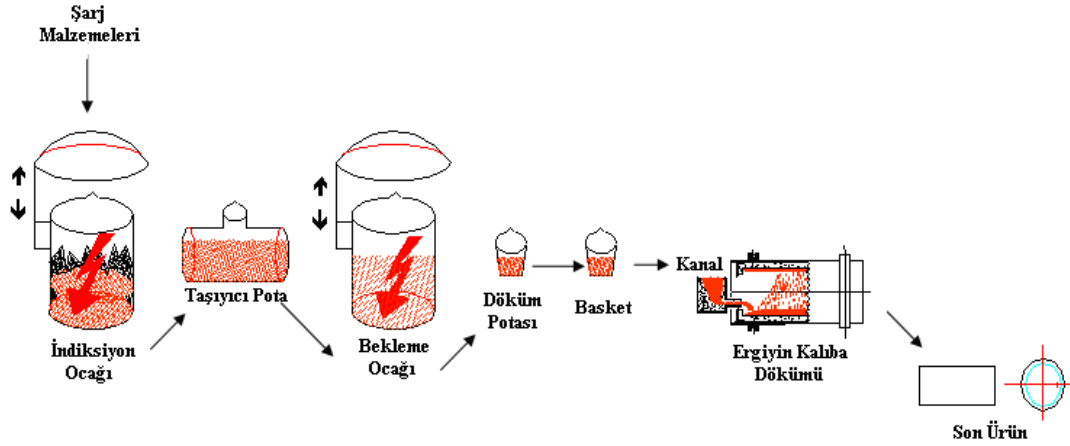
Dönme hızının seçiminde ekipmanın mekanik yetenekleri ve katılaşma sırasında oluşan çemberel gerilmeler önemli faktörlerdir. En yüksek santrifüj kuvvet küçük çapta boşluklu silindirik parçalar üretmek için kullanılır. Dönme hızı, üretilecek

döküm parçasının kalitesini etkileyen etkenlerden biridir. Düşük dönme hızları, kayma ve kötü bir döküm yüzeyine sebebiyet verebilir. Yüksek dönme hızları titreşimler oluşturabilir. Oluşan bu titreşimler segregasyon bantlarının gelişmesine sebep olur. Çok aşırı dönme hızları da çemberel gerilmeleri arttırabilir. Bu gerilmeler, metal katılaştırken kalıpta yarıkların ve dairesel çatlakların oluşması için yeterlidir. Örnek olarak 100 G' lik santrifüj kuvvet için dönme hızı ve döküm çapı arasındaki ilişki 400 mm çap için 700 dev/dak, 100 mm çap için 1300 dev/dak olmaktadır.

Sıvı metal hazırlama, savurma döküm ve sonlandırma işlemlerini kapsayan komple boru üretim şeması Şekil 4.9' da verilmiştir. Burada düktil demir boruların üretim akış şeması cevherden paketlemeye kadar işlem sırasıyla gösterilmiştir (yüksek fırınlı sistem). Şekil 4.10 ise özel pik şarjı ile çalışan ve çok esnek olan indüksiyon ergitmeli savurma döküm tesisi akım şemasını vermektedir.

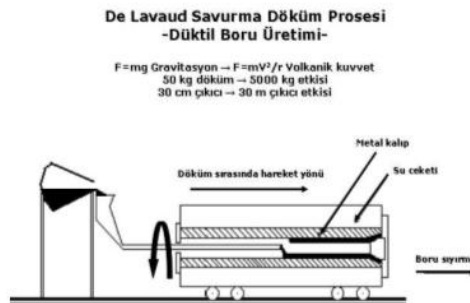


Şekil 4.9. Düktil boru üretim akış şeması



Şekil 4.10. Yeni nesil esnek savurma döküm boru üreticileri üretimlerini gömlek döküm tekniğine yaklaştırmışlardır

Şekil 4.11' de De Lavaud savurma döküm sistemi önemli ayrıntısı ile şematik olarak gösterilmiştir. Bu makinelerde üretim çok hızlıdır. 6 m' lik standart boydaki borudan DN 100 (100 mm iç çap) için saatte 50 adet, DN 400 için saatte 25 – 30 adet üretim hızı endüstri istatistiklerinde verilmiştir.



Şekil 4.11. De Lavaud tipi savurma döküm makinesinde üretim aşamaları (şarj, katılaşma, boru sıyırma ve şematik gösterim)

4.2.2. Savurma döküm makinesi

Boru üretiminde De Lavaud tipi makineler en çok tercih edilir. DN (80 – 6000 mm) en genel olan boyuttur. Sıvı metal kalıba özel yolluk ile verilir. Dönmekte olan kalıp su soğutmalıdır. Kum kabuk (reçineli) maça mufun iç şekline sahiptir. Katılaşma bittikten sonra hidrolik kontrollü çene ile boru kalıptan çekilir, tartılır ve boru iletim makinesi ile ötelenir.

Savurma döküm makinesi; döküm makinesi, savurma makinesi, boru çıkarma makinesi, boru döndürme makinesi, tartı cihazı, boru iletim makinesi, gezici hidrolik cihaz, makine gövdesi, soğutma sistemi, atık maça çıkarma cihazı, hidrolik sistem ve elektrik sisteminden oluşur.

Dökümden önce savurma döküm kalıplarının iç yüzeyleri taşlanır ve çekiçlenir. Bu yolla kalıp iç gerilmesi kaldırılır, katılaştırılan ergimiş demir boru yüzey kalitesi iyileşir. Genellikle ekonomik olarak basit şekilli parçalar için yönlenmiş katılaşmayı en iyi şekilde sağlayacak metal kalıplar tercih edilirler. Çelik ve dökme demir kalıplar değişik türlerde seramik kalıp kaplamaları ile birlikte kullanılır. Kalıp kaplamaları kalıpları termal şoka karşı korumak ve yüzeyi iyileştirmek için uygulanır. Kalıp kaplaması kullanılmaması durumunda sıvı metal kalıba yapışır. Bu dökümün kalıptan çıkarılmasını zorlaştırır ve metal kalıbın ömrünü azaltır. Sulu refrakter çamurdan, toz grafit, silika unu ve ferrosilikona kadar değişen çok çeşitli yalıtkan malzemeler tercih edilir.

Kalıp kaplaması için savurma döküm makinesi önünde iki set kalıp toz cihazı bulundurulur. Kaplama tozu kalıp–boru sürtünmesini azaltır, kalıp ömrünü arttırır, boruda iğnesel-noktasal porozite (pinhol) oluşumunu azaltır. Farklı boruların farklı alanları farklı tozlar gerektirebilir. Spiral besleme ve pnomatik toz püskürtme en genel uygulamadır. Kalıpların muf kenarını oluşturmak için mutlaka maça yerleştirilir (Şekil 4.12).



Şekil 4.12. Boru başı mufu için kalıba yerleştirilen reçineli maçalar

4.2.3. Sıvı metal

Genel sıcaklık aralığı ve besleme: 1360 – 1460 °C, 20000 kg/h

Bileşim (%);

C	: 3,4 – 3,6	Cr (max)	: 0,15
Si	: 2,3 – 2,5	Cu (max.)	: 0,2
Mg	: 0,03 – 0,05	Mn (max)	: 0,40
Pb (max)	: 0,002	Sn (max)	: 0,003
P (max)	: 0,060	Al (max)	: 0,02
S (max)	: 0,02	Ti (max)	: 0,04

Sıvı metale potada magnezyum küreleştirici ilave edilir. Sistemde sıvı metale aşılama için besleyici vardır. Besleme hunisi, elektrik titreticili ayar aksesuarları içerir. Elektrikli kontrol ile toz miktarı belirlenir (Şekil 4.13). Küreselleştirmeden sonra genel sıvı metal kullanım verimi % 94 (DN 80 – 150) ve % 96 (DN 200 – 300)' dır.



Şekil 4.13. Sıvı alaşıma küreleştirici ilavesi ve sıvının dönen kalıba verilmesi

Katılaşımdan kısa süre sonra borunun kalıptan çıkartılması aşamasına geçilir (Şekil 4.14). Sapmalar ve hatalı dökümler ergitme bölümüne gönderilir (Şekil 4.15)



Şekil 4.14. Katılaştıran alaşıma kalıptan çıkartılmadan önce uygulanan işlemler



Şekil 4.15. Hurda kırık borular

4.2.4. Yatay sürekli tavlama fırını

Borulara uygulanan tavlamaya ferritleme de denir ve bu işlemle yüzey karbürleri ve az miktarda oluşan perlitler yok edilir. Kalıp içindeki kızıl renkteki boru, iç kısmından tutan özel kısıkaçlarla dışarı çekilir. Kızgın haldeki Kızgın haldeki boru, $\cong 500$ °C sıcaklıkta bekleyen tav fırınına gönderilir. Boru farklı sıcaklık ve zonlarda $\cong 40$ dk tavllanır. Bu yolla ani soğuma nedeniyle boru dış yüzeyinde meydana gelen sert, beyaz karbürü yapı giderilir. Yatay sürekli tavlama fırınında mikroyapı önce ostenite sonra ferrite dönüşür. Düktil demir boruların uygulandığı tavlama fırını Şekil 4.16'da görülmektedir.



a)



b)



c)



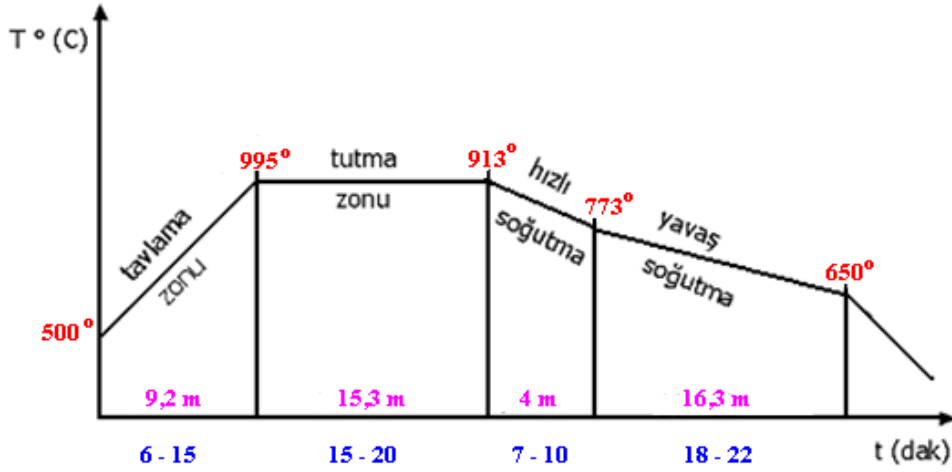
d)

Şekil 4.16. Tavlama fırını
 a) Genel görünüş,
 b) Ön görünüş,
 c) Boru girişi,
 d) Tavlama

Genel fırın operasyon şartları: 2 m' lik tampon, 9,2 m' lik tavlama, 15,3 m'lik tutma, 4 m'lik hızlı soğutma ve 16,3 m'lik yavaş soğutma ve 2 m' lik sonlanma bölgesi içerir (Şekil 4.17). Doğalgaz ($38 \text{ MJ}/\text{m}^3$, $1100 \text{ m}^3/\text{h}$, 5–8 KPa) ısıtması tercih edilir. Tavllanmış boru, $\sigma_b \geq 420 \text{ N}/\text{mm}^2$, $\delta \geq \%10$, HB<230 özelliklerini sağlar.

Havalı ön ısıtma	: 20 – 500 °C	Ön ara ısıtma	: 500 – 995 °C
Tepe ısıtma	: 995 °C	Sıcaklık düşürme	: 995 – 773 °C
Son ara ısıtma	: 773 – 650 °C	Son ısıtma	: 650 – 20 °C

Isıl işlemden ortalama kapasite 25000 kg/h olarak tercih edilir.

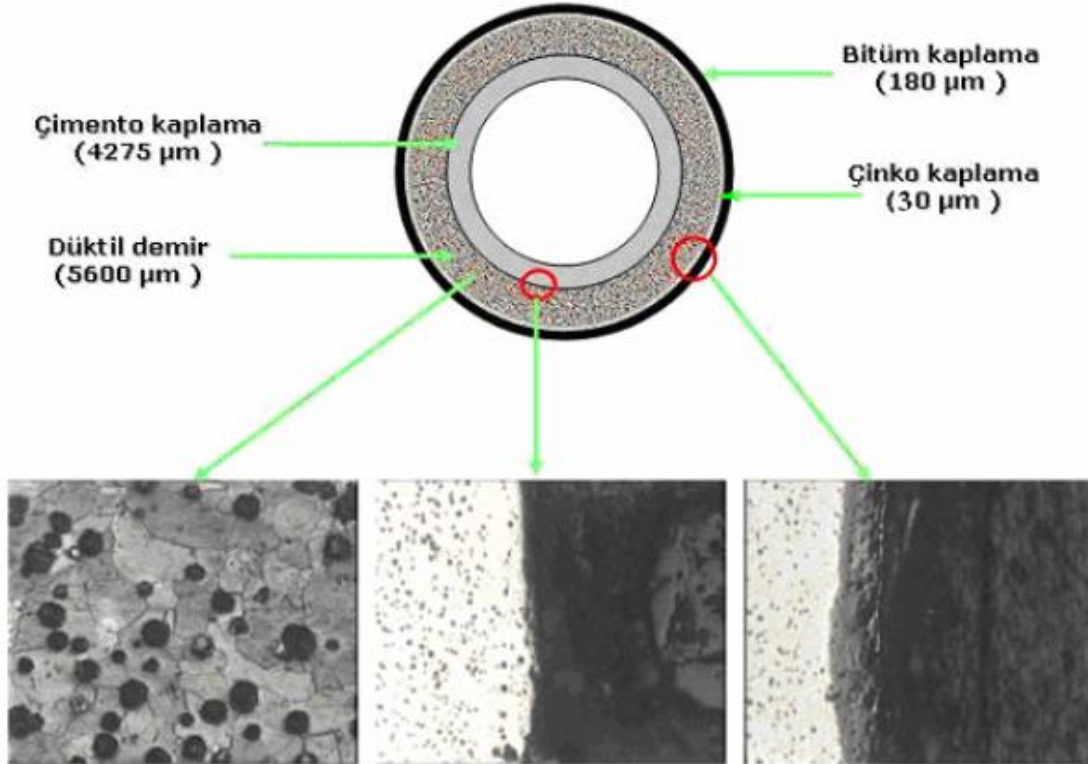


Şekil 4.17. Düktil demir borulara uygulanan tavlama grafiği (35 dk tavlama/63m)

Fırında boru şarj hızı	: 90 adet / h (DN 80 – 200 mm) 45 adet /h (DN 250 – 400 mm)
Isı verimliliği	: \geq %30
Standart emisyon	: $NO_x \leq 200mg / m^3$, emisyon oranları düşüştür.
Alev sıcaklığı	: 500 °C

4.2.5. Düktil demir borulara uygulanan kaplamalar

Düktil demir borulara uygulanan özel çimento iç kaplamanın koruyuculuğu kararlı oksit yapısından dolayıdır ve su bu borulardan geçerken tazeliğini korur. Çinko, çinko-alüminyum ve polimerik (PU, Epoksi ve PE gibi) dış kaplamalar boru korozyon direnci arttırarak boru ömrünü uzatmaktadır (Şekil 4.18).



Şekil 4.18. Düktül demir boru kaplama ve ana metal mikroyapısı

4.2.5.1. Çinko kaplama

Boru yüzeyinin korozyona direnci arttırmak için tel ark püskürtme yöntemi ile çinko veya çinko/alüminyum kaplama uygulanır. Genellikle iki çinko tel tükenen elektrot kullanılır. Ortalama tel çapı 3 mm olup, kaplama kalınlığı $>200 \text{ g/m}^2$ dir. Püskürtme hızı (max): 60 kg/saat olabilir ve tesislerde toz toplama ünitesi bulundurulur (Şekil 4.19).

Kaplama hızı	: DN 100	max 80 adet / saat
	DN 300	max 48 adet / saat
Kaplamada akım	: DC	20 – 40 V, 600 A' dir.
Çinko verimi	: %65 – 70	



Şekil 4.19. Boru yüzeyine çinko koruyucu kaplama uygulaması

4.2.5.2. Çimento kaplama (sıvama)

Düktül demir boru iç yüzey 3 – 5 mm kalınlığında çimento ile kaplanır (Şekil 4.20).



Şekil 4.20. Çimento kaplama işlemi

Boru dönerken iç kısmı kaplanır ve dehidrate edilir. Bu yolla (koruyucu çimento kaplama sayesinde) iç cidar korozyon direnci sağlanır. Kaplamadan sonra muf ve kuyruk kısmı giydirilir ve taşıma (yürütme) sistemi ile boru dışarı alınır.

Borular konveyör bandı ile rutubetli fırına sokularak, ısıtma ve bekletme ile çimento kütleme işlemi yapılır. Fırında maksimum 120 m³/s doğalgaz harcanır. Çimento kaplamalar belirlenen sıcaklık ve rutubette 3 – 6 saat bekletilir (Şekil 4.21).



Şekil 4.21. Çimento kürlenme ve kürlenmiş iç yüzey

Tercih edilen süre 180 dk olup 15000 kg/saat üretim hızıdır. Buhar sıcaklığı 200 °C ve fırın sıcaklık aralığı ise 55 – 85 °C dir.

4.2.5.3. Bitüm kaplama

Dış yüzeyi çinko kaplanmış boruya püskürtme tekniği ile siyah bitüm kaplanır. Anti korozif bitüm dış yüzeye tabanca ile püskürtülür. Bu bölümde bitüm püskürtme pompası, nozul, yağ tankı, güç ünitesi ve zincir taşıyıcılar başlıca öğelerdir. Boyanmış borular konveyör ile kurutma fırınına sokulur, bekletilir ve böylece hızlı kuruma sağlanır (Şekil 4.22).



Şekil 4.22. Boru dış yüzeyinin bitüm kaplanması ve sonlandırma

4.2.6. Son işlemler

Son işlemler, iç cidar temizleme, kesme, çemberel temizleme, muf temizleme ve dış cidarı taşlama proseslerini kapsar. Düzeltme ve ayarlamadan sonra düktil demir boru yürütme merdaneleri ile ilerletilir.

4.2.7. Hidrolik test

Hidrolik pres su doldurma düzeneği ile testte kullanılır. Bu test bütün borulara uygulanır. Test yuvasına boru yerleştirildikten sonra V şeklindeki destek merdaneleri ile dengelenir. Boru içleri yağlı silindir ile sızdırmaz hale getirilir. Düşük basınç su temini (0,1 MPa) ile borudan hava uzaklaştırılır ve su şarj edilir. Düşük basınçlı su ile dolmuş olduğundan sonra, hava deşarj borusu, düşük basınç sistemi kapatılır ve yüksek basınç su sistemi çalıştırılır. Test basıncı 3,2–5,0 MPa'dır.

Hedef basınç sağlandığında belirlenen süre beklenir. Zaman dolduğunda su boşaltılır ve boru yürütme sistemi ile dışarı alınır (Şekil 4.23). Hatalı borular ıskartaya ayrılır.



Şekil 4.23. Hidrolik test uygulaması

Bütün işlemleri bitmiş ve kontrolleri yapılmış düktil demir boru stoklanır veya direk müşteriye gönderilir.

4.3. Düktil Demir Boru Üretiminde Gelişmeler

Düktil demir boru üretiminde meydana gelen son gelişmeler iki ana bölümde toplanabilir;

- a. Yapısal özelliklerde gelişme ve De Lavaud savurma döküm tekniğinde gelişmeler,
- b. İç ve dış kaplamalarla korozyon direncinin arttırılması.

Bulduğu 1908 ve uygulanmaya başlandığı 1920 yılından bu yana De Lavaud prosesinde fazla gelişme kaydedilememiştir. Göze çarpan gelişmeler kalıp ve kalıp kaplamalarda olmuştur. Kullanım çeşitlenmesi, korozyon direnci ve koruma konularında gelişmeler gözlenmiştir.

4.4. Düktil Demir Boru Üretim Tesis Tasarımı

En uygun makine ve ekipman tasarımı ve seçimi çeşitli işlemlerin gerektirdiği zamana bağlıdır. Önemli temel unsurlar;

- a. Kalıp hazırlama zamanı; borunun kalıptan çıkarılması ve diğer dökümün gerçekleştirilmesi arasında geçen zaman,
- b. Döküm devri; kalıbın işlem hızına çıkarılmasından, dökme, katılaşma ve dönmeyi durdurmaya kadar geçen zaman,
- c. Çıkarma zamanı; kalıptan dökümün çıkarılmasında geçen zaman,
- d. Kalıbın temizlenmesi,
- e. Hazır kalıp sayısı,
- f. Metalin yeterliliği,
- g. Döküm istasyon veya makinelerinin sayısı.

4.5. Proses Değişkenleri ve Döküm Hataları

- a. Döküm sıcaklığı: Düşük sıcaklık tane küçülmesi ve eşeksenli kristallerin oluşumuna yol açar. Yüksek sıcaklık ise birçok alışımda kolonsal yapıyı teşvik eder.
- b. Döküm hızı: Çok yüksek döküm hızları türbülansa ve sıvı metalin saçılmasına yol açabilir.

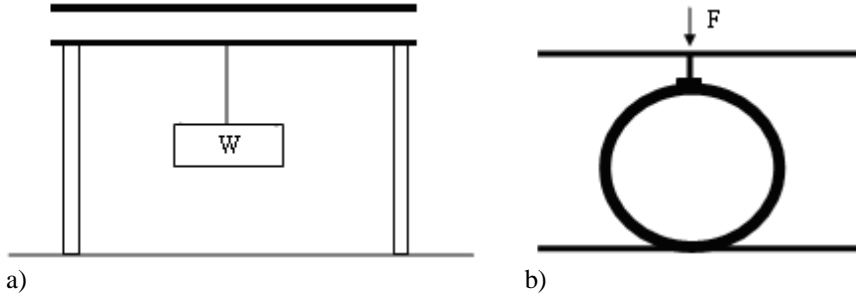
- c. Kalıp sıcaklığı: Metal kalıplar uzun kullanım ömrü gibi göze çarpan yararlar sağlar. Kalıp sıcaklığının genleşmeyi sağlayacağı unutulmamalıdır. Düşük sıcaklık katılaşmayı hızlandırır.
- d. Dönme hızı: Düşük dönme hızları kayma ve kötü bir döküm yüzeyine sebebiyet verebilir. Yüksek dönme hızları titreşimler oluşturabilir ve bu titreşimler segregasyon bantlarının meydana gelmesine sebep olur.
- e. Segregasyon: Katılaşma sırasında büyüyen kristallerin önünde düşük ergimeli sıvıdan oluşan bir zon vardır. Çekirdekleşme ve büyüme eğer titreşimle bozulursa bantlaşma meydana gelir ve bu bantlaşma segregasyon olarak da anılır.
- f. Çatlaklar: Eğer santrifüj kuvvet tarafından meydana getirilen çemberel gerilmeler malzemenin çekme mukavemetini aşarsa dökümde çatlaklar meydana gelir. Birçok metal katılaşmadan hemen sonra oldukça düşük çekme gerilmelerine sahiptir. Çatlakların oluşmasına etki olarak bu gösterilebilir.
- g. Yağma: Kalıp gerekenden çok düşük hızda dönerse ya da metal kalıba çok yüksek hızda veya çok yüksek sıcaklıkta beslenirse ergimiş metal yerçekiminin etkisinden kurtulacak yeterli dönme hızına (dolayısıyla volkanik püskürtülme gücüne) ulaşamaz ve böylece metal kalıbın üst kısmından alt kısmına düşer.
- h. Katlanma: Savurma döküm makinelerinde meydana gelen titreşim üretilen dökümlerde kat oluşumuna sebep olabilir.

4.6. Kalite Kontrol ve Fabrika Testleri

Rutin test ve kontrol dışında aşağıda açıklanan birkaç kalite kontrol adımları önemsenmelidir:

- a. Çimento kaplamada taşıma, depolama ve gömme sırasında oluşan çatlaklar su içinde şişme ve hidrotasyon ile doldurulur. Ayrıca beton ve düktil demirin termal genleşme katsayıları birbirlerine çok yakındır. Bu özellik, düktil demir ile çimentonun ısı değişimlerinde birlikte davranmalarına yol açar ve yapışmanın kalıcılığı sağlanır. Küçük çaplı borulara (DN 100) uygulanan boylamasına eğme testi çok az çökme ve ihmal edilebilir ovalleşme vermektedir. Bu sonuç, beton kaplama kalıcılığı ve performansı için gerekli ve önemlidir. Bu fabrika testi;

5,5m üstü aralıklı iki desteğe yerleştirilen küçük çaplı borunun merkezine 1300 kg ağırlık asmayı ve eğimi (sehimi) hesaplamayı kapsar. Büyük çaplı borular için ovalleşmeye karşı direnç ve çimento kaplama kararlılığı ring testi ile ölçülmektedir. Ovalleşmeye neden olan tepe yüküne karşı direnç düktil borularda oldukça yüksektir (Şekil 4.24).



Şekil 4.24. Test yöntemleri
a) Sehimi testi,
b) Ovalleşme testi

- b. Çimento kaplama dönen boruya santrifüj kuvvetle uygulandığından kaplama iç yüzeyi düşük poroziteli, oldukça düz ve ince taneli olur. Pürüzlülük katsayısı (COLEBROOK formülü) $k=0,03$ ile $0,1$ arasında değişir. Bu değerlerin düşük olması akışkanın hız kaybının az olması demektir. Gözle ve büyüteçle inceleme yanında zaman yüzey pürüzlülük cihazıyla ölçüm yapılır.
- c. Muf/Kuyruk boyut testinde (özellikle muf iç çapı ve kuyruk dış çapı) kalibre mastarlar, iç mikrometre ve dış mikrometre kullanılarak ölçüm yapılır. Muf bölgesine çinko boya uygulanır. Kalınlık minimum $100 \mu\text{m}$, ortalama $120 \mu\text{m}$ olmalıdır. Bitüm kaplama eş kalınlıkta minimum $100 \mu\text{m}$, ortalama $120 \mu\text{m}$ olmalıdır.
- d. Borunun boyutsal incelenmesinde dış çap, iç çap ve kalınlık çok önemlidir. Dış çaplar muhtelif bölgelerden çevre metre ile iç çaplar mikrometre ile kalınlıklar ise ultrasonik cihazla ölçülür.
- e. Basınç testi bütün borulara uygulanır. Birçok üretici DN 100–300 için 60 bar, DN 350–600 için 50 bar test basınç değerlerini garanti etmektedirler.

4.7. Özellikler

Düktül demir malzemeler için fiyat (malzeme % 60, üretim % 40), mekanik ve diğer özellik değerleri Tablo 4.2' de verilmiştir.

Tablo 4.2. Düktül demir için fiyat, mekanik özellikler ve diğer özellikler

Özellikler	Değer
Fiyat (\$/kg)	1 – 2
Yoğunluk (kg/m ³)	7050
Elastik Modül (MPa)	170000
% Uzama	>10
Servis Sıcaklığı (°C)	- 70 + 360
Çekme Mukavemeti (MPa)	420
Akma Mukavemeti (MPa)	300
Kırılma Tokluğu (MPa.m ^{1/2})	100
Termal İletkenlik (W/m.K)	30
Termal Genleşme (10 ⁻⁶ /K)	12,5
İçYapı	Küresel Grafit
Diğer Özellikler	
Geri dönüşüm potansiyeli	Yüksek
Yumuşak-Sert (0-10)	9
Sıcak-Soğuk (0-10)	9
Korozyon direnci	<
Düktilite	<
Tokluk	<
Aşınma Direnci	<
Yorulma Direnci	<

Tasarımcı, su iletim hatlarında kullanılan boru malzemelerini seçerken bir takım kriterleri göz önüne alır. Ekonomik özellikler, mekanik özellikler, mekanik olmayan özellikler, yüzey özellikleri, üretim özellikleri ve estetik özellikler karşılaştırmada kullanılan başlıca ölçütlerdir. Ekonomik özellikler fiyat ve elde edilebilirliği içerir. Bir malzeme için en önemli özelliklerin başında bunlar gelir. Malzeme özellik bakımından ne kadar zengin olursa olsun elde edilmesi zor veya maliyeti çok yüksekse kullanılması mühendislik açısından akılcı olmaz. Mekanik özellikler ise sertlik, mukavemet, yorulma ve sürenme direnci gibi birçok özelliği kapsar. Boru malzemelerinin maruz kalacağı etkilere karşı optimum özellikte olması istenir. Yüzey özellikleri ve estetik değerler de boru seçiminde önemlidir. Özet olarak, yüksek mukavemet değeri, yüksek aşınma dayanımı, korozyona dayanıklılık, uzun ömür, sızdırmazlık, gaz ve sıvı geçirgenliğine direnç, hijyen, sıcağa dayanıklılık, sürenmeye dayanıklılık, yanmazlık, iyi ses yalıtımı, deprem/trafik yüklerine direnç, bakım gerektirmeme (veya az bakım), şebekelerdeki basınç oynamalarını tolere etme gibi özellikler içme su dağıtım şebekelerinde kullanılan borularda aranır.

4.8. Düktil Demir Boruların Korozyona Direngelikleri

Korozyon, metal ve alaşımların çevreleriyle kimyasal ve elektro-kimyasal reaksiyonları sonucu bozunuma uğramalarını açıklamakta kullandığımız bir sözcüktür. Metallerin çoğu doğadaki ilk hallerine (bileşiklerine) dönüşme eğilimi içindedir ve bu dönüşüme, termodinamik olarak, bir enerji yitirilmesi denmektedir. Çözelti faza geçme de korozyonun önemli bir türevidir. Çevrenin veya ortamın etkisi, dönüşümün ana unsurudur. Düktil demirin korozyon davranışı ve korozyona direnci çok önemlidir. Yüzey işlemsiz düktil borular birçok toprak yapısından etkilenmemekte ve iyi bir performans sergilerken, etkili koruma (veya kaplama) uygulaması, düktil boru ömrünü kayda değer oranda arttırmaktadır.

Korozyon, her yıl kamu ve özel kuruluşların büyük zararlara uğramasına sebep olan en önemli sorunlardan biridir. Günümüzde, az bulunan suyun, şebekelerde görülen kaçak ve kaybı çok önemlidir. Bundan dolayı belediyeler, mühendisler ve su şirketleri su dağıtım şebekelerinde korozyon ve hasara odaklanmaktadır. İster düktil demir, ister gri döküm boru olsun, yeraltı şebekelerinin korozyon ve hasara direngeliği ana unsurdur. Malzeme seçimi, korozyonu en aza indirmek ve malzemenin uygulamada optimum servis ömründe kullanılabilmesi için önem arz etmektedir.

Yeraltı şartlarında düktil ve gri dökümün relatif üstünlükleri veya zaafı halen tartışma konusudur. Bu bölüm yeraltı düktil demir boruların korozyonu ve korunmasını kapsamaktadır. Düktil demirde korozyon mekanizması ve dış kaplamaların sağladığı üstünlükler tartışılmaktadır.

Alaşımsız demirli malzemelerin mukayesesini veren ve genel kabulü yansıtan bilgiler Tablo 4.3' de verilmiştir. Bu tablodan görüldüğü gibi, korozyon direnci açısından düktil ve gri döküm borular benzer olup, çeliklere (% 0,3 C) göre 4 kez daha güvenlidir.

Tablo 4.3. Düktil demir, gri dökme demir ve çelik dökümün (% 0,3 C) karakteristik özelliklerinin mukayeseli listesi

Özellik	Gri Dökme Demir	Düktil Demir	Çelik Döküm
Dökülebilme	1	1	4
İşlenebilme	1	2	3
Güvenirlilik	5	1	2
Titreşim Söndürme	1	2	4
Yüzey Sertleşebilme	1	1	3
Elastik Modül	3	1	1
Darbe Direnci	5	2	1
Aşınma Direnci	3	2	5
Korozyon Direnci	1	1	4
Mukavemet/Ağırlık Oranı	5	1	3
Üretim Maliyeti	1	2	4

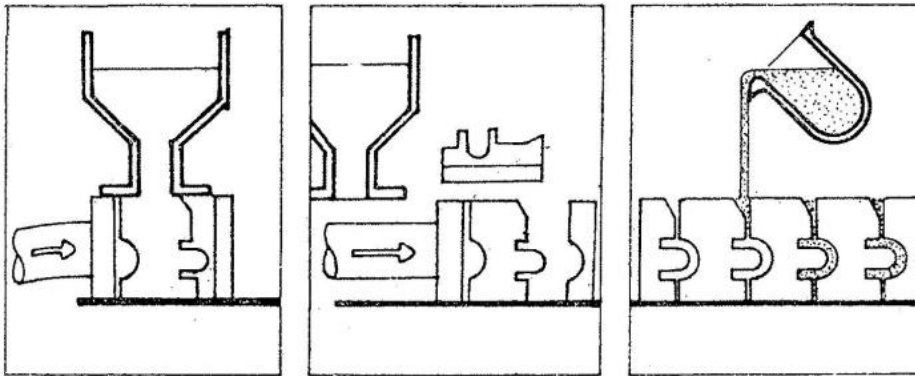
1: En İyi, 5: En Kötü

Düktil demir, yüksek karbonlu döküm malzemesi olup, bileşim aralığı büyük ölçüde gri demirle örtüşmektedir. Her iki dökme demir de benzer miktarlarda karbon içerir. İşlenebilmeyi kolaylaştıran ve korozyonu azaltan karbon, gri dökümde bağlantılı fleyk (levhasal) grafit şeklinde iken, düktil demirde dağılmış kürecikler (küresel grafit) halindedir. Fleyk oluşumun, mukavemet ve sünekliği azaltıcı etkisi, doğaldır ki küresel grafitlerden oluşan düktil demirde görülmez. Bundan dolayı, düktil demir gri dökümün düşük döküm maliyet avantajı ile çelik benzeri mukavemet üstünlüğünü bir arada taşır. Her iki malzemedeki grafit kristalleri yüzeyde koruyucu pasif tabaka oluşturarak korozyonu önlerler. Bazı araştırmacılar, düktil demir çukurlaşma (pitting) korozyon direncinin gri dökümden iyi olduğunu belirtmişlerdir. Bunlara göre gri dökümdeki bağlantılı fleyk grafit/metal arayüzeyi korozyonun hızla ilerlemesi ve derinleşmesini sağlamaktadır. Bu problem, küresel grafitli yapıda görülmez. Diğer yandan, düktil demirin aksine gri dökümdeki yoğun fleyk grafit yaprakçıklar yüzeyde toplanır ve korozyonun ilerlemesini önleyen daha etkili bir bariyer oluşturur. Demirli borularda korozyon davranışı; malzeme, çevre şartları ve korozyon ürününün etkisinin fonksiyonudur.

4.9. Düktil Demir Boru Bağlantı Parçalarının Dökümü

Bağlantı parçaları dereceli olarak tek tek kalıplanarak dökülebilir. Derecesiz otomatik kalıplama maliyet ve kalite açısından daha çok tercih edilir. Burada derece maliyeti, boş derece depolama ve derece konveyörleri büyük oranda azalmakta ve ortadan kalkmaktadır. Bu durum, ayrıca derece sayısı ile sıvı metal miktarı arasındaki ilişkinin ortadan kalkması ile daha büyük önem kazanmaktadır. Otomatik kalıplamada bütün işlemler (alt ve üst kalıp yanlarının teşkili, maça yerleştirme, derece kapama) bir ünite içinde yapılır. Derecesiz kalıplama yöntemleri derecelilere nazaran daha avantajlıdır, fakat ilk yatırım masrafının daha fazla olacağı da açıktır.



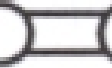









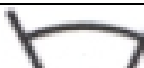



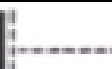
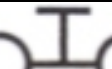




Otomatik kalıplamanın en çok uygulananı DISAMATİK Yüksek Basıncılı Derecesiz Kalıplamalardır. Kum kapalı devre sisteminde pnömatrik ve hidrolik desteklerle kalıplanır, sıkıştırılır ve modellerle peş peşe döküm boşluğu oluşturulur. Maçalar otomatik olarak veya elle yerleştirilir. Bu şekilde saatte 300 kalıp üretebilmektedir. Sistemde kullanılacak kum 60 – 80 AFS inceliğinde olup %2,5 – 3,0 nem ve yeterince bağlayıcı ihtiva etmelidir. Şekil 4.25 otomatik kalıp hazırlama, modeller ve döküm şeklini şematik olarak vermektedir [1].



Şekil 4.25. Disamatik sistemde kalıp hazırlama, modeller ve döküm şekli [1]

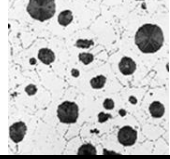
Bağlantı parçalarının diğer üretim yöntemleri (kaplamalar), mekanik özellikleri ve boyutsal değerleri ISO 2531, EN 545 ve diğer standartlarda ayrıntılı olarak bulunmaktadır. Tablo 4.4' de bağlantı parçalarının özet şekilleri ve sembolleri görülmektedir.

Tablo 4.4. Düktil demir boru bağlantı parçaları ve sembolleri

Ad	Sembol	Ad	Sembol
Flanşlı Soketler/Flanged Sockets	 EU	Flanşlı Spigotlar/Flanged Spigots	 F
Rakorlar/Collars	 U	Çift Soketli, 90° (1/4) Dirsekler/ Double Socket 90° (1/4) Bends	 MMQ - 90°
Çift Soketli, 45° (1/8)Dirsekler/ Double Socket 45° (1/8) Bends	 MMK - 45°	Çift Soketli, 22° 30' (1/16) Dirsekler/ Double Socket 22° 30' (1/16) Bends	 MMK - 22°
Çift Soketli, 11° 15' (1/32) Dirsekler/ Double Socket 11° 15' (1/32) Bends	 MMK - 11°	Tek Soketli, 90° Dirsekler/ Single Socket, 90° Bends	 MQ - 90°
Tek Soketli, 45° Dirsekler/ Single Socket 45° Bends	 MK - 45°	Tek Soketli, 22 1/2° Dirsekler/ Single Socket 22 1/2° Bends	 MK - 22 1/2°
Tek Soketli, 11 1/4° Dirsekler/ Single Socket 11 1/4° Bends	 MK - 11 1/4°	Çift Flanşlı, 90° (1/4) Dirsekler/ Double Flanged 90° (1/4)Bends	 Q - 90°
Çift Flanşlı, 45° (1/8) Dirsekler/ Double Flanged 45° (1/8) Bends	 FFK - 45°	Çift Flanşlı, 22° 30' (1/16) Dirsekler/ Double Flanged 22° 30' (1/16) Bends	 FFK - 22°
Çift Flanşlı, 11° 30' (1/32) Dirsekler/ Double Flanged 11° 30' (1/32) Bends	 FFK - 11°	Çift Flanşlı Ördek Ayağı, 90° (1/4) Dirsekler/ Double Flanged Duckfoot 90° (1/4) Bends	 N - 90°
Kör Flanşlar PN 16/ Blank Flanges PN 16	 X	Flanşlı Branşmanlı, Çift Soketli T' ler/ Double Socket Tees With Flanged Branch	 MMA
Tümü Soketli T' ler All Socket Tees	 MMB	Tümü Flanşlı T' ler/All Flanged Tees	 T
Çift Soketli Redüksiyonlar/ Double Socket Tapers	 MMR	Çift Flanşlı Redüksiyonlar/ Double Flanged Tapers	 FFR

Düktil demir boru ve bağlantı parçalarının üretim sonrası genel özellikleri ulusal ve uluslar arası standartlar kullanılarak Tablo 4.5' de özetlenmiştir.

Tablo 4.5. Düktil demir boru ve bağlantı parçalarının standartlara uygun genel özellikleri

Deney ve Yöntemler	Sonuçlar	Standartlar	
Çekme mukavemeti, min	420 MPa	EN 545, ISO 2531, EN 10002, ISO 6892, ASTM E8-04, GB/T 228, JIS Z 2241	
Akma mukavemeti, min	300 MPa		
Uzama, min	Borular, DN 40 -1000; %10, DN 1100 – 2000; %7 Bağlantı parçaları, DN 40-2000 için %5		
Brinell Sertlik, max	Borular, 230 HB Bağlantı parçaları, 250 HB	EN 545, ISO 2531, EN ISO 6506, ASTM E10, GB/T 231.1	
Çentik darbe direnci, min	9,45 J	AWWA C151, ASTM E23, EN 10045, ISO 148, GB/T 229, JIS Z2242	
Hidrostatik test, K9	Borular, DN 40-300 için 50 bar, DN 350-600 için 40 bar, DN 700-1000 için 32 bar, DN 1000-2000 için 25 bar	EN 545, ISO 2531	
	Bağlantı parçaları, DN 40-300 için 25 bar, DN 350-600 için 16 bar, DN 700-1000 için 10 bar, DN 1000-2000 için 10 bar		
Bitüm dış kaplama, min	Borular; 70 µm kalınlık	EN 545, ISO 2531, ISO 8180, DIN 30674-4	
Çinko dış kaplama, min	Borular; 200 g/m ²	EN 545, ISO 2531, ISO 8179, DIN 30674-3	
Çimento iç kaplama, min	Borular, DN 40-300 için 4 mm, DN 350-600 için 5 mm, DN 700-1200 için 6 mm, DN 1400-2000 için 9 mm	EN 545, ISO 2531, ISO 4179, DIN 30674-2	
Grafit sayısı ve küresellik	En az 300 adet/mm ² , En fazla 800 adet/mm ² Küresellik, min %90 olmalı	EN ISO 945, DIN 1639-1	
Mikroyapı	Yapı ferritik olmalı, kırılğan sementit, perlit ve ledebürüt ötektiği bulunmamalıdır		
Kimyasal bileşim	C %3,3-3,7, Si %2,1-2,6, Mg %0,028-0,065, Mn max %0,4, P max %0,05, S max %0,016, Cr max %0,09, Al max %0,012		
Et kalınlığı	Borular için; e=K(0,5+0,001DN), K=9 Bağlantı parçalarında standarttaki tablo değerleri kullanılmalıdır.	EN 545, ISO 2531	
Toleranslar	Borular; e≤6 için -1,3 mm, e>6 için -(1,3+0,001DN) mm Bağlantı parçaları; e≤7,0 için -2,3mm, e>7,0 için -(,3+0,001DN) mm		

BÖLÜM 5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

5.1. Giriş

Bu çalışmada savurma döküm yöntemi ile üretilen düktil demir borular (GGG 40) ve kuma (dolu kalıba) döküm yöntemi ile üretilen düktil demirden imal boru bağlantı parçalarının (GGG 40 ve GGG50) metalografik ve mekanik özellikleri standartlar kapsamında araştırılmıştır. Et kalınlığı ve küre sayısına bağlı olarak numunelerde mikroyapı çalışmaları ve mekanik deneyler (sertlik, çekme, % uzama, darbe) yapılarak sonuçlar literatür ile karşılaştırılmıştır. Buradan elde edilen bulgular ışığında çeşitli oluşumların neden ve nasıl gerçekleştiği araştırılmış, bu konu üzerinde yapılmış çalışmalar ve sonuçlar ışığında yorumlar yapılmaya çalışılmıştır.

5.2. Metalografi

Düktil demir boru ve bağlantı parçası numuneleri sırasıyla kesme, zımparalama, parlatma ve mikroyapı inceleme (dağlamasız/dağlamalı) işlemlerine tabi tutulmuştur. Numuneler kesit kısımlarından inceleneceği için bu yönde bir metalografik hazırlama yapılmıştır.

5.2.1. Numune kesme

Düktil demir borularda, numune borunun spigot (mufsuz) ucundan kesilir. Bu numune boru eksenine paralel veya dik olabilir ancak tartışmalı durumlarda eksene paralel numuneler kesilmelidir. Metalografik ve mekanik incelemeler için boru ve bağlantı parçalarından çeşitli ölçülerde numuneler kesilmiştir (Şekil 5.1).



Şekil 5.1. Düktil demir boru ve bağlantı parçası numunelerinin kesilmesi ve kesilmiş örnekler

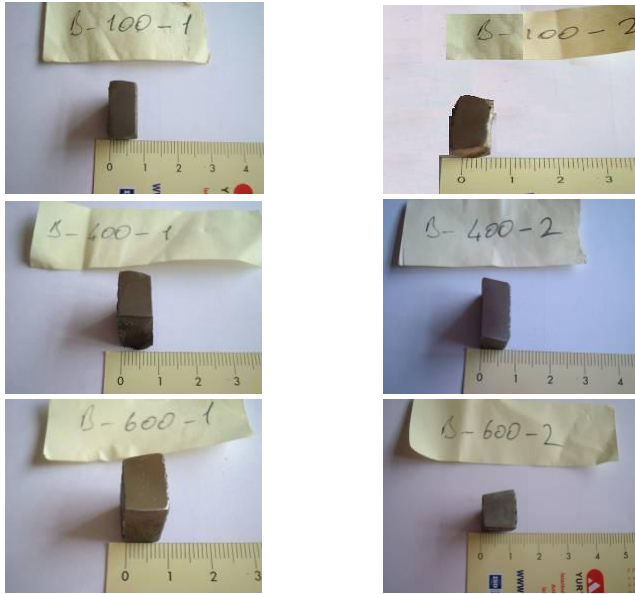
5.2.2. Zımparalama ve parlatma

Kesilen numuneler 240–320–400–600–800 ve 1000 meşh sırasını takip eden SiC zımpara kağıdı ile Buehler, Speed Grinder-Polisher zımparalama parlatma cihazında sulu olarak zımparalanmıştır (Şekil 5.2.). Numuneler her bir zımparalama diskinde sadece önceki zımparalardan oluşan çizikleri gidermek için gerekli olan zaman kadar işleme tabi tutulmuştur.

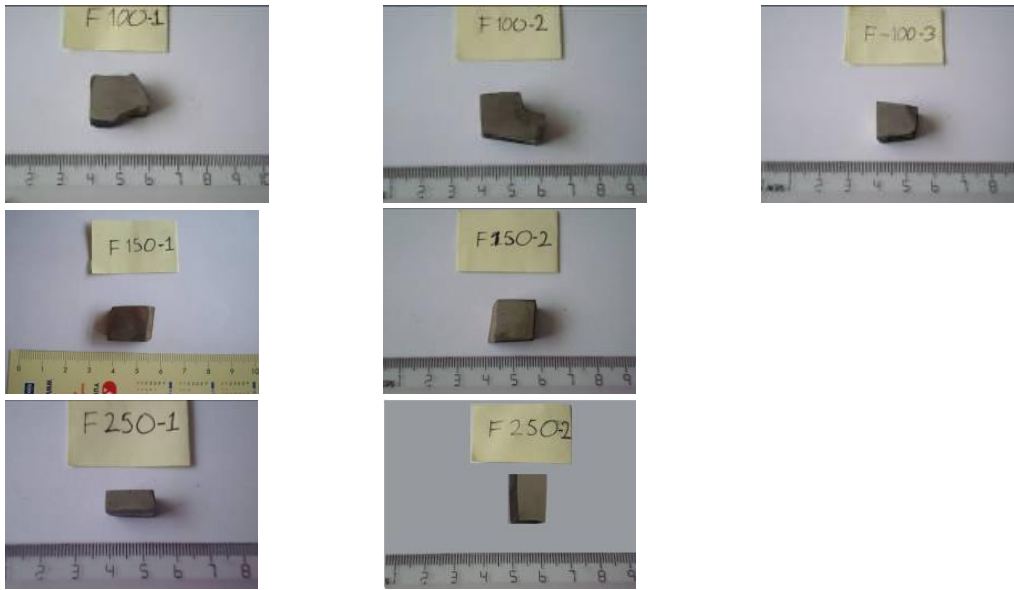


Şekil 5.2. Buehler, Speed Grinder-Polisher marka zımparalama parlatma cihazı

Numuneler daha sonra sırasıyla 6 μ m, 3 μ m ve 1 μ m' lik elmas pasta yardımıyla çuha üzerinde en ufak çizgi kalmayacak şekilde ve grafit taneleri de iyice açılıncaya kadar parlatılmıştır. Şekil 5.3 – 5.4' te parlatılan boru ve bağlantı parçaları kod numaraları ve parlatma yüzeyleri ile verilmiştir.



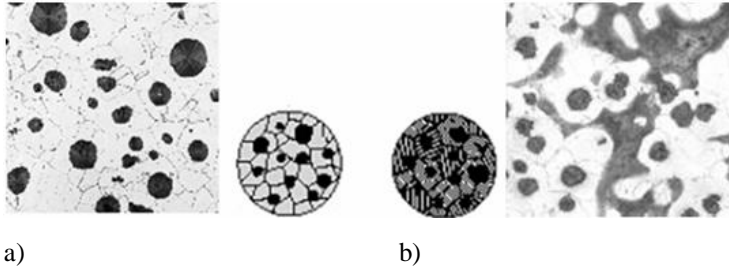
Şekil 5.3. Mikroyapı incelemesi için hazırlanan boru numuneleri



Şekil 5.4. Mikroyapı incelemesi için hazırlanan boru bağlantı parçası numuneleri

5.2.3. Mikroyapı inceleme

Düktül demir boru ve bağlantı parçalarının imalatında kullanılacak malzeme küresel grafitli yapıya sahip olmalıdır. İmalatta kullanılacak olan malzeme Mg ile küreleştirilecektir. Üretim yöntemi, grafitin %90'ının nodüler formda çökmesini sağlamalıdır. Kalan grafit en az çatal görünümlü olmalıdır. Mikroyapı küresel grafit yanında ferritik olmalı, kırılğan sementit fazı, perlit (bağlantı parçalarında bir miktar kalabilir) ve ledebürit ötektiği içermemelidir (Şekil 5.5).



Şekil 5.5. Düktil demir boru ve bağlantı parçası mikroyapısı
 a) Ferritik mikroyapı (istenen/olması gereken yapı),
 b) Perlitik mikroyapı (grafitlerin dışındaki perlit olan koyu alanlar borularda istenmez)

Grafit küre şeklinin özelliğini veren tanım “küreselleşme” (nodularite)’ dir. Bu tanım mevcut grafit sayısının % kaçının kabul edilebilir sınır içinde olduğunu tanımlar. Kabul edilebilir grafit şekli Şekil 5.6’ da gösterilmiştir.

Grafitin Kesiti					
Grafit yüzeyi, x100	90,8	79,5	57,5	34,6	12,7
Grafit Şekil Faktörü	0,91	0,80	0,58	0,35	0,13

Şekil 5.6. Grafit şekil faktörü [1]

Düktil demirlerin kalitesinin belirlenmesinde alınan en önemli ölçü grafit küre sayısıdır. Bu değer, dokuda sementit oluşum temayülünü ve çekme hatalarına yatkınlığını verir. Grafit küre sayısı ile katılma hızı arasında yakın bir ilişki mevcuttur.

Grafit tane sayısının asgari sınırı 100 adet/mm^2 olarak kabul edilebilir. Tane sayısının tespitinde, hazırlanmış, dağlanmamış numunelerin 100 defa büyütülerek mikroskopik fotoğrafları çekilir ve grafit tane sayısı sıralama resimleri ile karşılaştırma yapılır. Bu işlemin belli zaman aralıkları ile tekrarlanması lazımdır. Özellikle grafit tane sayısının tekrar tespit edilmesi, bize yönetsel bir değişikliğin söz konusu olduğu durumlarda, parça metalurjik özellikleri hakkında seri ve kolay bir biçimde bilgiler verecektir [1].

Bu çalışmada, mikroyapı incelemesini yapabilmek için düktil demir boru ve bağlantı parçası numuneleri dağlamasız ve dağlamalı olarak Şekil 5.7’ de gösterilen Nikon Eclipse L150/150A optik mikroskopta incelenmiştir. Dağlama işlemi, %2’ lik Nital (%2 Nitrik asit + %98 saf alkol) ile 10–12 sn süre içinde yapılmıştır. Su ile durulanan numunelerde leke oluşumunu engellemek için de kurutma işlemi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.7. Nikon Eclipse L150/150A modeli optik mikroskop

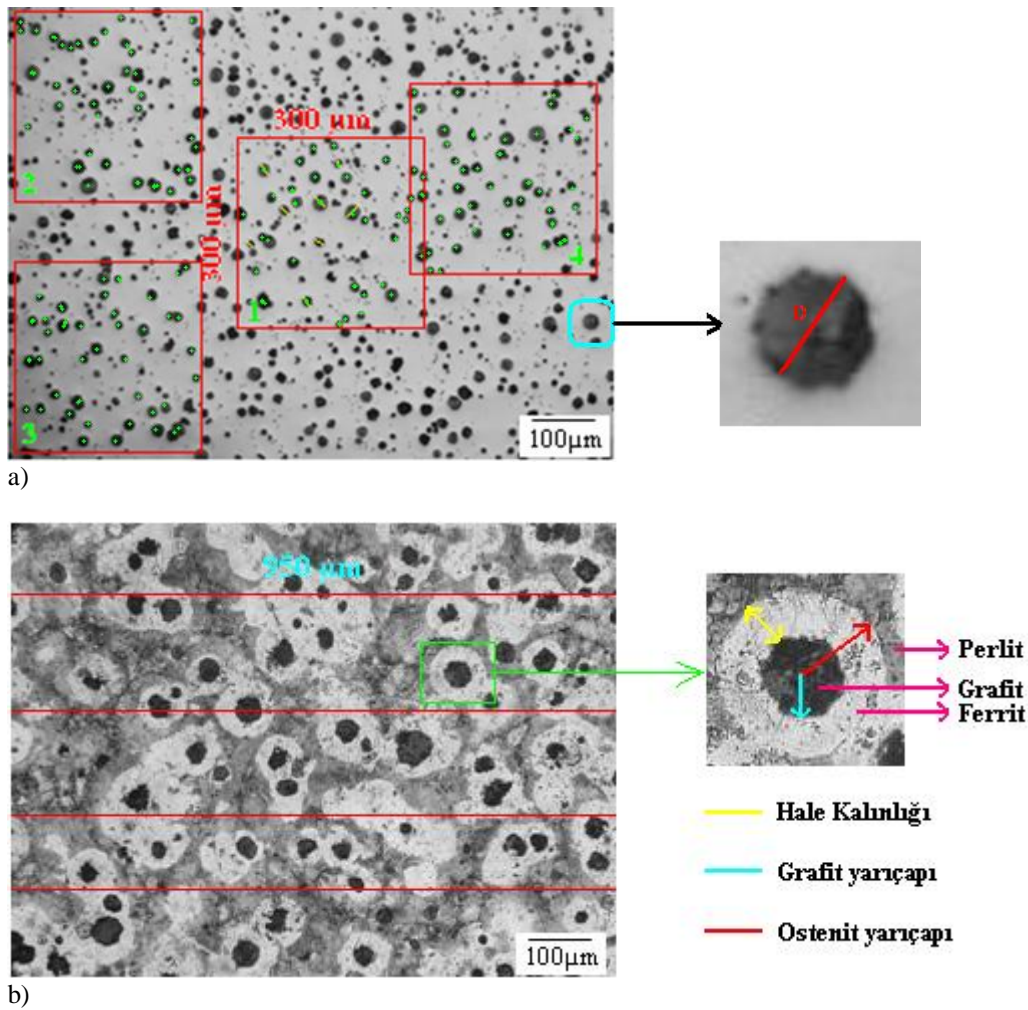
Mevcut inceleme çalışmasında mikroyapı karakterizasyonunu için kullanılan yöntemler Şekil 5.8’ de gösterilmiştir. 100 büyütmede çekilen mikroyapı resmi (Şekil 5.8.a) üzerine bir kenarı 300 μm olan 4 adet kare çizilmiştir. Her karenin içine düşen küreler (nodül-grafit) işaretlenerek sayılmıştır (birinci karede 37 grafit, ikinci karede 40 grafit, üçüncü karede 43 grafit ve dördüncü karede 39 grafit mevcuttur). Bu dört karede bulunan kürelerin ortalaması alındığında $0,09 \text{ mm}^2$ ’ de 40 adet küre olduğu tespit edilmiştir. Bu sayıyı 1 mm^2 ’ ye dönüştürdüğümüzde gerçek değer olan 440 adet/mm^2 sonucunu elde ederiz. Bu çalışma dağlamasız yapıdaki tüm düktil demir boru ve bağlantı parçaları için tekrarlanarak tez sonuçları saptanmıştır.

Grafit çapı (D), en az 10 adet grafit ölçümünün ortalaması alınarak bulunmuştur ($29,2 \mu\text{m}$). Nodularite (küresellik) yüzdesini bulabilmek için, mikroyapı resimlerinde görülen küreler Şekil 5.6 ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir (%90,8).

Düktil demir boru ve bağlantı parçalarında faz yüzdelerini bulabilmek için dağlamalı mikroyapı resimleri üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Şekil 5.8. b’ de görüldüğü üzere faz yüzdelerini (ferrit, perlit, grafit vb.) saptayabilmek için çizgi metodu

kullanılmıştır. Bir adet çizgi üzerine düşen faz uzunlukları teker teker ölçülerek yüzde değerleri bulunmuştur. Dört çizgi için bulunan bu değerlerin ortalamaları alınarak gerçek değerlere ulaşılmıştır (ferrit %49, perlit %44, grafit %7, diğer 0).

γ hale kalınlığı ve ostenit yarıçapının grafit yarıçapına (r^{γ}/r^g) oranı dağlamalı resimlerden ölçülebilir. Ölçüm sistemi Şekil 5.8. b' de gösterilmiştir. Bu ölçümler en az 10 adet yapı için tekrarlanır ve bulunan sonuçların ortalaması alınarak gerçek değerler saptanır (γ hale kalınlığı = 14 μm , $r^{\gamma}/r^g = 1,93$).



Şekil 5.8. Mikroyapı karakterizasyonu

a) Dağlanmamış boru numunesi ve ölçümler

b) Dağlanmış bağlantı parçası numunesi ve ölçümler

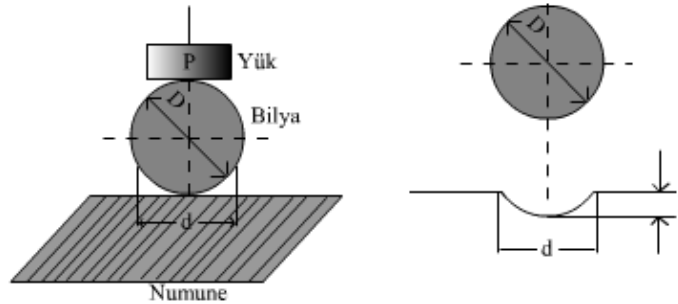
Çekilen mikroyapı fotoğrafları üzerinde tespit edilen çalışmalar aşağıda verilmiştir.

- Nodül (küre) sayısı, (adet/mm²)
- Nodularite (küresellik), (%)
- Ortalama grafit çapı, (μm)
- Ferrit, perlit ve grafit oranı, (%)
- γ-hale kalınlığı, (μm)
- r^{γ}/r^{β} (ostenit yarıçapının grafit yarıçapına oranı)

5.3. Mekanik Test ve Deneyler

5.3.1. Sertlik testi

Brinell sertlik değerleri düktil demir borular için 230 HB' yi, bağlantı parçaları için 250 HB' yi geçmemelidir. Bu sonuçları araştırmak için numunelere, malzeme kalınlığı, cinsi ve uygulanan yüke göre seçilen çeşitli çaplardaki bilyelerle iz oluşturularak, özel olarak hazırlanmış Brinell skalaları yardımı ile sertlik değerleri tespit edilir. Numunelerin sertliklerinin ölçümünde Şekil 5.7' de gösterilen Wolpert marka sertlik ölçme cihazı kullanılmıştır. 2,5 mm bilye çapı (D), 187,5 kg deney kuvveti (P) kullanılarak 30 sn süre sonunda ölçüm alınmıştır. Boru için 0,9975 mm iz çapı (d), bağlantı parçası için 0,9575 mm iz çapı (d) örnek verilebilir.



Şekil 5.9. Wolpert marka sertlik ölçme cihazı ve şematik gösterim

Numunelerin sertliklerini doğru olarak ölçmek için test parçalarının iki yüzü birbirlerine paralel olacak şekilde taşlanmıştır. Böylece herhangi bir yanılığa düşme olasılığı engellenmiştir. Her numunenin en az 3 farklı noktasından alınan sertlik değerlerinin ortalaması ile sonuçlar hesaplanmıştır.

5.3.2. Çekme testi

Düktül demir boru ve bağlantı parçaları, Tablo 5.1’ de verilen çekme mukavemeti ve uzama değerlerine sahip olmalıdır.

Tablo 5.1. Boru ve bağlantı parçaları için çekme ve uzama özellikleri [36]

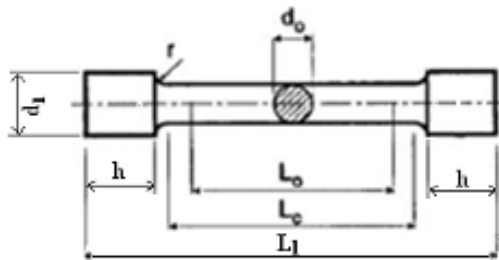
Döküm Tipi	En küçük çekme mukavemeti, R_m MPa	En küçük % uzama, (A)	
	DN 40 – DN 2000	DN 40 – DN 1000	DN 1100 – DN 2000
Düktül demir borular	420	10	7
Bağlantı parçaları	420	5	5

Her numune, Tablo 5.2’ de verilen kalınlık ve çap için hesaplanan boyutlara sahip olup ana alaşımı temsil edecek şekilde hazırlanmıştır.

Tablo 5.2. Çekme deneyi için numune kalınlığı ve çapı [36]

Dökümün Tipi	Deney numunesinin anma çapı, d_o , (mm)	Çaptaki sınır sapma, (mm)	Şekil toleransı, (mm)
Santrifüj döküm boruların et kalınlığı(mm); - 6’dan az - 6 – 8 arası (8 hariç) - 8 – 12 arası (12 hariç) - 12 ve üzeri	2,5 3,5 5,0 6,0	$\pm 0,06$	0,03
Bağlantı parçaları - Birleşik dökülmüş numuneler	5,0	$\pm 0,06$	0,03
- Ayrı dökülmüş numuneler • 12 mm’ den ince döküm kalınlığı için numune kalınlığı 12,5 mm • 12 mm ve üzeri kalınlıktaki dökümler için numune kalınlığı 25 mm	6,0 12,0 veya 14,0	$\pm 0,06$ $\pm 0,09$	0,03 0,04

Düktül demir boru ve bağlantı parçaları için çekme test numuneleri hazırlanırken boyutlar anma çapına (d_o) bağlı olarak bulunur (Şekil 5.8).



Şekil 5.10. Çekme test numunesinin şekli

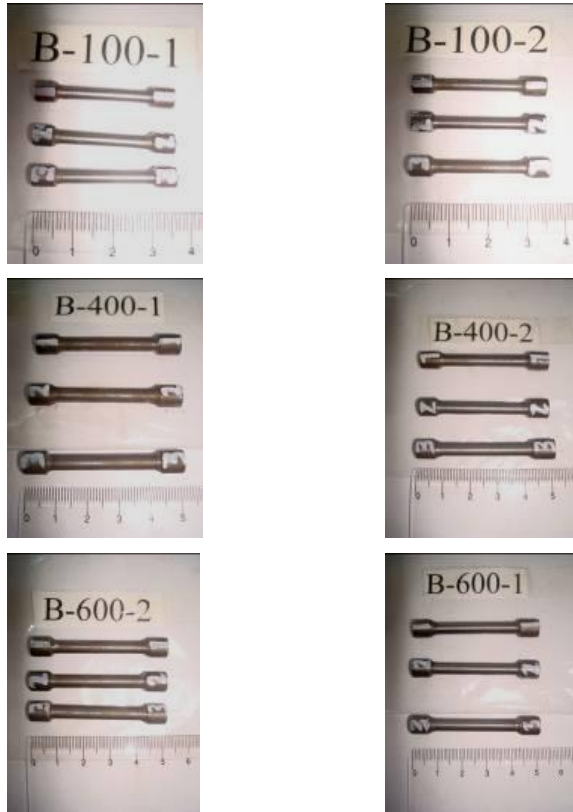
Boyut hesabı için aşağıdaki formüller kullanılmıştır ve bulunan değerler Tablo 5.3’ de verilmiştir.

$$L_0 = 5d_0 \quad L_C = L_0 + d_0 \quad r = 1,5 d_0 \quad (5.1)$$

Tablo 5.3. Çekme test numuneleri için ölçüler

Boru ölçüleri		Çekme numunesi ölçüleri						
Boru çapı (mm)	Et kalınlığı (mm)	d ₀ (mm)	d ₁ (mm)	L ₀ (mm)	L _c (mm)	L ₁ (mm)	h (mm)	r (mm)
100	6,0	3,5	5,5	17,5	22,5	36	5,5	5,25
400	8,1	5,0	8	25	30	50	7	7,5
600	9,9	5,0	8	25	30	50	7	7,5

Numuneler, anma çapının en az beş katına eşit ölçü uzunluğuna sahiptir. Standartlara göre hazırlanmış düktil demir boru çekme test numuneleri Şekil 5.9’ da gösterilmiştir. Bağlantı parçaları için numuneler Tablo 5.2’ de ki özel ve genel kurallara göre hazırlanmıştır.



Şekil 5.11. Düktil demir boru numunelerinin çekme testi öncesi resimleri

Hazırlanan numunelerin mukavemet (çekme, %uzama) değerlerini bulabilmek için Şekil 5.12’ de görülen Instron 3367 marka çekme test cihazı kullanılmıştır.

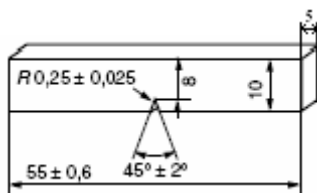


Şekil 5.12. Instron 3367 marka çekme test cihazı

5.3.3. Çentik darbe testi

Darbe testi, ortasına bir çentik açılmış ve her iki ucundan desteklenmiş bir deney parçasının, bir sarkaç darbesi ile kırılmasından ibarettir. Absorplanan enerji Joule (veya kg.m) cinsinden belirlenir. Absorplanan bu enerji, malzemenin darbeye dayanımının ölçüsüdür. Kullanıcı şartnamelerinde düktil demir boru ve bağlantı parçaları için darbe dayanım enerjisi minimum 9,45 J istenmektedir.

Düktil demir borular için darbe dayanım enerjisi, oda sıcaklığında ($23\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$) Charpy V çentik test parçalarına yapılan çentik darbe testi ile belirlenmiştir. Standart deney parçasının uzunluğu 55 mm, dikdörtgen şeklindeki kesitin bir kenar uzunluğu 5 mm (10 mm olması gerekirken ince kesit çalışıldığı için 5 mm alınmış ve test değeri 2 ile çarpılarak bulunmuştur), diğer kenarı ise 10 mm’ dir. Uzunluğun orta bölgesinde, derinliği 2 mm, çentik taban kavisinin yarıçapı 0,25 mm olan, 45° ’lik bir V çentiği bulunur (Şekil 5.13).



Şekil 5.13. Darbe numunelerinin üstten, yandan ve şematik görünümü

Standartlara göre hazırlanmış düktil demir boru darbe test numuneleri Şekil 5.14' de gösterilmiştir.



Şekil 5.14. Düktil demir boru numunelerinin darbe testi öncesi resimleri

Numunelerin oda sıcaklığında darbe dayanım enerjisini ölçmek için Anadolu Döküm Fabrikasındaki (Körfez/Kocaeli), Pendelschlagwerk marka darbe test cihazı kullanılmıştır (Şekil 5.15).

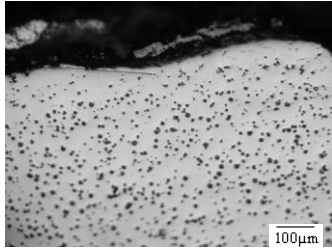


Şekil 5.15. Pendelschlagwerk marka darbe test cihazı

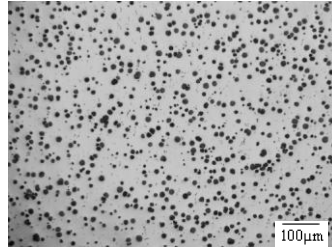
BÖLÜM 6. DENEYSEL SONUÇLAR VE İRDELEME

6.1. Düktil Demir Boru Numuneleri için Mikroyapı Çalışmaları

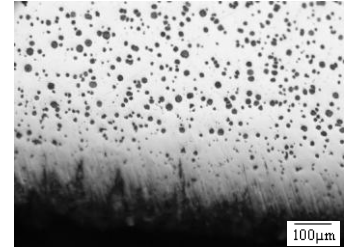
B.100.1 ve B.100.2 nolu düktil demir boru numunelerinin dağlamasız mikroyapı resimleri Şekil 6.1' de verilmiştir.



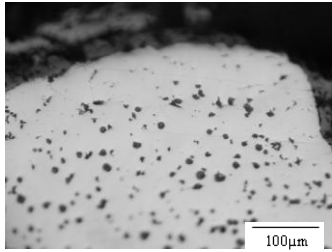
a) Dış bölge



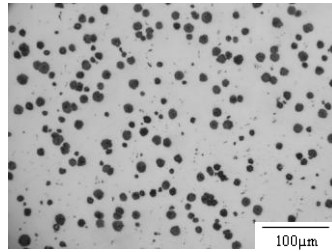
b) Orta bölge



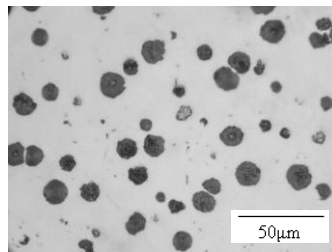
c) İç bölge



d) Dış bölge



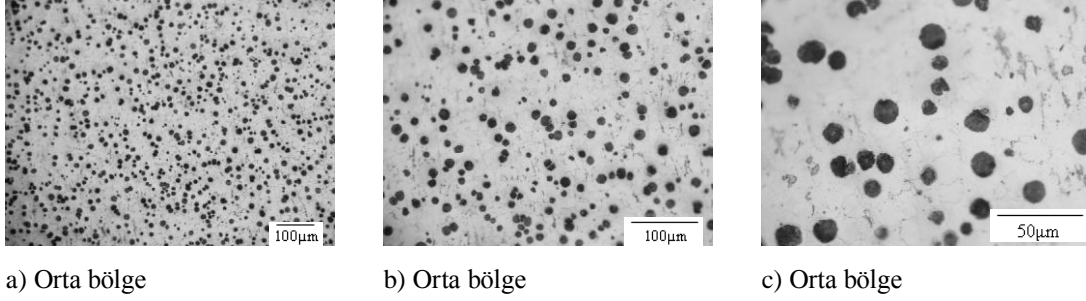
e) Orta bölge



f) Orta bölge

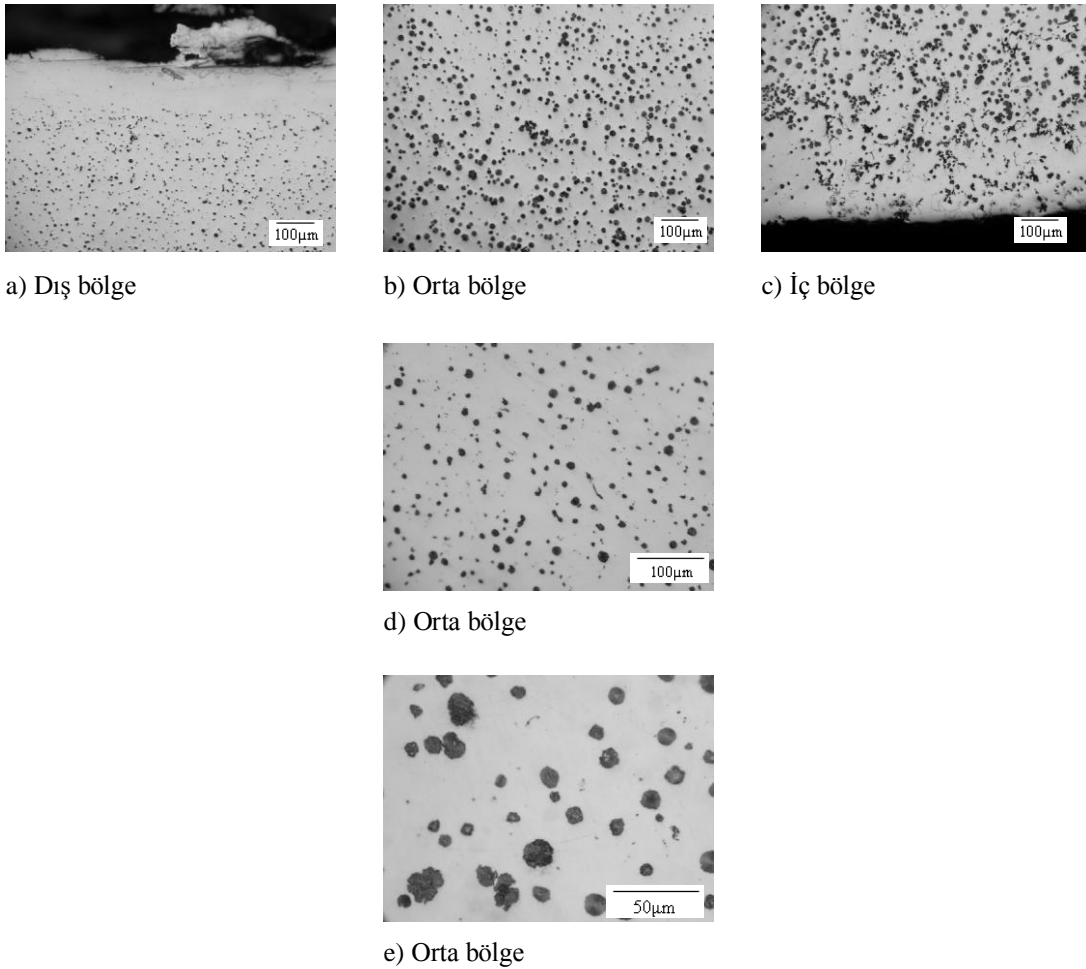
Şekil 6.1. B.100.1 ve B.100.2 nolu düktil demir boru numunelerinin dağlamasız mikroyapı resimleri

B.100.1 ve B.100.2 nolu düktil demir boru numunelerinin dağlamalı mikroyapı resimleri Şekil 6.2' de verilmiştir.



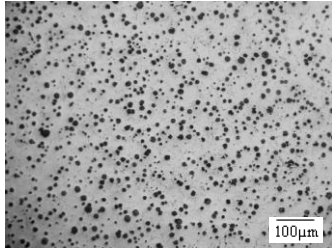
Şekil 6.2. B.100.1 ve B.100.2 nolu düktil demir boru numunelerinin %2 Nital ile dağlanmış mikroyapı resimleri

B.400.1 ve B.400.2 nolu düktil demir boru numunelerinin dağlamasız mikroyapı resimleri Şekil 6.3' de verilmiştir.

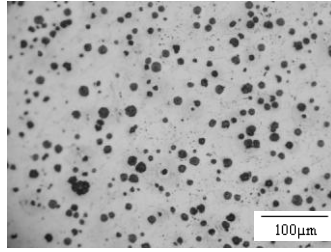


Şekil 6.3. B.400.1 ve B.400.2 nolu düktil demir boru numunelerinin dağlamasız mikroyapı resimleri

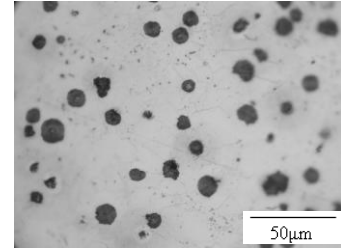
B.400.1 ve B.400.2 nolu düktil demir boru numunelerinin dağlamalı mikroyapı resimleri Şekil 6.4' de verilmiştir.



a) Orta bölge



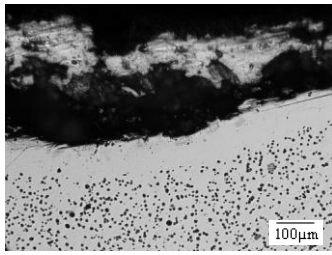
b) Orta bölge



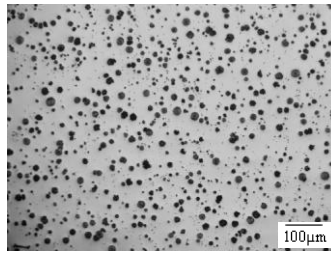
c) Orta bölge

Şekil 6.4. B.400.1 ve B.400.2 nolu düktil demir boru numunelerinin %2 Nital ile dağlanmış mikroyapı resimleri

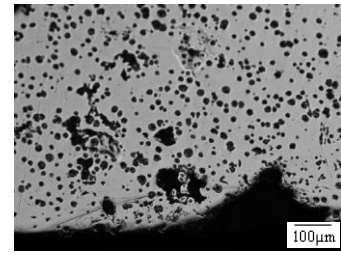
B.600.1 ve B.600.2 nolu düktil demir boru numunelerinin dağlamasız mikroyapı resimleri Şekil 6.5' de verilmiştir.



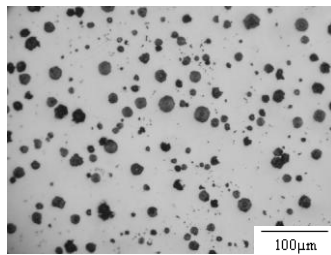
a) Dış bölge



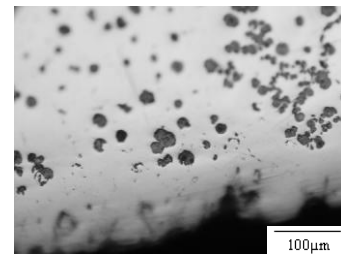
b) Orta bölge



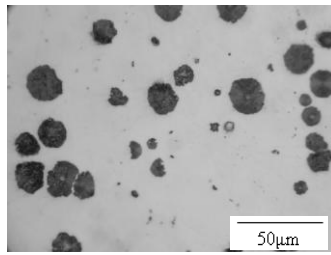
c) İç bölge



d) Orta bölge



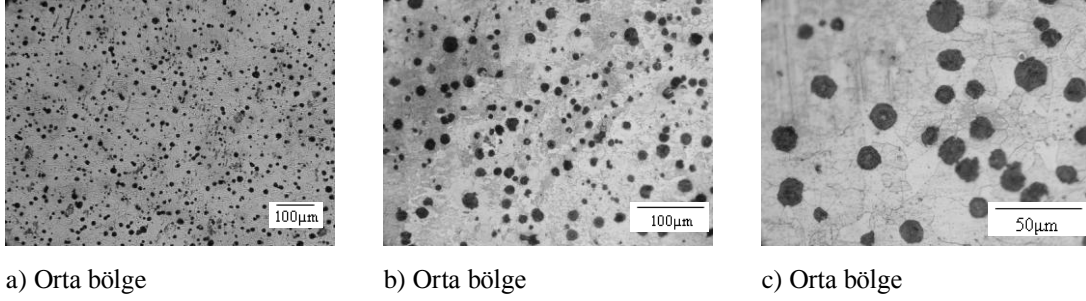
e) İç bölge



f) Orta bölge

Şekil 6.5. B.600.1 ve B.600.2 nolu düktil demir boru numunelerinin dağlamasız mikroyapı resimleri

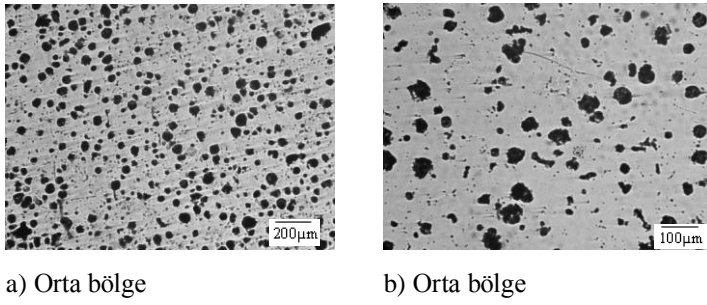
B.600.1 ve B.600.2 nolu düktil demir boru numunelerinin dağlamalı mikroyapı resimleri Şekil 6.6' da verilmiştir.



Şekil 6.6. B.600.1 ve B.600.2 nolu düktil demir boru numunelerinin %2 Nital ile dağlanmış mikroyapı resimleri

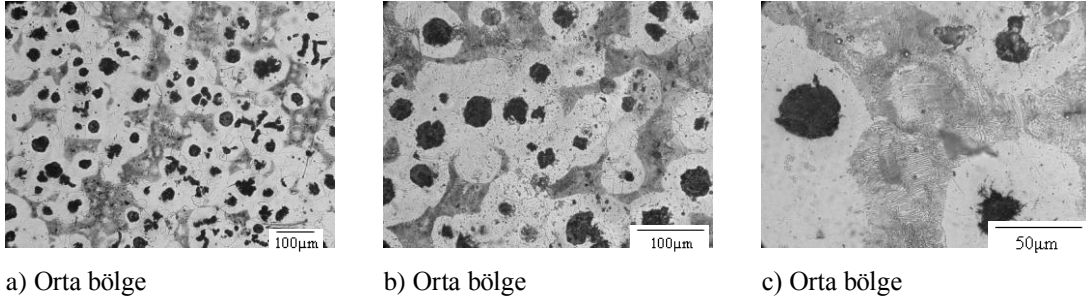
6.2. Düktil Demir Boru Bağlantı Parçası Numuneleri için Mikroyapı Çalışmaları

F.100.1, F.100.2 ve F.100.3 nolu düktil demir boru bağlantı parçası numunelerinin dağlamasız mikroyapı resimleri Şekil 6.7' de verilmiştir.



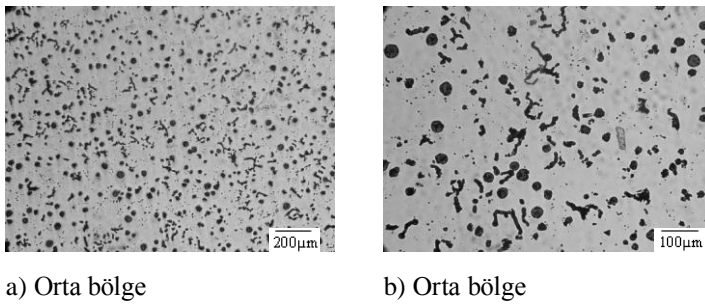
Şekil 6.7. F.100.1, F.100.2 ve F.100.3 nolu düktil demir boru bağlantı parçası numunelerinin dağlamasız mikroyapı resimleri

F.100.1, F.100.2 ve F.100.3 nolu düktil demir boru bağlantı parçası numunelerinin dağlamalı mikroyapı resimleri Şekil 6.8' de verilmiştir.



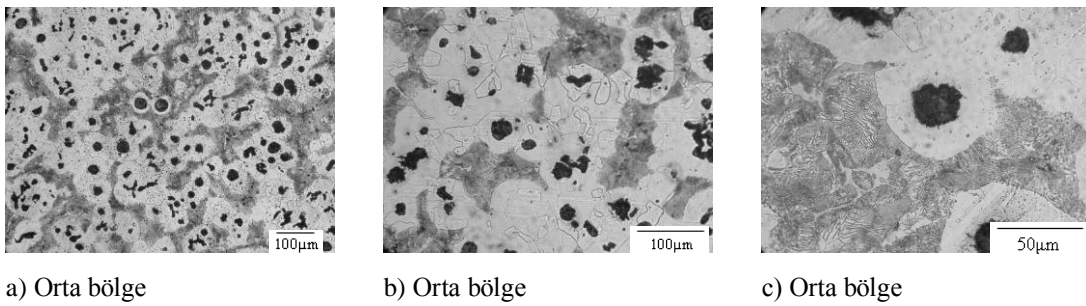
Şekil 6.8. F.100.1, F.100.2 ve F.100.3 nolu düktil demir boru bağlantı parçası numunelerinin %2 Nital ile dağlanmış mikroyapı resimleri

F.150.1 ve F.150.2 nolu düktil demir boru bağlantı parçası numunelerinin dağlamasız mikroyapı resimleri Şekil 6.9’ da verilmiştir.



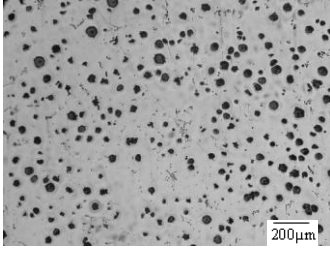
Şekil 6.9. F.150.1 ve F.150.2 nolu düktil demir boru bağlantı parçası numunelerinin dağlamasız mikroyapı resimleri

F.150.1 ve F.150.2 nolu düktil demir boru bağlantı parçası numunelerinin dağlamalı mikroyapı resimleri Şekil 6.10’ da verilmiştir.

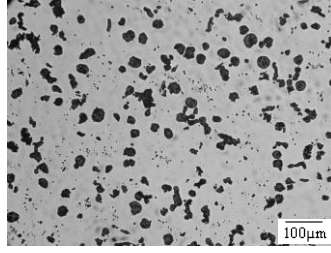


Şekil 6.10. F.150.1 ve F.150.2 nolu düktil demir boru bağlantı parçası numunelerinin %2 Nital ile dağlanmış mikroyapı resimleri

F.250.1 ve F.250.2 nolu düktil demir boru bağlantı parçası numunelerinin dağlamasız mikroyapı resimleri Şekil 6.11’ de verilmiştir.



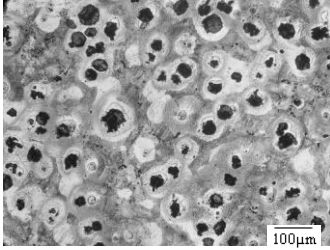
a) Orta bölge



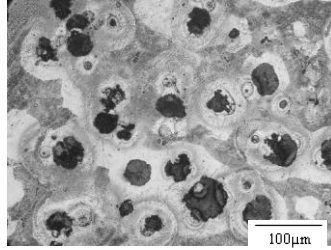
b) Orta bölge

Şekil 6.11. F.250.1 ve F.250.2 nolu düktil demir boru bağlantı parçası numunelerinin dağlamasız mikroyapı resimleri

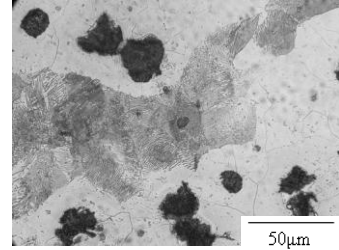
F.250.1 ve F.250.2 nolu düktil demir boru bağlantı parçası numunelerinin dağlamalı mikroyapı resimleri Şekil 6.12' de verilmiştir.



a) Orta bölge



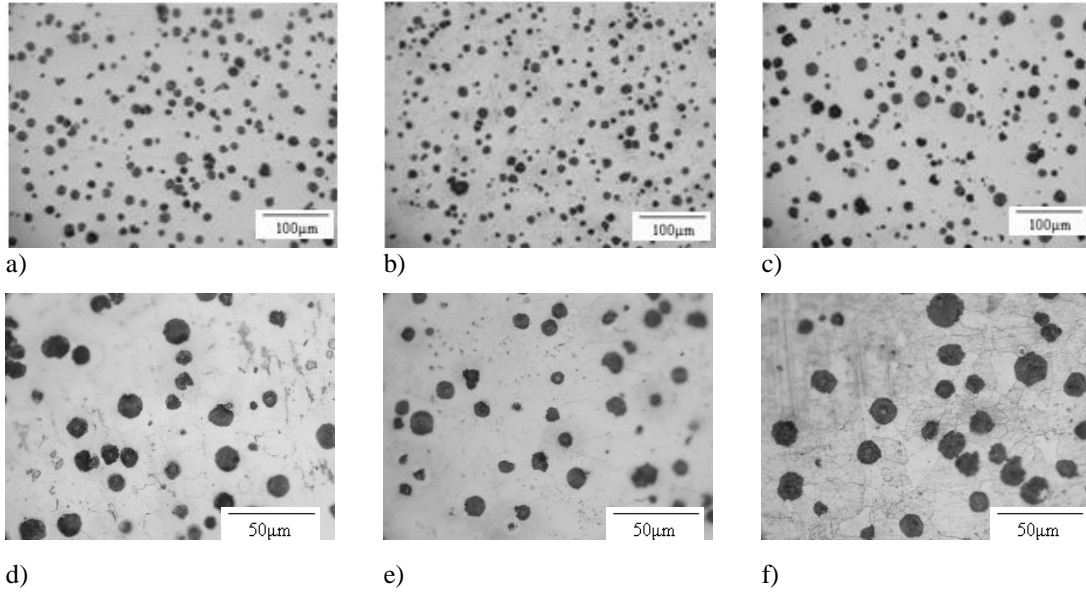
b) Orta bölge



c) Orta bölge

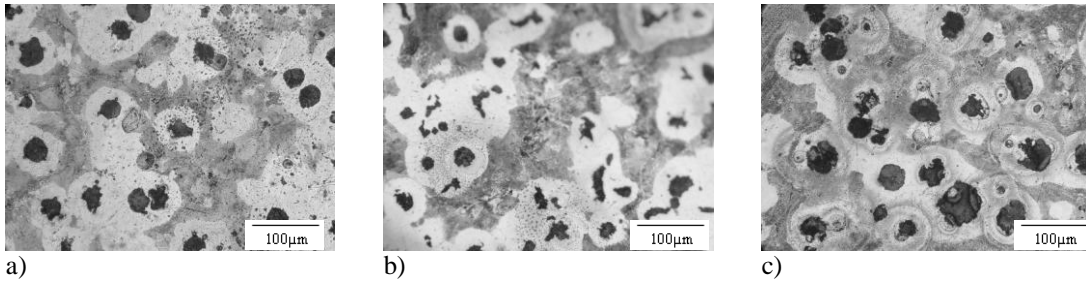
Şekil 6.12. F.250.1 ve F.250.2 nolu düktil demir boru bağlantı parçası numunelerinin %2 Nital ile dağlanmış mikroyapı resimleri

Düktil demir boru ve bağlantı parçası numuneleri için mikroyapı resimleri aynı büyütmelemlerde karşılaştırmalı olarak Şekil 6.13 ve Şekil 6.14' te verilmiştir.



Şekil 6.13. Düktil demir boru numuneleri için aynı büyütmde karşılaştırmalı mikroyapılar

- a) e=6 mm (B.100.1-B.100.2) - dağlamasız
- b) e=8,1 mm (B.400.1-B.400.2) - dağlamasız
- c) e=9,9 mm (B.600.1-B.600.2) - dağlamasız
- d) e=6 mm (B.100.1-B.100.2) - dağlanmış
- e) e=8,1 mm (B.400.1-B.400.2) - dağlanmış
- f) e=9,9 mm (B.600.1-B.600.2) - dağlanmış



Şekil 6.14. Düktil demir boru bağlantı parçası numuneleri için aynı büyütmde karşılaştırmalı mikroyapılar

- a) e = 7,2 mm (F.100.1-F.100.2-F.100-3) - dağlanmış
- b) e = 7,8 mm (F.150.1-F.150.2) - dağlanmış
- c) e = 9 mm (F.250.1-F.250.2) - dağlanmış

6.3. Düktil Demir Boru ve Bağlantı Parçası Numunelerinin Mikroyapı Karakterizasyonları

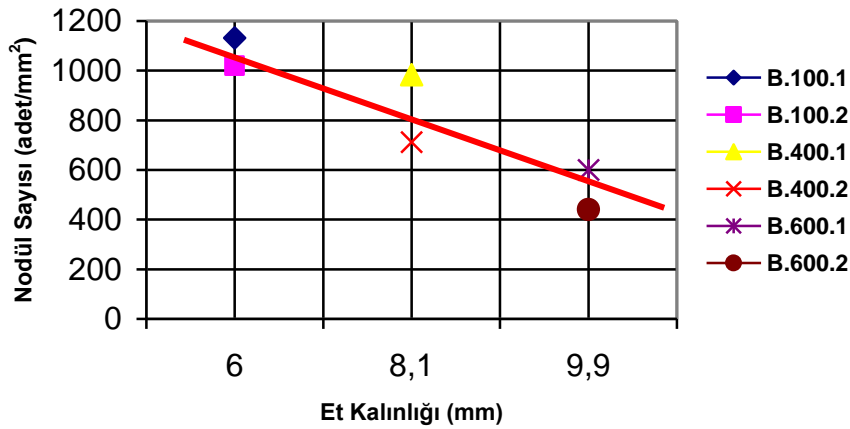
Düktil demir boru ve bağlantı parçası numunelerinin mikroyapı karakterizasyonları için grafitler (küreler) ve faz yüzdeleri detaylı olarak incelenmiş ve sayısal değerlere çevrilerek et kalınlığına bağlı olarak savurma ve kuma döküm yöntemleri için mukayeseler yapılmıştır. Mikroyapı resimleri incelendikten sonra nodül (küre) sayısı,

nodularite (küresellik), ortalama grafit çapı, ferrit oranı, perlit oranı, grafit oranı, γ -hale kalınlığı ve ostenit hale yarıçapının grafit yarıçapına (r^{γ}/r^{δ}) oranı değerleri bulunmuş ve Tablo 6.1’ de verilmiştir.

Tablo 6.1. Düktil demir boru ve bağlantı parçası numunelerinin faz yüzdeleri ve grafit özellikleri (B.Boru, F.Fitting-bağlantı parçası)

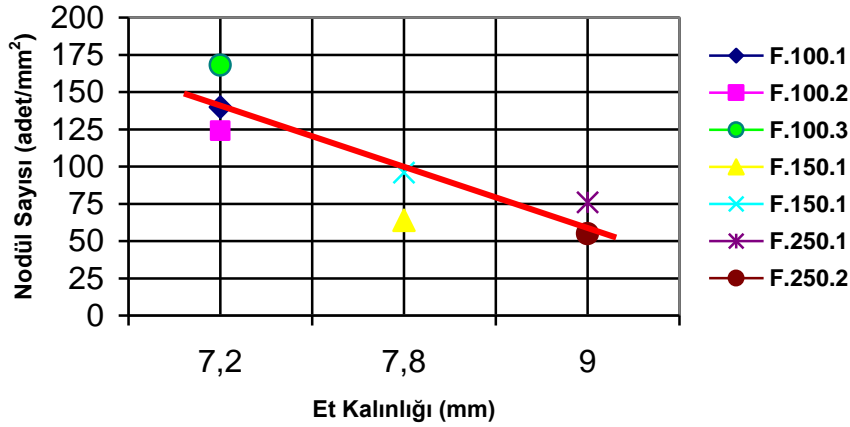
Numune Kodu	Et Kalınlığı (mm)	Nodül (Küre) Sayısı (adet/mm ²)	Nodularite (Küresellik) (%)	Ortalama Grafit Çapı, D, (μ m)	Ferit Oranı (%)	Perlit Oranı (%)	Grafit Oranı (%)	γ (hale) kalınlığı (μ m)	r^{γ}/r^{δ}
B.100.1	6,0	1132	90,8	13	88	0	12	0	0
B.100.2	6,0	1020	90,8	15,2	89	0	11	0	0
B.400.1	8,1	984	90,8	17,4	91	0	9	0	0
B.400.2	8,1	712	90,8	21,7	89	0	11	0	0
B.600.1	9,9	600	90,8	23,9	91	0	9	0	0
B.600.2	9,9	440	90,8	26,1	90	0	10	0	0
F.100.1	7,2	140	79,5	24,7	69	19	12	19	2,27
F.100.2	7,2	138	90,8	29,4	49	44	7	14	1,93
F.100.3	7,2	130	90,8	27,2	81	6	13	0	1,6
F.150.1	7,8	64	57,5	25,5	67	26	7	21	2,05
F.150.2	7,8	96	79,5	31,3	69	18	13	15	2,03
F.250.1	9,0	76	90,8	47,2	65	26	11	29	2,10
F.250.2	9,0	55	34,6	25,1	75	16	8	23,5	2,30

Şekil 6.15’ de düktil demir boru numuneleri için et kalınlığı – nodül sayısı ilişkisi grafiksel olarak verilmiştir. Düktil demir borularda et kalınlığı arttıkça nodül sayısının düştüğü gözlenmiştir. İnce kesitlerde küre sayısının mm², de 1000’ leri geçebileceği görülmektedir. Özellikle savurma dökümde azalan katılma süresi nedeniyle grafitler büyüyememekte ve ince kalmaktadır. Dinamik çekirdeklenme ise ani grafit kristalleşmesini doğurmaktadır. Buna grafit patlaması denmektedir [37].



Şekil 6.15. Düktil demir boru numuneleri için et kalınlığı - nodül sayısı ilişkisi

Şekil 6.16' da düktil demir boru bağlantı parçası numuneleri için et kalınlığı – nodül sayısı ilişkisi grafiksel olarak verilmiştir. Düktil demir bağlantı parçalarında et kalınlığı arttıkça nodül sayısı düşmektedir.



Şekil 6.16. Düktil demir boru bağlantı parçası numuneleri için et kalınlığı - nodül sayısı ilişkisi

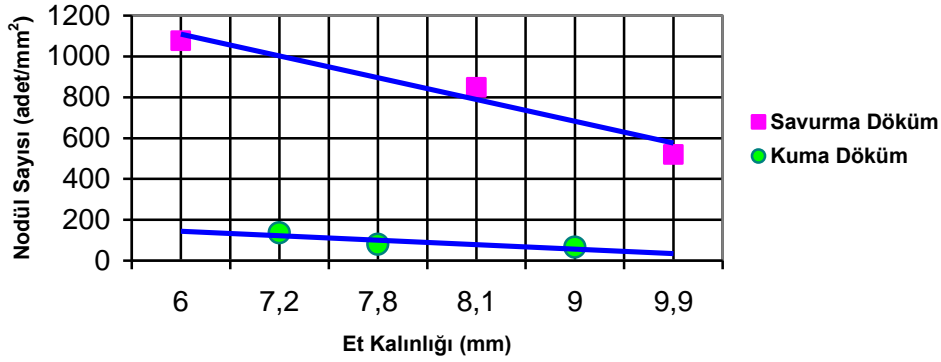
Düktil demir boru ve bağlantı parçalarını üretim yöntemine göre (savurma ve kum döküm) karşılaştırabilmek için Tablo 6.1' de verilen sonuçların aynı çap ve et kalınlıklarında ki ortalamaları alınarak sadeleştirme yapılmıştır (Tablo 6.2). Daha sonra bu değerlere göre grafikler çizilerek yorumları yapılmıştır.

Tablo 6.2. Düktil demir boru ve bağlantı parçası numunelerinin ortalama sonuç değerleri

Numune Kodu	Et Kalınlığı (mm)	Nodül (Küre) Sayısı (adet/mm ²)	Ortalama Grafit Çapı, D, (µm)	Ferit Oran (%)	Perlit Oran (%)	Grafit Oran (%)	γ (hale) kalınlığı (µm)	r ² /r ^s
B.100.1	6,0	1076	14,10	88,50	0	11,50	0	0
B.100.2	6,0							
B.400.1	8,1	848	19,55	90,00	0	10,00	0	0
B.400.2	8,1							
B.600.1	9,9	520	25,00	90,50	0	9,50	0	0
B.600.2	9,9							
F.100.1	7,2	136	27,10	66,30	23,00	10,60	16,50	1,93
F.100.2	7,2							
F.100.3	7,2							
F.150.1	7,8	80	28,40	68,00	22,00	10,00	18,00	2,04
F.150.2	7,8							
F.250.1	9,0	65,5	36,15	70,00	21,00	9,50	26,25	2,20
F.250.2	9,0							

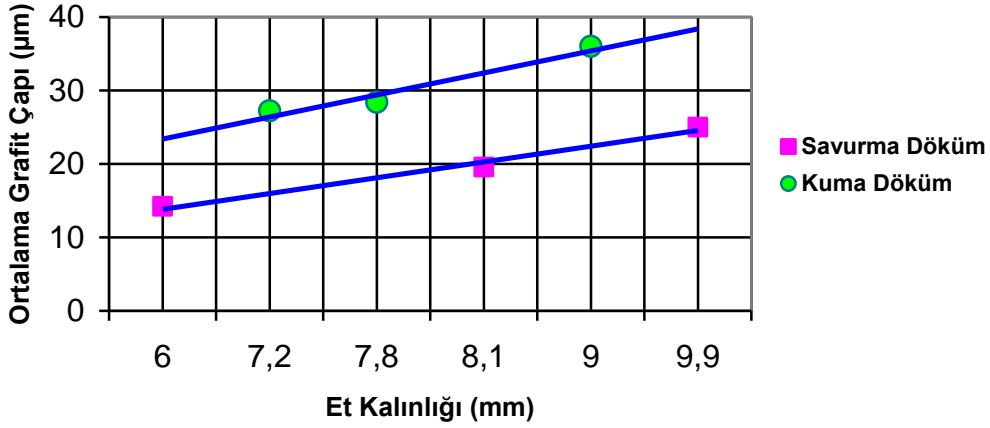
Şekil 6.17' de savurma döküm (düktil demir boru) ve kuma döküm (düktil demir boru bağlantı parçası) numuneleri için et kalınlığı – nodül sayısı ilişkisi grafiksel

olarak verilmiştir. İki döküm yönteminde de et kalınlığı arttıkça nodül sayısının düştüğü gözlenmiştir. Ancak savurma döküm ve kuma döküm yöntemi ile üretilen numuneler karşılaştırıldığında iki yöntem arasındaki nodül sayısı farkı açıkça görülmektedir.



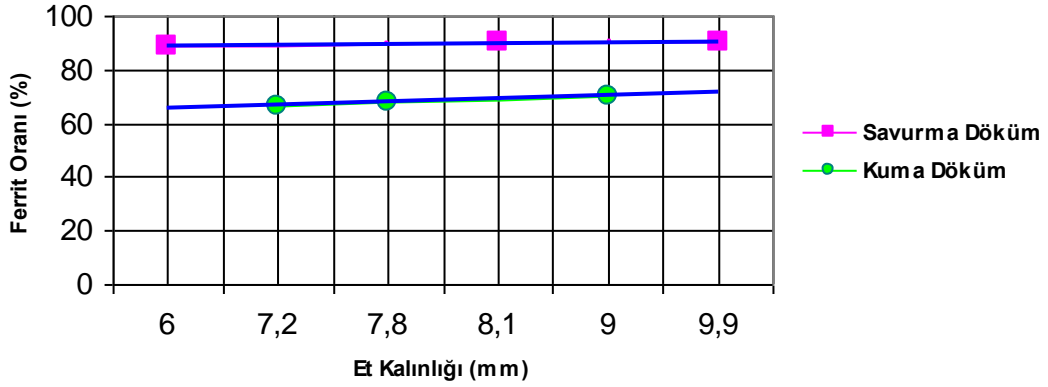
Şekil 6.17. Düktil demir boru ve bağlantı parçası numuneleri için savurma ve kuma döküm yöntemlerinde et kalınlığı – nodül sayısı ilişkisi

Şekil 6.18’ de savurma döküm (düktil demir boru) ve kuma döküm (düktil demir boru bağlantı parçası) numuneleri için et kalınlığı – ortalama grafit çapı ilişkisi grafiksel olarak verilmiştir. Numunelerin et kalınlığı arttıkça ortalama grafit çapının arttığı gözlenmiştir. Grafit çapı savurma döküm numunelerde daha küçüktür. Bunun nedeni döküm metal kalıpta yapıldığından hızlı katılaşma vardır ve buna bağlı olarak savurma dökümde azalan katılaşma süresi nedeniyle grafitler büyümemekte ve ince kalmaktadır. Aşılama ve küreleştirme şartları aynı olduğundan belirleyici faktör soğuma hızıdır. Soğuma hızı yavaş olduğunda (bağlantı parçaları) grafit irileşmekte ve küre sayısı az olmaktadır. Soğuma hızı fazla olduğunda ise irileşme için süre yetersizdir.



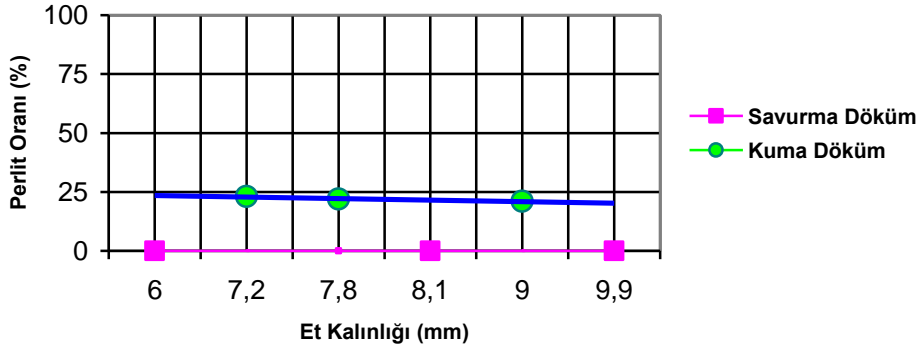
Şekil 6.18. Düktil demir boru ve bağlantı parçası numuneleri için savurma ve kuma döküm yöntemlerinde et kalınlığı – ortalama grafit çapı ilişkisi

Şekil 6.19’ da savurma döküm (düktil demir boru) ve kuma döküm (düktil demir boru bağlantı parçası) numuneleri için et kalınlığı – ferrit oranı ilişkisi grafiksel olarak verilmiştir. Numunelerin et kalınlığı arttıkça ferrit oranının arttığı gözlenmiştir. Savurma döküm numunelerde ferrit oranı yüksektir.



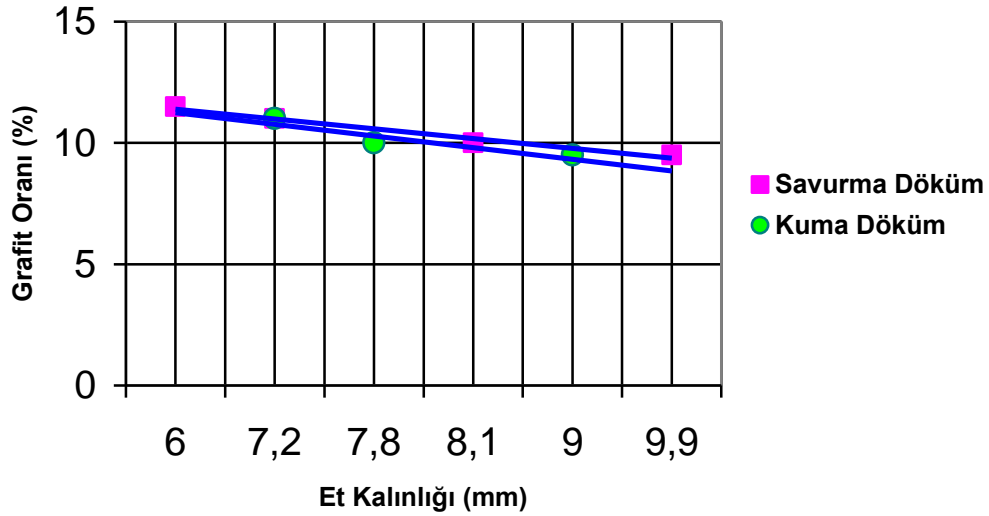
Şekil 6.19. Düktil demir boru ve bağlantı parçası numuneleri için savurma ve kuma döküm yöntemlerinde et kalınlığı – ferrit oranı ilişkisi

Şekil 6.20’ de savurma döküm (düktil demir boru) ve kuma döküm (düktil demir boru bağlantı parçası) numuneleri için et kalınlığı – perlit oranı ilişkisi grafiksel olarak verilmiştir. Savurma döküm ve kuma döküm yöntemi ile üretilen numuneler perlit oranı bakımından karşılaştırıldığında borularda da perlit görülmemektedir. Bağlantı parçalarında ise perlit oranı yüksektir ve et kalınlığı arttıkça oran düşmektedir.



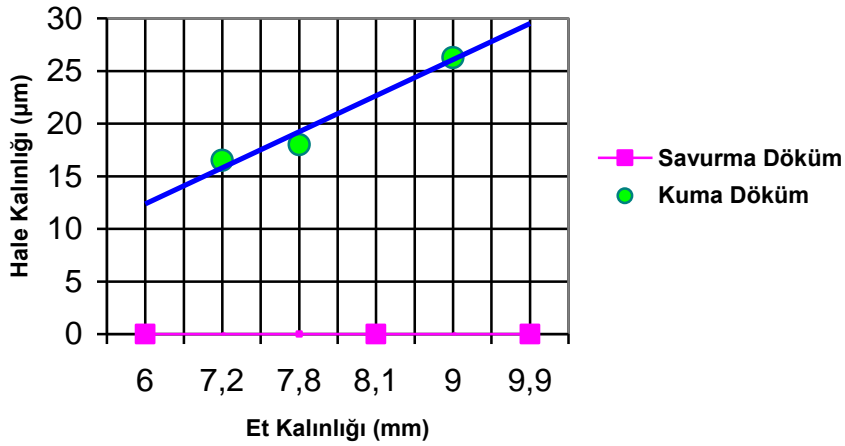
Şekil 6.20. Düktil demir boru ve bağlantı parçası numuneleri için savurma ve kuma döküm yöntemlerinde et kalınlığı – perlit oranı ilişkisi

Şekil 6.21’ de savurma döküm (düktil demir boru) ve kuma döküm (düktil demir boru bağlantı parçası) numuneleri için et kalınlığı – grafit oranı ilişkisi grafiksel olarak verilmiştir. Her iki yöntemde de et kalınlığı arttıkça grafit oranının azaldığı ve birbirine yakın olduğu gözlenmiştir.



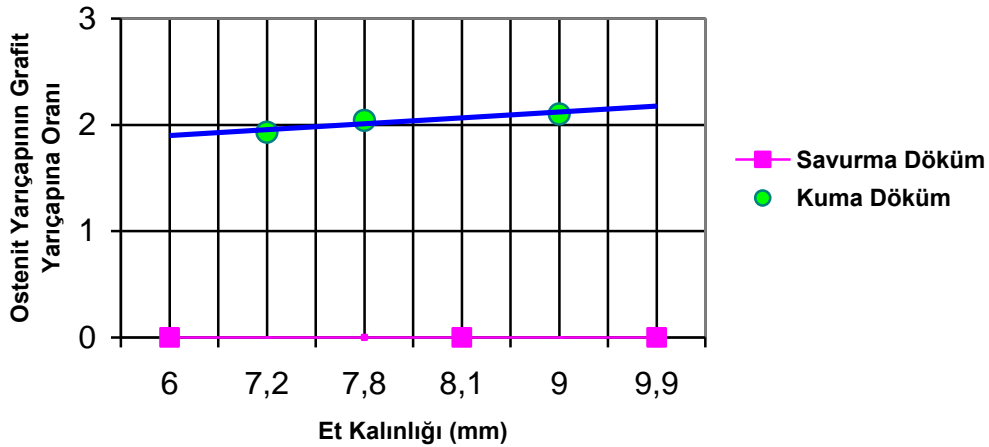
Şekil 6.21. Düktil demir boru ve bağlantı parçası numuneleri için savurma ve kuma döküm yöntemlerinde et kalınlığı – grafit oranı ilişkisi

Şekil 6.22’ de savurma döküm (düktil demir boru) ve kuma döküm (düktil demir boru bağlantı parçası) numuneleri için et kalınlığı – hale kalınlığı ilişkisi grafiksel olarak verilmiştir. Boru numunelerinde hale oluşumu yoktur. Bağlantı parçalarında ise et kalınlığı arttıkça hale kalınlığının da arttığı gözlenmiştir.



Şekil 6.22. Düktil demir boru ve bağlantı parçası numuneleri için savurma ve kuma döküm yöntemlerinde et kalınlığı – hale kalınlığı ilişkisi

Şekil 6.23’ de savurma döküm (düktil demir boru) ve kuma döküm (düktil demir boru bağlantı parçası) numuneleri için et kalınlığı – ostenit yarıçapının grafit yarıçapına oranı ilişkisi grafiksel olarak verilmiştir. Bağlantı parçalarında oran et kalınlığına bağlı olarak artmaktadır.



Şekil 6.23. Düktil demir boru ve bağlantı parçası numuneleri için savurma ve kuma döküm yöntemlerinde et kalınlığı – ostenit yarıçapının grafit yarıçapına oranı ilişkisi

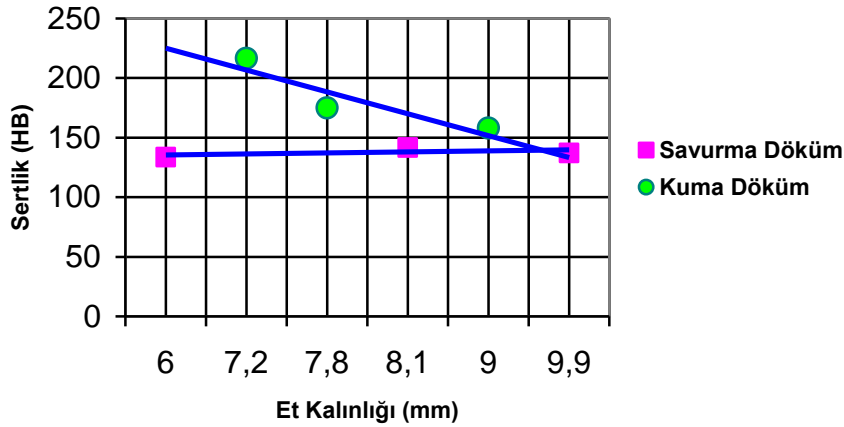
6.4. Sertlik (HB) Test Sonuçları

Düktil demir boru ve bağlantı parçaları için sertlik ölçüm sonuçları ve çapa bağlı ortalama değerler Tablo 6.3’ de verilmiştir.

Tablo 6.3. Düktil demir boru ve bağlantı parçası numuneleri için sertlik ölçüm sonuçları

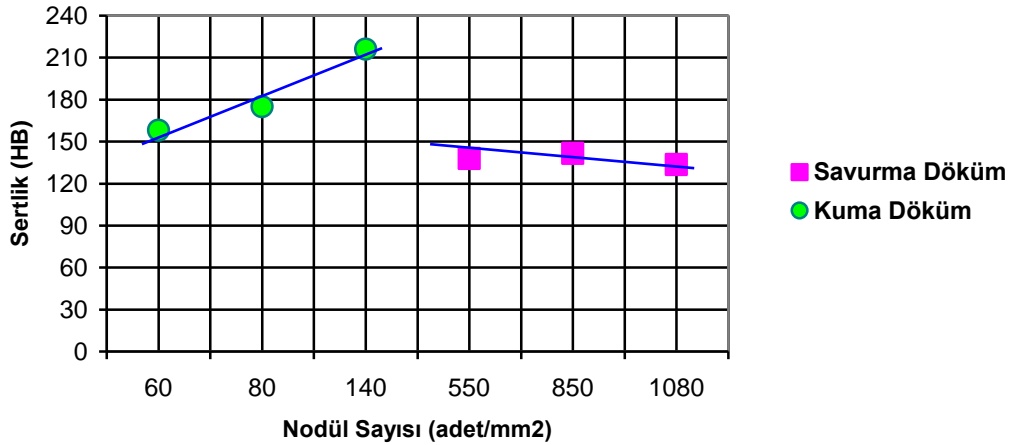
Numune Kodu	Et Kalınlığı (mm)	En Az 3 Ölçüm Ortalaması (HB)	Aynı Çap ve Et Kalınlığında Ortalama Sertlik Değerleri (HB)
B.100.1	6,0	129	133
B.100.2	6,0	138	
B.400.1	8,1	137	141
B.400.2	8,1	146	
B.600.1	9,9	133	137
B.600.2	9,9	141	
F.100.1	7,2	218	216
F.100.2	7,2	196	
F.100.3	7,2	236	
F.150.1	7,8	172	175
F.150.2	7,8	178	
F.250.1	9,0	155	158
F.250.2	9,0	161	

Şekil 6.24' de savurma döküm (düktil demir boru) ve kuma döküm (düktil demir boru bağlantı parçası) numuneleri için et kalınlığı – sertlik ilişkisi grafiksel olarak verilmiştir. Kuma dökümde et kalınlığı arttıkça sertliğin düştüğü, savurma dökümde ise et kalınlığı arttıkça sertliğin çok düşük oranda arttığı saptanmıştır.



Şekil 6.24. Düktil demir boru ve bağlantı parçası numuneleri için savurma ve kuma döküm yöntemlerinde et kalınlığı – sertlik ilişkisi

Şekil 6.25' de savurma döküm (düktil demir boru) ve kuma döküm (düktil demir boru bağlantı parçası) numuneleri için nodül sayısı – sertlik ilişkisi grafiksel olarak verilmiştir. Kuma dökümde nodül sayısı arttıkça sertliğin arttığı, savurma dökümde ise nodül sayısı arttıkça sertliğin çok az oranda düştüğü saptanmıştır.



Şekil 6.25. Düktil demir boru ve bağlantı parçası numuneleri için savurma ve kuma döküm yöntemlerinde nodül sayısı – sertlik ilişkisi

6.5. Çekme Test Sonuçları

Kopma noktasına kadar olan uzama yüzdesi sünekliğin bir ölçütüdür. Uzama yüzdesi ne kadar fazla ise malzeme o kadar sünektir. Sünek malzemenin karşısı kırılğan malzeme olarak adlandırılır. Gevrek kırılmada malzeme, çok az plastik şekil değiştirdikten sonra veya hiç plastik şekil değiştirmeden iki veya daha çok parçaya ayrılır. Çekme deneyinde bu ayrılma genellikle ayrılma düzlemleri boyunca oluşur. Ayrılma, normal gerilmenin maksimum olduğu kristal düzlemleri boyunca meydana gelir. Çekmeye zorlanan çok kristalli bir metalde, gevrek kırılma yüzeyi makroskopik olarak çekme gerilmesine diktir ve çatlakın taneden taneye yayılması sırasında ayrılma düzlemlerinin doğrultusu değiştiği için de parlak taneli bir görünüme sahiptir.

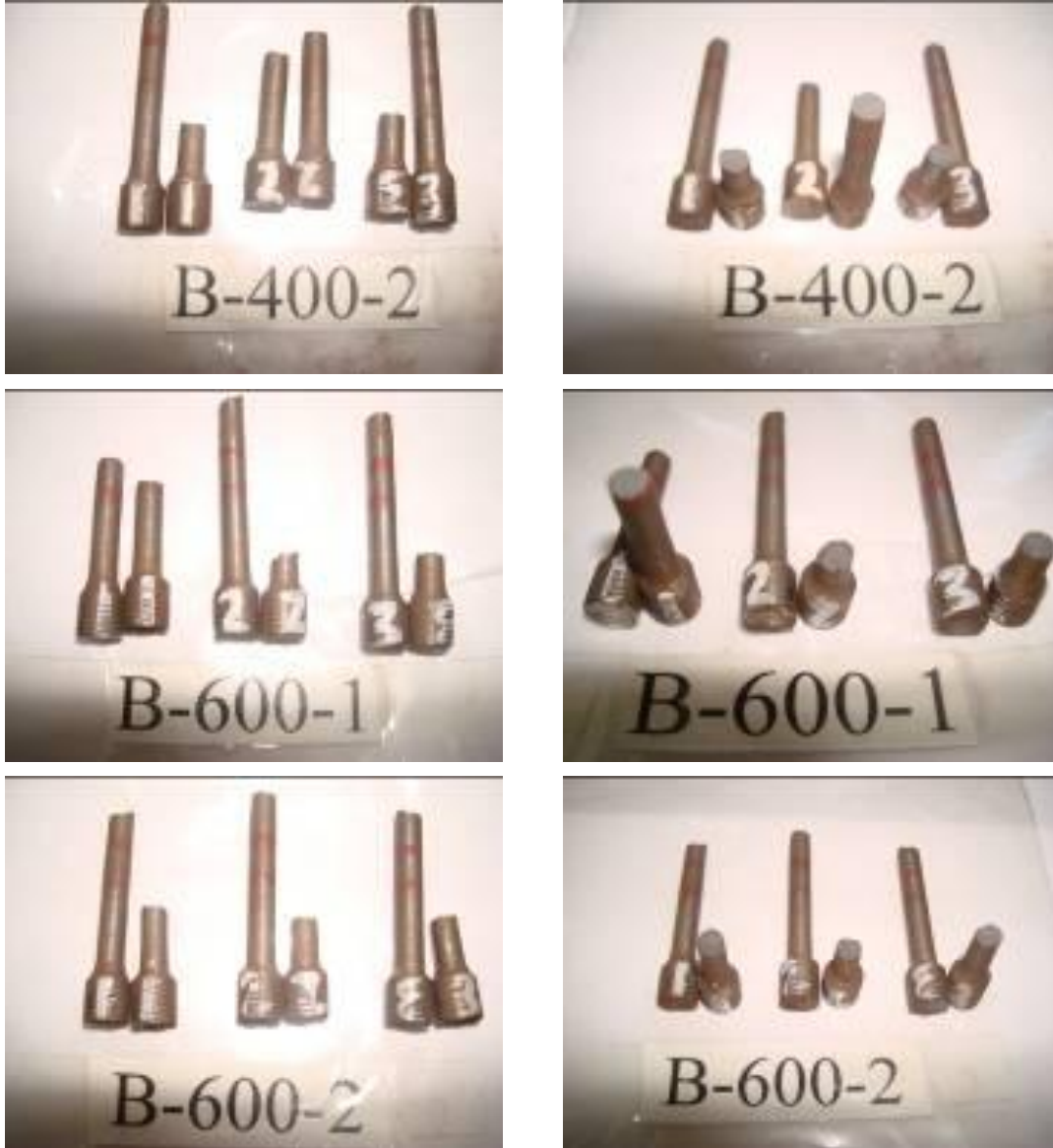
Sünek kırılma belli bir miktar plastik şekil değişiminden sonra oluşur. Sünek malzemelerin gerilme – genleme eğrileri altındaki alan büyüktür. Yani sünek kırılma gevrek kırılmaya kıyasla oldukça büyük enerji yutar. Sünek kırılma genellikle kaymanın maksimum olduğu düzlemler boyunca oluşur. Sünek kırılmalarda oluşan kırılmaya şeklinden dolayı çanak - koni tipi kırılma denir. Kırılma yüzeyinin kenarlarındaki ve çekme doğrultusuyla 45° açı yapan yüzeye de kayma yanakları adı verilir. Oksit, sülfür, karbür ve silikat gibi bileşikler ve diğer kalıntılar metal ve alaşımlarda boşluk oluşumuna, dolayısıyla süneklik ve sünek kırılmaya negatif

yönde etki ederler. Bu etki malzemelerin şekillendirilebilme kabiliyeti bakımından olumsuzdur. Benzer şekilde örneğin dökümde oluşan boşluk ve gözenekler de sünekliğin azalmasına yol açar [38].

Düktül dökme demir malzemeler gri (pik) dökme demir ile karşılaştırıldığında daha sünektirler. Düktül dökme demir sünek, gri dökme demir ise gevrek kırılır. Çekme test cihazı ile teste tabi tutulan numunelerde görülen sünek kırılma ve uzamalar Şekil 6.26' da görülmektedir.



Şekil 6.26. Düktül demir boru numunelerinin çekme testi sonrası resimleri



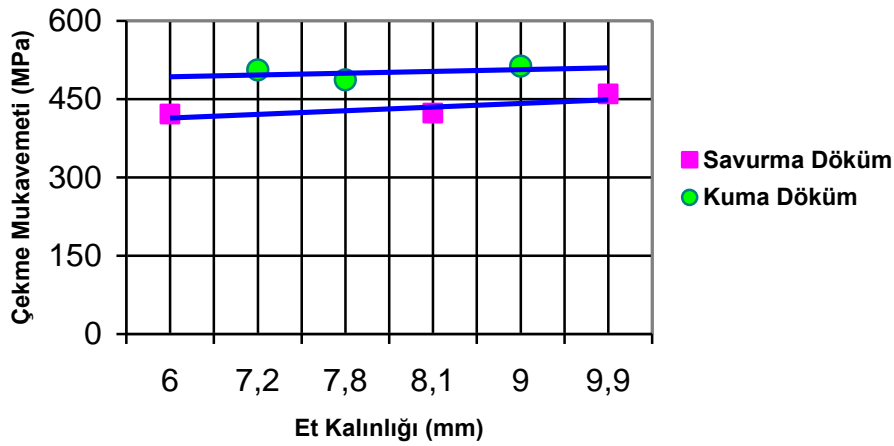
Şekil 6.26. (Devamı)

Düktül demir boru ve bağlantı parçalarının çekme testine bağlı olarak bulunan mukavemet değerleri ve çapa bağlı ortalamaları Tablo 6.4' de verilmiştir.

Tablo 6.4. Düktil demir boru ve bağlantı parçalarının çekme mukavemeti ve % uzama değerleri

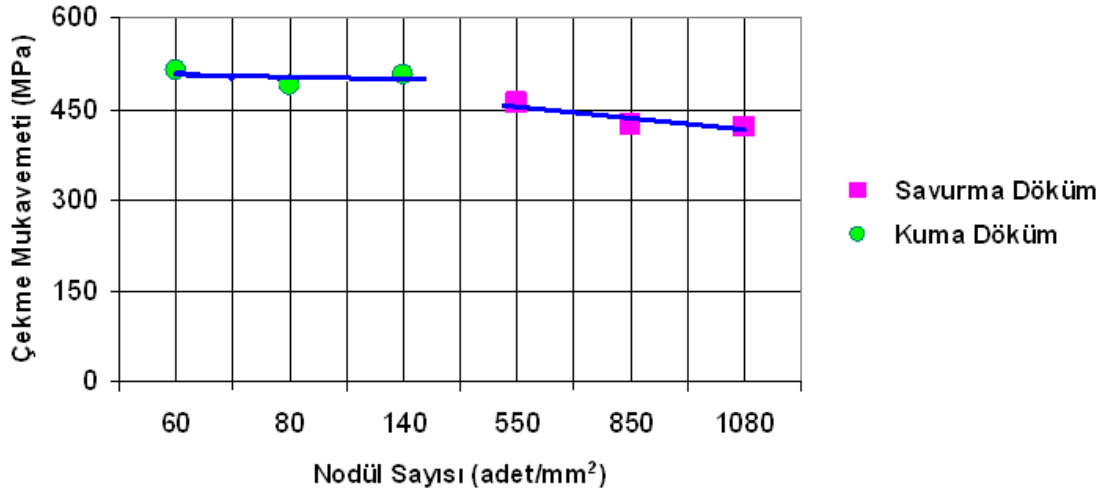
	Numune Kodu	Et Kalınlığı (mm)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Aynı Çap ve Et Kalınlığında Ortalama Çekme Mukavemeti Değerleri (MPa)	Uzama (%)	Aynı Çap ve Et Kalınlığında Ortalama Uzama Değerleri (%)
BORULAR (Savurma Döküm)	B.100.1	6,0	449	421	18,8	15
	B.100.2	6,0	393		11,2	
	B.400.1	8,1	419	423	18,5	19,4
	B.400.2	8,1	427		20,3	
	B.600.1	9,9	449	459,5	20,9	20,8
	B.600.2	9,9	470		20,7	
BAĞLANTI PARÇALARI (Kuma Döküm)	F.100.1	7,2	495	506	15,6	17,8
	F.100.2	7,2	518		17,6	
	F.100.3	7,2	505		20,2	
	F.150.1	7,8	482	487	20,4	19,8
	F.150.2	7,8	492		19,2	
	F.250.1	9,0	497	513	20,6	20,95
	F.250.2	9,0	529		21,3	

Şekil 6.27’ de savurma döküm (düktül demir boru) ve kuma döküm (düktül demir boru bağlantı parçası) numuneleri için et kalınlığı – çekme mukavemeti ilişkisi grafiksel olarak verilmiştir. Numunelerin et kalınlığı arttıkça çekme mukavemetinin çok yakın oranda arttığı saptanmıştır.



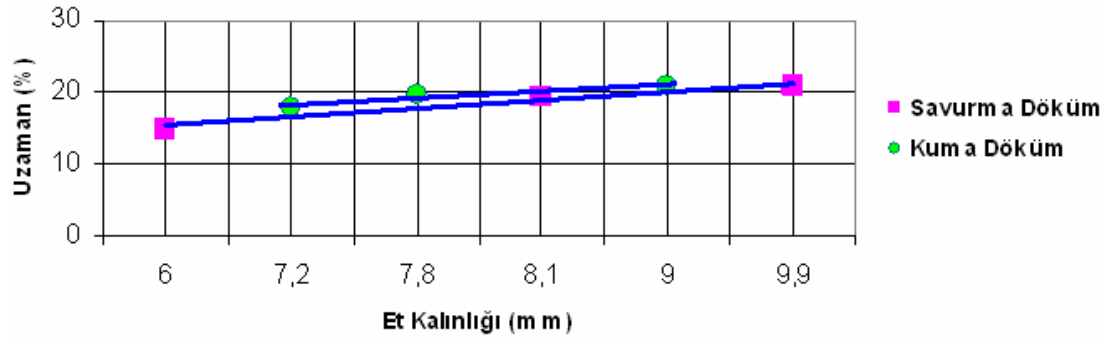
Şekil 6.27. Düktil demir boru ve bağlantı parçası numuneleri için savurma ve kuma döküm yöntemlerinde et kalınlığı – çekme mukavemeti ilişkisi

Şekil 6.28’ de savurma döküm (düktül demir boru) ve kuma döküm (düktül demir boru bağlantı parçası) numuneleri için nodül sayısı – çekme mukavemeti ilişkisi grafiksel olarak verilmiştir. Numunelerin nodül sayısı arttıkça çekme mukavemetinin çok yakın oranda azaldığı saptanmıştır.



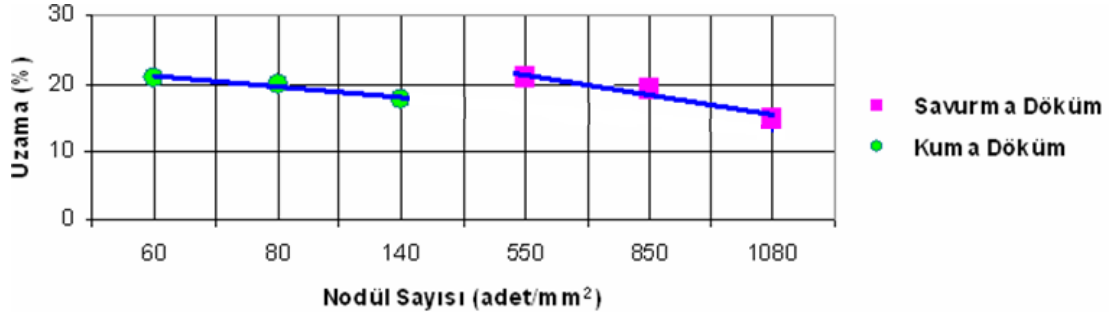
Şekil 6.28. Düktil demir boru ve bağlantı parçası numuneleri için savurma ve kuma döküm yöntemlerinde nodül sayısı – çekme mukavemeti ilişkisi

Şekil 6.29’ da savurma döküm (düktil demir boru) ve kuma döküm (düktil demir boru bağlantı parçası) numuneleri için et kalınlığı – uzama ilişkisi grafiksel olarak verilmiştir. Numunelerde et kalınlığı arttıkça % uzamanın arttığı saptanmıştır.



Şekil 6.29. Düktil demir boru ve bağlantı parçası numuneleri için savurma ve kuma döküm yöntemlerinde et kalınlığı – % uzama ilişkisi

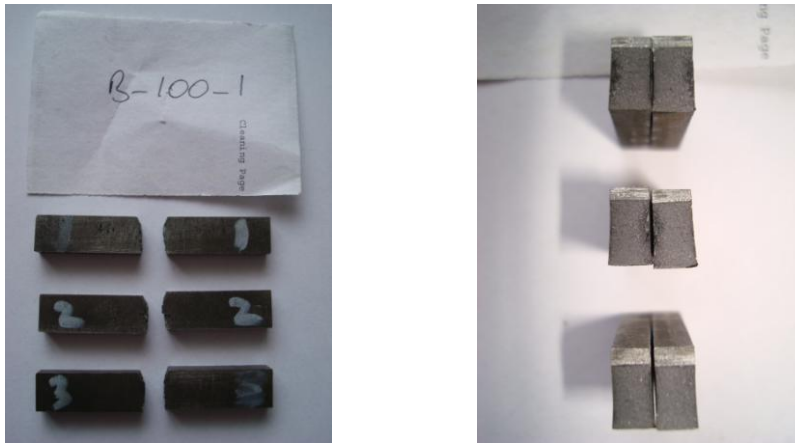
Şekil 6.30’ da savurma döküm (düktil demir boru) ve kuma döküm (düktil demir boru bağlantı parçası) numuneleri için nodül sayısı – uzama ilişkisi grafiksel olarak verilmiştir. Numunelerde nodül sayısı arttıkça % uzamanın azaldığı saptanmıştır.



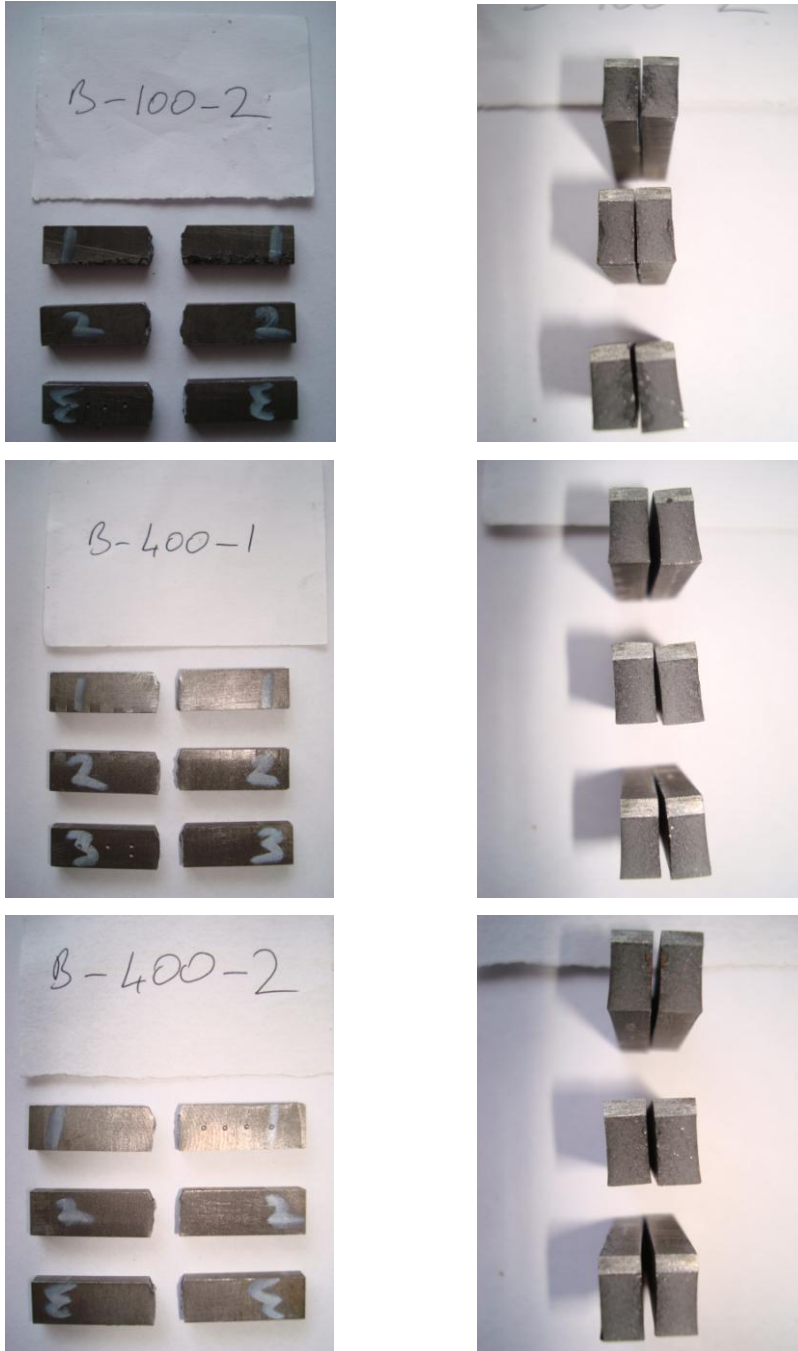
Şekil 6.30. Düktil demir boru ve bağlantı parçası numuneleri için savurma ve kuma döküm yöntemlerinde nodül sayısı – % uzama ilişkisi

6.6. Darbe Test Sonuçları

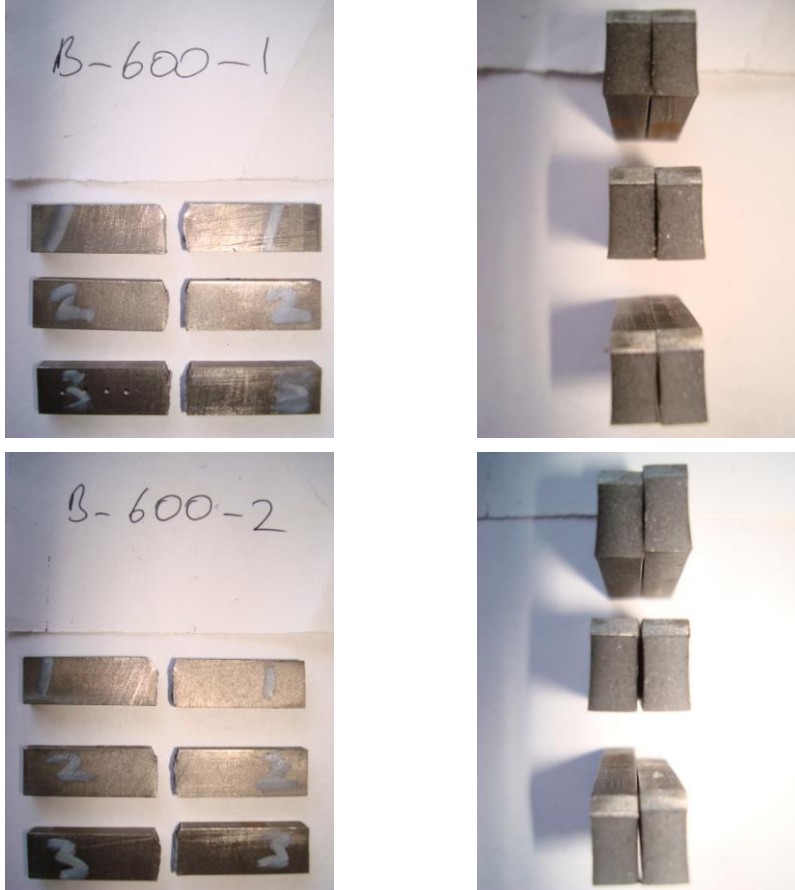
Çok sayıda araştırmacı [39,40] tarafından yapılan çalışmalar çentik darbe direncinin mikroyapının fonksiyonu olduğunu göstermiştir. En önemli unsur perlit ve sementit (karbür) mevcudiyetidir. Örneğin özellikleri aynı olan iki düktil demirden birinde perlit varsa onun darbe direnci düşük olacaktır. Serbest sementitlerin çentik etkileri ve tokluk düşürücülüğü tartışmasız bir gerçektir ve bütün bilim çevrelerince kabul görmüştür. Düktil demir boruların darbe testi sonucu kırık resimleri Şekil 6.31’ de gösterilmiştir.



Şekil 6.31. Düktil demir boru numunelerinin darbe testi sonrası resimleri



Şekil 6.31. (Devamı)



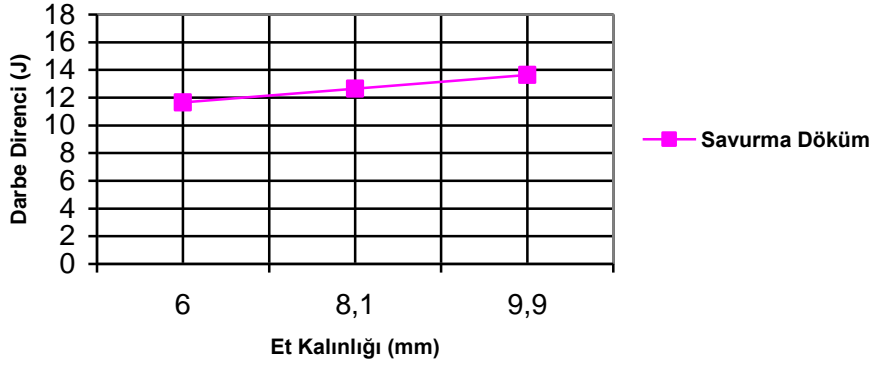
Şekil 6.31. (Devamı)

Darbe testi sonuçları iç çapı 100 mm olan borular için 11,65 J, iç çapı 400 mm olan borular için 12,65 J ve iç çapı 600 mm olan borular için 13,65 J olarak bulunmuştur. Düktil demir boru numunelerinin darbe testi değerleri ayrıntılı olarak Tablo 6.5' de verilmiştir.

Tablo 6.5. Düktil demir boru numunelerinin darbe test sonuçları

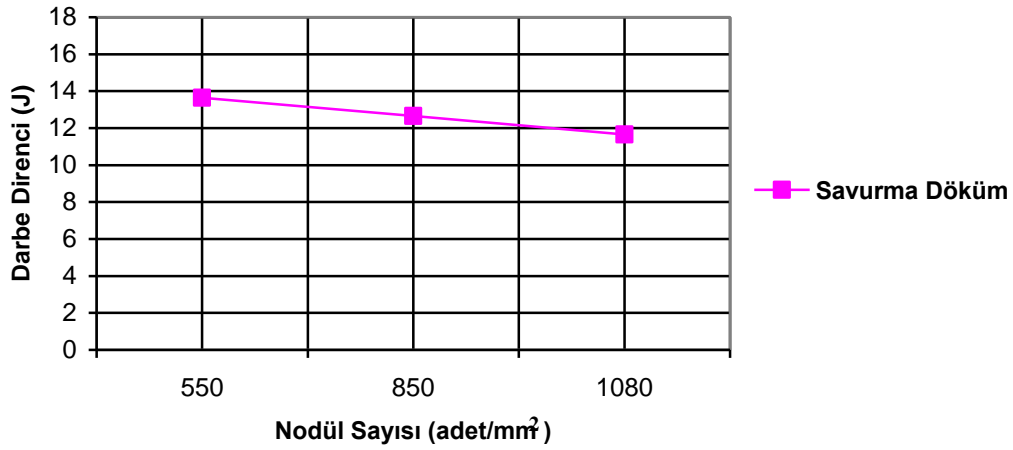
	Numune Kodu	Et Kalınlığı (mm)	Darbe Direnci (J) (3 Ölçüm Ortalaması)	Aynı Çap ve Et Kalınlığında Boruların Ortalama Darbe Enerjisi Değerleri (J)
BORULAR (Savurma Döküm)	B.100.1	6,0	11	11,65
	B.100.2	6,0	12,3	
	B.400.1	8,1	13,3	12,65
	B.400.2	8,1	12	
	B.600.1	9,9	13,3	13,65
	B.600.2	9,9	14	

Şekil 6.32’ de savurma döküm (düktül demir boru) numuneleri için et kalınlığı – darbe direnci ilişkisi grafiksel olarak verilmiştir. Savurma döküm numunelerde et kalınlığı arttıkça darbe direncinin arttığı saptanmıştır.



Şekil 6.32. Savurma döküm düktül demir boru numuneleri için et kalınlığı – darbe direnci ilişkisi

Şekil 6.33’ de savurma döküm (düktül demir boru) numuneleri için nodül sayısı – darbe direnci ilişkisi grafiksel olarak verilmiştir. Savurma döküm numunelerde nodül sayısı arttıkça darbe direncinin düştüğü saptanmıştır.



Şekil 6.33. Savurma döküm düktül demir boru numuneleri için nodül sayısı – darbe direnci ilişkisi

6.7. Sonuçlarının İrdelenmesi

Düktül demir borular 1950 sonlarından itibaren pik demir boruların yerini almaya başladığında kullanıcılar daha çok mekanik performansa odaklandılar. 55 yıllık tecrübe göstermiştir ki, kimyasal performans (korozyona dirençlilik gibi) en az

mekanik özellikler kadar önemlidir ve boru ömrünü etkilemektedir. Düktil demir borular, atası olan pik borulardan daha az oranda hasar gösterir. Hasar şekilleri korozyon nedenli patlamalar, çemberel kırıklar, boylamasına kırıklar, muf ayrılması ve spiral kırılmalarıdır. Bu hasarların nedeni büyük ölçüde korozyon dışıdır ve üretim hataları, mekanik yüklenmeler ve muhtelif insan faktörlerinin bileşkesidir.

Saha çalışmaları ile düktil demir borular için gözlenen sınırlı sayıdaki hasarların büyük ölçüde katılma ile veya katılmadan sonraki aşamalarla (soğutma ve ısıtma işlemi gibi) ilişkili olduğu bulunmuştur. Standartlara ve şartnamelere uygun olarak üretilen ve işletilen düktil demir boru sistemleri göreceli olarak üstündürler.

Düktil demir üretiminde yaygın olarak karşılaşılan problemlerden en önemlileri küre morfolojisindeki bozulmalar ve uygun oranlarda küreselleşmenin sağlanamamasıdır [41, 42]. Küreselleşme oranı, düktil demirde mekanik özelliklerin iyileşmesinde en önemli faktördür. Bundan dolayı üretim esnasında her türlü metalurjik parametreler dikkatlice uygulanarak küreselleşme oranı, küre şekli ve dağılımı uygun olmalıdır [43, 44 – 46]. Küresel grafitler, mikroyapıya belirli bir esneklik kazandırarak gri dökme demire göre daha yüksek çekme dayanımı, akma noktası ve daha fazla süneklik kazandırır [15, 47 – 49]. Darbe ve yorulma dayanımlarının grafit şekli ve dağılımı ile çok sıkı bir ilişkisi olduğu halde, birbirine çok yakın küreselleşme oranlarında, bu özelliklerin yanında diğer mekanik özelliklerde çok az bir değişim olmaktadır [50–52]. Küreselleşmenin farklı oranlarda (%10–15 sapma) gerçekleştiği durumlarda mekanik özelliklerde değişimler görülmektedir [45, 47, 52, 53].

Düktil demirlerde grafit yapısı ve dağılımı önemli bir parametredir. Artan küresel grafit sayısı ve küreselleşmeden artan oranda sapma darbe direncini kayda değer mertebede düşürmektedir. Mikroboşluklar ve poroziteler de darbe direncini düşüren yapı hatalarıdır. Bu, mikroporozite yoğun kuma döküm ve porozitesiz savurma döküm deneyleri ile düktil demir için kanıtlanmıştır. Muhtelif çalışmalar ince kesit ($e \leq 6$) düktil demir dökümlerinde darbe direnci açısından bir ikilem olduğunu göstermiştir. İyi küreleştirme ve aşılama ile küre sayısı maksimum değere erişir ve bu yolla karbür oluşumu önlenir. Darbe direncini düşüren karbürler oluşmaz fakat diğer yandan artan küre sayısı ise kırılabilirliği artırır (darbe direncini düşürür). İnce kesitli düktil demirlerde küre sayısı mm^2 de 1000' i aşabilir ve bu darbe direnci

açısından sorundur. Aşılamanın ideal yapılması ve azaltılması ile 300 – 800 adet/mm² lik ideal küre sayılı yapı elde edilir ve aynı zamanda karbür önlenir. Kimyasal bileşim de çok önemli unsurdur. Artan P' un (% 0,016 → % 0,090) darbe direncini 3 – 4 kat azalttığı literatürde verilmiştir [54]. Artan Si (2,7 → 3,4) ise darbe direncini düşürdüğü ve yapıdaki grafit küre sayısını arttırdığı rapor edilmiştir [55]. 1988' de Rio Tinto'nun verdiği darbe direnci küresel grafit sayısı ilişkisi on yıl sonra I. Henych [12]' in yaptığı çalışma ile tekrar incelenmiştir. Sonuç, grafit küre sayısının darbe direncini düşürdüğü şeklindedir.

Kimyasal bileşim, nodül sayısı ve dökümün son matris yapısı soğuma hızı nedeniyle, ostenit dönüşüm bölgesinde kararlaştırılır. İnce kesitlerde hızlı soğuma perlit oluşumunu, yavaş soğuma ise ferrit oluşumunu artırır. Et kalınlığındaki artış ve soğuma hızındaki düşüş nodül sayısının az olmasına sebep olur. Geç ve bir kaç aşılama adımı ile nodül sayısı artışı ve maksimum ferrit miktarı sağlanır. İnce kesitli dökümlerde yüksek karbon eşdeğerliği çil karbür oluşumunu önlemek için seçilir. Çok yüksek karbon eşdeğerliği akışkanlığı düşürebilir ve bunun sonucunda da kötü dökümler olabilir. Mn, Cr, V gibi diğer karbür yapıcı elementlerde mümkün olduğunca düşük seviyede kalmalıdır [56].

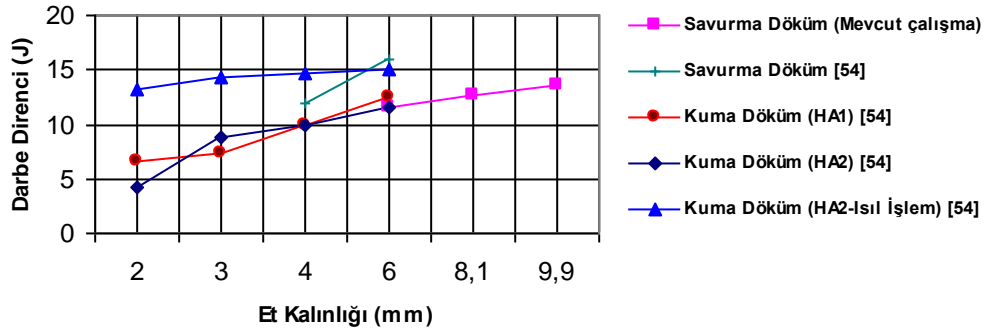
A. Javaid ve arkadaşları [57] tarafından ince cidarlı küresel grafitli dökme demirlerin mekanik özelliklerini etkileyen mikroyapısal faktörlerin değerlendirilmesi ile ilgili yapılan çalışmada, artan kalınlıkla beraber ferrit oranının ve ortalama grafit çapının arttığı, kalınlığın azalmasıyla küre sayısının yükseldiği bulunmuştur.

Yapılan deneysel çalışmalar ve incelemeler sonucunda bulunan değerler yukarıda verilen literatür sonuçları ile mukayese edilmiş ve aşağıdaki gibi yorumlanmıştır:

- a. Kuma döküm bağlantı parçası numunelerinde perlit olduğu için çekme mukavemeti yüksektir. Savurma döküm düktil boru numunelerin yapısı ferritik olduğundan çekme mukavemeti ve diğer mekanik değerleri iyi çıkmıştır. Savurma döküm parçalarda yönelmiş katılama vardır ve yapıda boşluk gibi hatalar bulunmamaktadır. Şekil 6.25, 6.28 ve 6.30' da sertlik, çekme mukavemeti ve % uzama değerleri borular ve bağlantı parçaları için birlikte

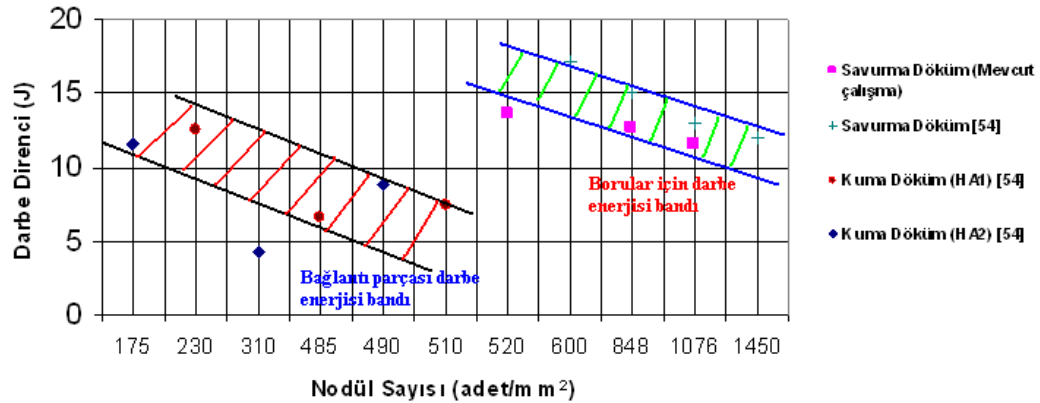
verilmiştir. Küre sayısı esas alındığında her iki grup malzeme için değişimler minimaldir. Çok sayıda yapılan deney sonucu göstermiştir ki artan küre sayısı ile borularda sertlik, çekme mukavemeti ve % uzama düşmektedir. Düşüş belirgindir fakat azdır. Bağlantı parçalarında ise artan küre sayısı ise çekme mukavemeti ve % uzama da düşüş verirken, sertlikte yükselme göstermiştir. Bunun sebebi Şekil 6.20’de görülen çok sayıda küre içeren numunede görülen yüksek perlit oranıdır. Belirlenemeyen diğer faktörler de söz konusudur. Küre sayısına göre yapılan bu mukayese sınırlı literatürle [54] uyum halindedir. Çekme deneyleri ile ilgili literatür bilgisi mevcut değildir. Kuma döküm numunelerde kalınlık azaldıkça (veya modül) sertliğin arttığı gözlenmiştir. Kalınlık azaldıkça oluşan perlit daha ince ve sıkı yapılı olmakta ve malzemenin sertliğinin artmasına yol açmaktadır. Diğer bir etki kalınlık azaldıkça oluşan grafit küre sayısının artması ve çaplarının düşmesidir. Buda malzemenin sertliğini arttırmaktadır.

- b. Düktil demir borular için AWWA C151 ve ASTM E23 standartları oda sıcaklığında minimum 9,45 J Charpy darbe test sonucu istemektedir. ISO 2531 ve EN 545 standartları ise Charpy darbe testi ile ilgili olarak herhangi bir değer talep etmemektedir. Düktil demir boru ve bağlantı parçası numunelerinde kesit kalınlığı incelidikçe küre sayısı artmaktadır. Artan küre sayısı, çentik etkisi yaptığından darbe enerjisini düşürmektedir. Savurma ve kuma döküm düktil demir parçalarda et kalınlığı arttıkça nodül sayısının azalmasından dolayı darbe direncinin arttığı literatür ile karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Literatür sonuçları ve mevcut sonuçlar Şekil 6.34 – 6.36’ da birlikte verilmiştir. Standartlar istemediğinden mevcut çalışmada bağlantı parçaları için darbe direnci deneyleri yapılmamıştır.



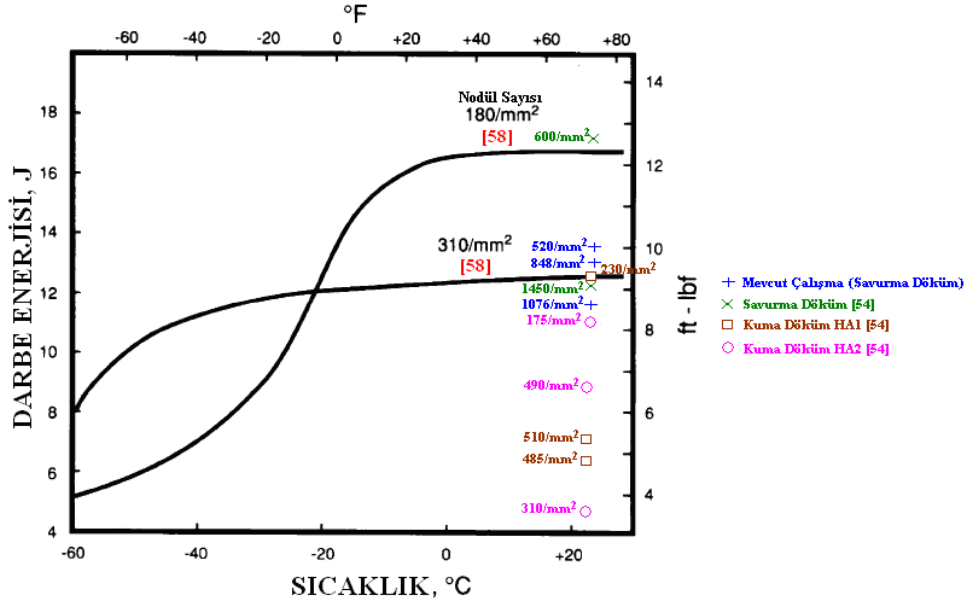
Şekil 6.34. Darbe test sonuçlarının et kalınlığına bağlı olarak karşılaştırılması

Şekil 6.34' de verilen sonuçlar küre sayısına göre tekrar verilirse beklenen darbe direnci - küre sayısı ilişkisi çıkmaktadır. Küre sayısı 1000' i aştığında duktıl demir borularda darbe direnci limit değer olan 9,45 J' ün altına düşecektir. Bu kritik değer deprem bölgeleri için çok önemlidir.



Şekil 6.35. Darbe test sonuçlarının nodül sayısına bağlı olarak karşılaştırılması

Rio Tinto' nun [58] verdiği diyagram üstüne mevcut ve birkaç farklı çalışma [54] sonucu yerleştirilmiş ve Şekil 6.35' de verilen geniş darbe direnç aralığı (küre sayısına göre) kanıtlanmıştır.



Şekil 6.36. Savurma ve kuma döküm parçalarda sıcaklığı bağı olarak nodül sayısı – darbe enerjisi değişimi

Rio Tinto' nun [58], yaptığı çalışmada aynı malzemede sıcaklık arttıkça darbe enerjisi değeri artmaktadır. Çentikli ve çentiksiz yapılan darbe deneylerinde çentiksiz numunenin darbe enerjisi değeri çentikli numuneden yaklaşık 5 kat daha fazladır. Sıcaklığın ve perlit yüzdesinin artması ile darbe enerjisi ciddi oranda düşmektedir (yapı tamamen ferritik olmalı). Sıcaklığın artması ve C' un düşmesi ile darbe enerjisi artmaktadır (yüksek C içeriği dökümde grafit kırılmasını artırır ve darbe enerjisini azaltır). Sıcaklık ve küresellik arttıkça darbe enerjisi yaklaşık 2 kat artar (%50 küresel yapıda 7 J iken, %100 küresel yapıda 14 J' dur). Mevcut çalışmada bağlantı parçalarında muhtelif yapı hataları yanında küreselleşme de düşük olduğu için darbe dirençlerinin de düşük olması beklenir. Bu durum Şekil 6.35' de görülebilir.

- c. Yapısal özellikler (ferrit, grafit, perlit) borular için Şekil 6.2, 6.4 ve 6.6' da, bağlantı parçaları için ise Şekil 6.8, 6.10 ve 6.12' de verilmiştir. Yapı elamanları arasında uyum vardır. Tez çalışmasında kullanılan numunelerde kalınlığın artmasıyla birlikte malzemede ki ferrit oranı, ortalama grafit çapı ve γ -hale kalınlığı artmıştır. Numuneler kalından inceye doğru tek tek değerlendirildiğinde, ortalama grafit çapında küçülme olduğu görülmüştür. Kalınlık (veya modül) azaldıkça soğuma daha kısa sürede gerçekleşmekte yani malzeme daha hızlı

katılaşmaktadır. Bu sebeple test edilen numunelerde kalınlık azaldıkça ortalama grafit çapında da küçülme gerçekleşmiştir.

- d. Beklendiği gibi aynı et kalınlığında bile olsa düktil demir borudaki küre sayısı bağlantı parçalarından daima daha yüksektir. Bunun sebebi aşılama, küreleştirme, döküme kadar geçen süre, katılma süresi ve savurma döküm doğasıyla ilgilidir. Savurma döküm aşılama dan hemen sonra (ve sırasında) gerçekleştirildiği için grafit büyümesine zaman kalmadan çok sayıda ince dağılım elde edilir. Savurma dökümde kalıpta aşılama da tarz olduğundan tanelerin çok ve küçük olması normaldir. Bağlantı parçalarında döküm aşılama dan çok sonra yapılmaktadır ve sünme efekti (etkisizleşme – fading) problemi kesinlikle vardır. Bu, grafit yapısını da (küreselleşme %'si) etkilemiştir. Ayrıca kuma dökümde ısı transferi düşük olduğu için katılma süresi de uzundur ve grafitler de irileşmektedir. Bu sonuçlar Şekil 6.17 – 6.18 ve Tablo 6.1 verileri ile uyum içindedir. Ayrıca temel literatür [1, 11, 30 – 34, 54] bilgisi ile örtüşmektedir.

Kalıpta aşılama yapıldığında aşılama henüz dağılmadan ostenit ve ferrit büyümesi gerçekleşir Ce ihtiva eden aşılama malzemelerinde Bi (en ideal %0,02) bulunması halinde küre sayısı kuvvetli bir şekilde artmaktadır. FeSi ve Bi aşılama malzemelerinin kullanılmaları halinde yine zamanla bir etki azalması (küre sayısı) gözlenmesine rağmen, FeSi' a nazaran çok daha kuvvetli kalıcı bir etki mevcut olur (4-10 katı fazla). Diğer yandan patent çalışmaları [30 – 34] her iki küreleştiricinin (Mg ve Ce) birlikte ilavesinin etki azalmasını uzattığını vermiştir. İncelenen borular için aşılama ve küreleştirme şartları tam bilinmediğinden aynı kalınlıktaki numunelerde birim alana düşen küre sayısı değişimi yorumlanamamaktadır.

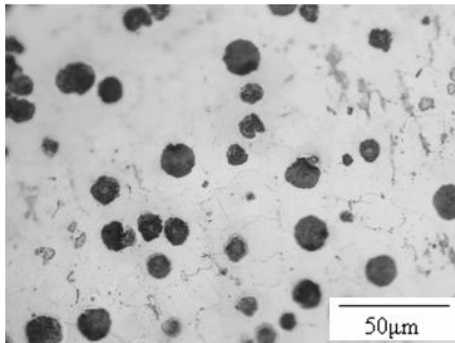
- e. B.100.1 ve B.100.2 nolu numunelerde (Şekil 6.1) yapılan incelemeler de, dış bölge ince küresel grafit dağılımı vermiştir. Orta bölge ise grafit irileşmesi ve muntazam dağılım vermiştir. Grafit irileşmesi – çapı dış bölgeye göre 2 – 3 kat fazladır. İç bölgede ise savurma dökümün doğası gereği inklüzyon oluşumları, çekme boşlukları ve grafit küreleşmeleri görülmüştür. İç bölgedeki bu

oluşumların kalınlığı ölçülmüş 1 mm' den daha düşük bir yapı vermiştir. Dış bölgedeki grafit inceliği hızlı grafit çekirdeklenmesi sonucudur. Grafitler yeteri kadar büyüyemeden ostenit büyümesi gerçekleşmiştir ve grafit büyümeleri tıkanmıştır. Bu numunelerde Karbon eşdeğeri $[CE = \%C + (\%Si + \%P)/3]$ 4,3'dür (Tablo 6.6) ve ötektik bileşimi vermektedir. Bundan dolayı grafitler genellikle eşit boyuttadır ve ötektik büyümeyi simgelemektedir. Aynı şarjlarda sapma ihmal edilecek kadar azdır.

Tablo 6.6. Düktil demir boru ve bağlantı parçası için kimyasal bileşim

Element	(%)												CE
	C	Si	S	P	Mn	Mg	Ti	Ni	Cr	V	Cu	Ce	
Düktil Demir Boru													
Miktar	3,60	2,04	0,006	0,05	0,14	0,04	0,07	0,006	0,01	0,05	0,01	0,006	4,3
Düktil Demir Boru Bağlantı Parçası													
Miktar	3,58	2,36	0,01	0,046	0,14	0,049	-	-	-	-	-	-	4,38

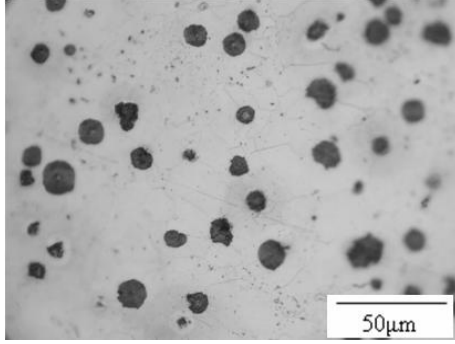
- f. Boru numunelerinin bir kısmında dağlanmış yapıda (Şekil 6.2) orta bölgede çok az miktarda (önemsenecek kadar) perlit uzantıları görülmektedir. Yüksek büyütme çalışmaları incelendiğinde yapıda ferrit+grafit kristali gözlenmiştir ve perlit oluşumları çok sınırlıdır (Şekil 6.37).



Şekil 6.37. B.100.1 nolu numune, dağlanmış yapı

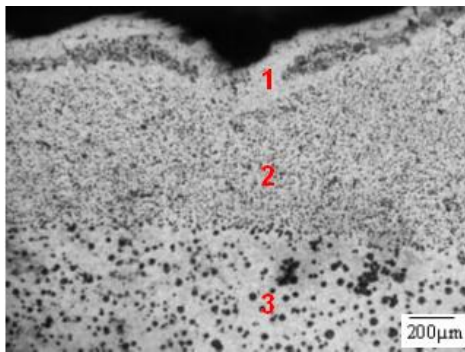
- g. Yüksek büyütmede bazı boru numunelerinin ince dış cidarları hariç yapıların ferritik olduğu anlaşılmıştır (Şekil 6.38). Geciken aşılardan dolayı bazı bölgelerde çok, bazı bölgelerde az grafit oluşmuştur. En dış bölgede C fakir, Fe yoğun bileşim (muhtemelen $>0,8\% C$ sıvı tabakası) önce osteniti oluşturmuştur.

Kalıp soğuması çok hızlı olduğu için orta ve iç kısımda katılaşma devam ederken dış bölgedeki ostenit perlitte dönüşmüştür.



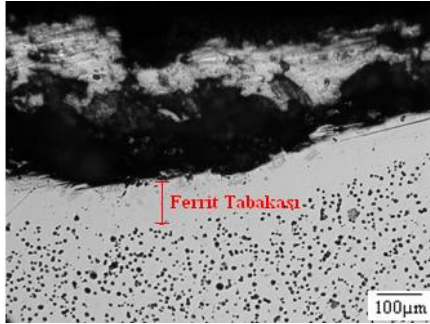
Şekil 6.38. B.400.1 nolu numune, dağlanmış yapı

- h. B.600.1 ve B.600.2 nolu numunelerde (Şekil 6.5 ve 6.6) de yapılan incelemelere göre, 600.2 nolu numune ötektik üstü kompozisyon olduğunu çağrıştırmaktadır. Çok iri ve çok küçük grafit kristalleri bir arada görülmüştür. Ayrıca grafit yüzmeleri de oluşmuştur. Şekil 6.39' da birinci bölgede perlit+ferrit bantı, ikinci bölgede grafit yüzmesi ve üçüncü bölgede normal grafit oluşumu ve birtakım grafit salkımlaşmaları vardır. Bilindiği gibi grafit yüzmesinin bir sebebi de vibrasyonlu dökümdür. Kalıp titreşimsiz olarak dönmelidir. Titreşime uğrayan kalıplardan çıkan döküm numuneleri birçok döküm hatasını üzerinde barındırmaktadır. Aşılama etkinliğinin azalması ile ince parça kesitlerinde karbür oluşumu artar ve kalın kesitlerde grafit yüzmesi olayı ile grafit patlaması riski fazlalaşır [55].

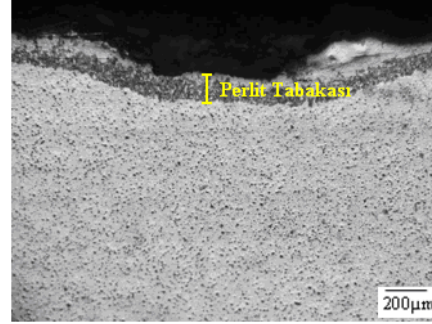


Şekil 6.39. B.600.2 nolu numune, dağlanmış yapı

- i. Yapılan detaylı çalışmada ferrit tabakası (ve perlit) 100'lük borularda 55 μm , 400'lük borularda 130 μm ve 600'lük borularda 100 μm ' dir. Bu bant yapısı dikkatlice incelendiğinde dağlanmış olarak yapıya bakıldığında zaman zaman perlit oluşumu da gözlenmiştir (şekil 6.40). Dış yüzeyde toplanan sıvı demir tamamen C' suz olabildiği gibi (%0 C) otektoid dönüşümü verebilecek C'da içerebilir ($C > \%0,4$). Ferrit bandı oluşumu ise aşağıdaki durumlarla açıklanabilir;
- Savurma dökümde kalıp soğutma ve yüksek devir nedeniyle hızlı katılaşma söz konusudur. Sıvı demir yoğunluğu fazla olduğu için ilk katılaşan düşük yoğunluklu grafit kristalleri içeriye doğru yönelirler. Cidarda sadece demir zengin sıvı tabaka kaldığı için ostenit çekirdeklenme ve büyümesi görülür. Bu ilk kademe büyümeden sonra dengeli çift yapı büyüme (grafit+ostenit) gerçekteşir.
 - Oluşan ve yeteri kadar büyüyen grafit kristalleri yanmaktadır. Bundan dolayı dış kabukta sadece ostenit (sonraki safhada ostenit ferrit dönüşümü sonucu), ferrit bandı oluşmaktadır.



a) Dağlanmamış



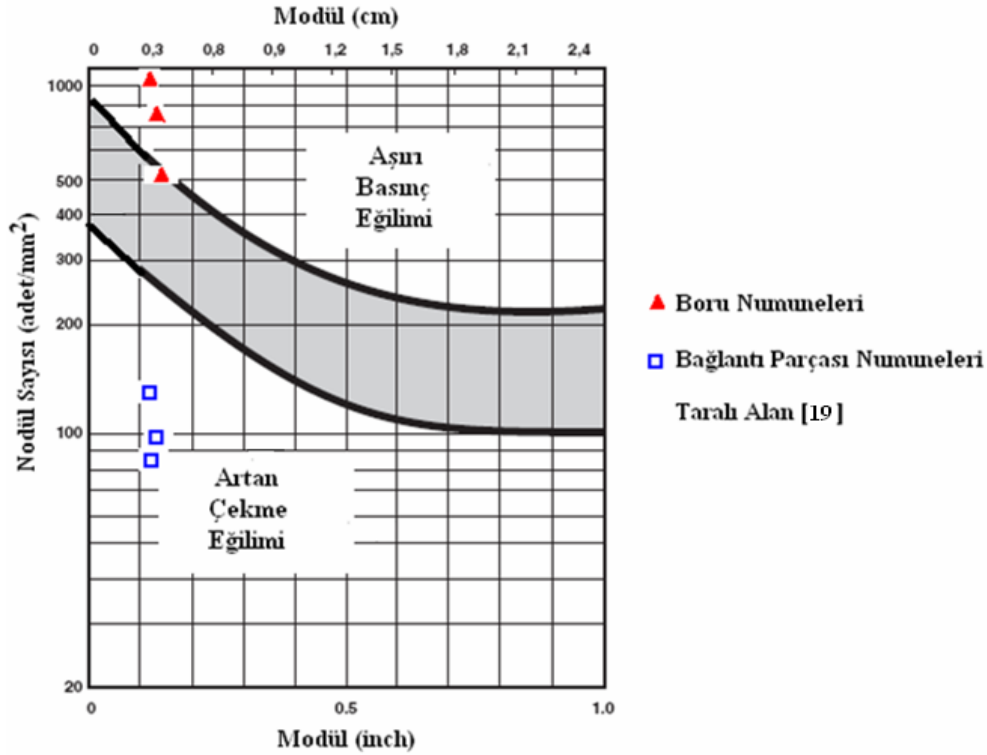
b) Dağlanmış

şekil 6.40. Düktil demir boru numunelerinin dış kısmında bulunan ferrit ve perlit tabakası

- j. şekil 6.8, 6.10 ve 6.12'de ki bağlantı parçası numune resimlerinde perlit, ferrit ve hale oluşumları görülmektedir. Aşılamanın az olduğu bağlantı parçalarında bir takım vermikular (kompakt grafit) yapılar görülmektedir. Değişen çap, değişen et kalınlığı süre ve sıcaklıklar yapısal sapmanın sebebidir.

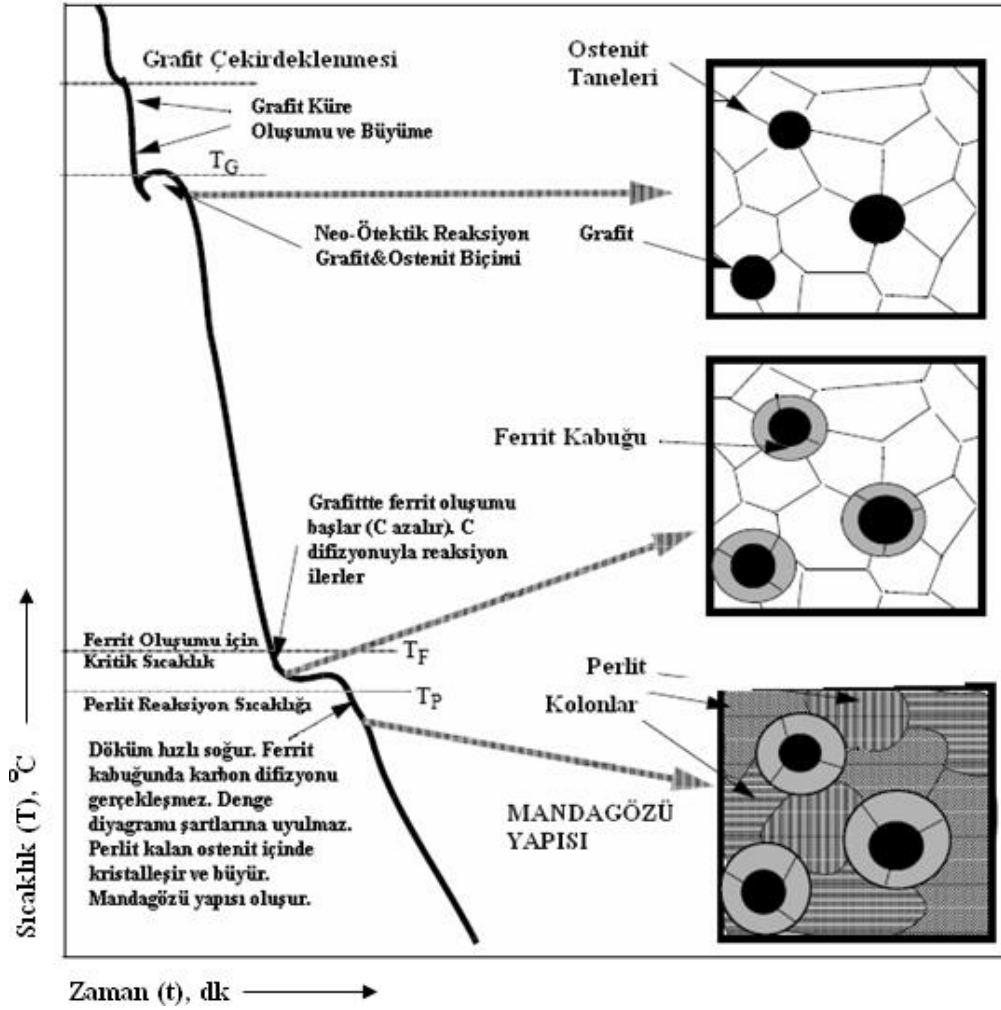
- k. Düktil demir boru ve bağlantı parçası numunelerinin mikroyapıları incelendiğinde gözeneklilik, kısmi grafit yönlenmesi ve yüzmesi, yüksek sıcaklık kırılabilirliği, boru dış yüzeyi boyunca perlit tabakası oluşumu, dros oluşumu, vermikular yapı oluşumu ve pinhol gibi çeşitli hatalara rastlanmıştır.
- l. Dökülen düktil demirlerin yüksek metalurjik özelliklere sahip olup olmadığı ise Şekil 6.41' den tespit edilebilir. Bu şekilde modüle bağlı olarak parçanın sahip olması gereken asgari küre sayısı ile azami sayı görülmektedir. Örneğin modülü 0,76 cm olan bir parça yüksek metalurjik özelliklere sahip ise asgari küre sayısı $140/\text{mm}^2$ olmalıdır. Bu parçada küre sayısı $140 - 300/\text{mm}^2$ arasında olabilir. Aynı şekilde 15 mm çapındaki bir parçada modül $15/4 = 0,375$ cm olduğundan küre sayısının $225 - 500/\text{mm}^2$ arasında kalması lazımdır. Diyagram üzerinde kalıpta aşılammış numuneler için geçerli olan eşitlik ve katılma süresi eşitliğinden modüle bağlı olarak küre sayıları saptanarak gösterilmiştir. Bu diyagram normal aşılama şartları değerlerini vermektedir. Parçadan ayrı olarak dökülen numunenin modülü en küçük parça modülüne eşit olarak alınmalıdır. Böylece karşılaştırma imkanı doğar. Numune uzunluğu çapın 5 katı olmalıdır [1].

Düktil demir boru ve bağlantı parçalarında modül et kalınlığının yarısına eşittir [19]. Hesaplanan modül değerleri 100'lük borular için 3 mm, 400'lük borular için 4,05 mm ve 600'lük borular için 4,95 mm' dir. Modül, 100'lük bağlantı parçaları için 3,6 mm, 150'lik bağlantı parçaları için 3,9 mm ve 250'lik bağlantı parçaları için 4,5 mm olarak hesaplanmıştır. Boru numune değerlerinin yüksek çıkması aşılama (kalıpta aşılama ve modifiye etme – In-mould prosesi) ve savurma döküm doğasıyla ilgilidir. Bağlantı parçası değerlerinin düşük çıkması etkisizleşme (fading) gibi birçok sebebin sonucudur. Şekil 6.17 ve 6.18'de verilen sonuçlar her iki malzeme grubu farkını açıklamaktadır.



Şekil 6.41. Düktil demirin sahip olması gereken küre sayısı ile modül arasındaki ilişki

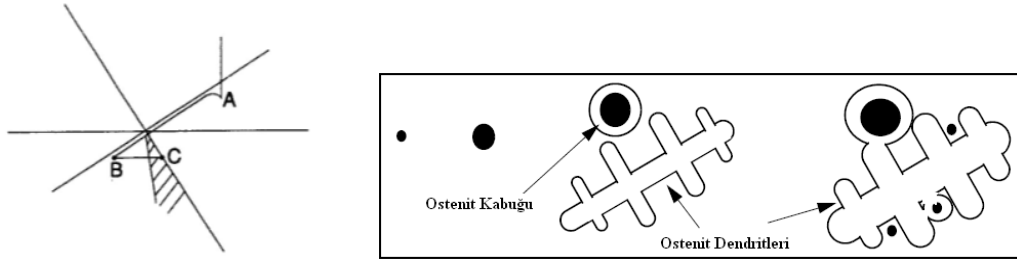
- m. γ — hale kalınlığı literatürde, bullseye structure (mandagözü yapısı) olarak adlandırılır. Tipik döküm yapısı, grafit etrafının ferrit ve daha sonra perlit ile çevrilmesi sonucu oluşan mandagözü yapısı şeklindedir. Karl B. [59], bu oluşumun açıklamasını Şekil 6.42' de verilen soğuma eğrisi üstünde yapmıştır. Burada ferrit hale ostenitten katı-katı dönüşümü sonucu oluşmaktadır. Ferrit miktarı alaşım içeriğine, nodül sayısına, döküm soğurken ferrit ve perlit dönüşümüne ve büyümesine bağlıdır.



Şekil 6.42. γ - hale (mandagözü) yapısının oluşumu [59]

Katı-katı dönüşümüne alternatif olan sıvı-katı dönüşüm mekanizması şu şekilde açıklanmaktadır. Ötektik üstü bileşime sahip dökme demirde önce primer grafit kristalleri çekirdeklenir ve büyürler (Şekil 6.43, A noktası). Büyüyen grafit önünde demir konsantrasyonu artar. Grafit etrafında γ çekirdeklenir (B noktası) ve büyüme başlar. Ostenit büyürken sıvı kompozisyon ötektik alana doğru kayar. Ostenit önünde biriken karbon yeteri yoğunluğa sahip olduğunda ötektik grafit çekirdeklenmesi ve ötektik büyüme gerçekleşir (C noktası). Primer grafitlerin γ - hale ile sarılması ve ötektiğin ondan sonra oluşması bu alışımlarda çok görülür. Bu durumda üçlü büyüme; primer grafit, γ - hale ve ötektik gelişir. Küresel grafit kristallerinin de γ - hale ile sarılması olağandır. Burada özellikle ötektiğe yakın ve ötektik kompozisyonda üçlü büyüme görülmez. Ötektik üstü kompozisyonda küresel grafit yüksek aşırı soğumada, ilk çekirdeklenmeyi takiben büyüme ile

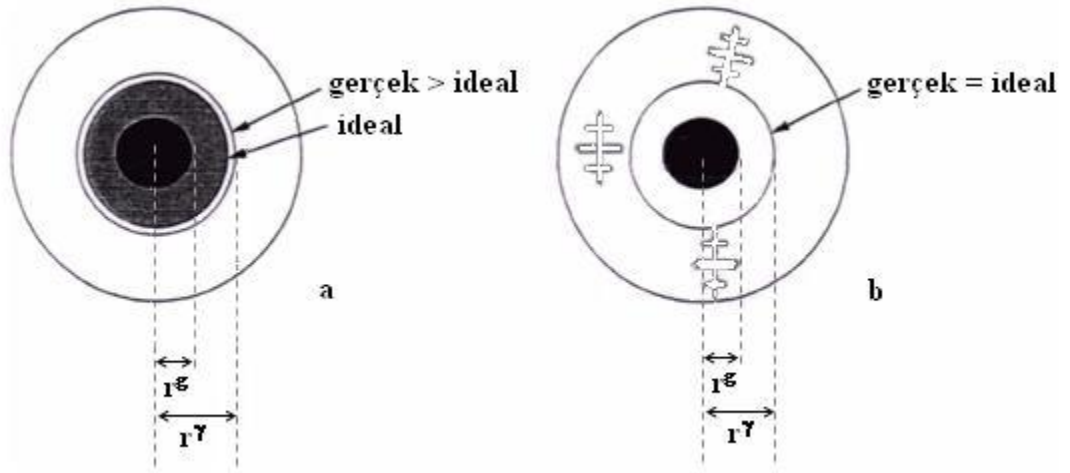
radyal yönde gelişir. Etrafındaki sıvı giderek demirce zenginleşir. Bu aşırı soğumada ve oluşan kompozisyonda γ grafitte göre daha hızlı büyür ve γ fazı grafiti tamamen sarar. γ büyümesi belirli mertebeye varduktan sonra ise ötektik büyüme yukarıda anlatıldığı gibi gelişir [1]. Bu ikinci görüş daha ikna edicidir ve mevcut çalışmada fazla ayrıntıya girilememiştir.



Şekil 6.43. Fe-C-Si alaşımlarında eşli büyüme bölgesi (ötektik bölge), ötektik üstü bileşime ($C > \%4,3$) sahip Fe-C-Si alaşımında katılaşma [1, 59]

Tez çalışmasında et kalınlığı arttıkça, γ - hale kalınlığının arttığı tespit edilmiştir (et kalınlığı 7,2 mm olan bağlantı parçalarında $16,5\mu\text{m}$, 7,8 mm olan bağlantı parçalarında $18\mu\text{m}$ ve 9 mm olan bağlantı parçalarında $26,25\mu\text{m}$ olarak ölçülmüştür). Savurma döküm düktil demir boru numunelerinde γ - hale oluşumu yoktur. Bu yapıyı kuma döküm düktil demir bağlantı parçası numunelerinde görmekteyiz.

- n. Düktil demirde ötektik katılaşma iki fazın (ostenit ve grafit) beraber büyümesi ile gerçekleşir. Büyüme sıvı faza doğrudur. İki fazın eşli büyümesi (coupled growth) dağınık olduğundan faz bileşimleri ve bileşimleri oldukça karmaşıktır. Ostenit hale önünde ve primer ostenit dendrit önünde sıvı içinde karbon toplanır ve difüzyonla dağılır. Ostenit zarfı çok kalın ise primer ostenit oluşumu yok demektir ($r^{\gamma}/r^{\text{g}} \cong 2,4$ ideal şarttır). Ötektik reaksiyon sırasında hızlı ve aşırı soğuma nedeniyle grafiti saran ostenit, dendirt şeklinde büyürler. Eğer aşırı soğuma az ise ostenit hale büyür. r^{γ}/r^{g} değeri ideal şartın altında ise dendirt uzantısı oluşmaz. Aşırı soğuma fazla ise dendrit, hale uzantısı şeklinde olduğu gibi ayrı çekirdeklenme ve büyüme ürünü olarak da gelişebilir (Şekil 6.44) [25].



Şekil 6.44. Düktil demirin katılaşması sırasında iki olasılığın gösterimi,
 a) Yavaş soğuma, γ zarf-hale idealden büyük,
 b) Hızlı soğuma, γ zarf-hale ideal boyutta ve dendirt uzantısı vermiştir [25].

Bir başka çalışmada [60], CE: 4,33 ve et kalınlığı 6 mm olan kuma döküm düktil demir plaka için $r^\gamma/r^\delta = 2,39$ olarak bulunmuştur. Bu sonucun kritik değerin altında olduğu ve dendirt uzantısının oluşmadığı saptanmıştır.

Tez çalışmasında r^γ/r^δ oranları 7,2 mm kalınlık için 1,93, 7,8 mm kalınlık için 2,04 ve 9 mm kalınlık için 2,20 mm olarak bulunmuştur. Bu sonuçlar kritik değerin altındadır ve dendirt uzantısı oluşmamıştır. Sonuçlar literatür ile uyum halindedir.

KAYNAKLAR

- [1] YILMAZ, F., İçme – atık su ve gaz dağıtım şebekelerinde dökme demirler ve düktil demir uygulamaları, İSKİ Yayınları, İstanbul, 2003
- [2] ÇAVUŞOĞLU, N.E., Döküm teknolojisi, İTÜ Kimya - Metalurji Fakültesi, İstanbul, 1992
- [3] JANCO, N., Centrifugal casting, American Foundrymen's Society Inc., Illionis 60016-8399, 1992
- [4] <http://www.mkn.itu.edu.tr/bolumler/imalat/baglanti/dokum/sd/sd.htm>, Mart 2008
- [5] <http://www.me.gatech.edu/jonathan.colton/me4210/casting.pdf>, Nisan 2008
- [6] STEFANESCU, D.M., ASM Handbook Metals Handbook, Vol.15, Casting, ASM International, Metals Park, pp. 296 – 307, Ohio, 1988
- [7] FLEMINGS, M.C., (Çev. BAŞARAN, M.), Döküm ve katılaştırma tekniği, İstanbul, İTÜ, 1976
- [8] DAVIES, G.J., Solidification and casting, Applied Science Publishers, London, 1973
- [9] STOTZE, R., Improved performance by engineered coatings, Proceedings Vol.1, pp.469 The 66th World Foundry Congress, İstanbul, 2004
- [11] İZGİZ, S., Küresel grafitli dökme demir üretimi, yolluk besleyici tasarımı, ısıl işlemi ve özellikleri, KOSGEB, Ankara, 1988
- [12] HENYCH, I., Trends in melting and magnesium treatment of ductile iron melt, The Ductile Iron Society's 1998 Keith D. Millis World Symposium on Ductile Iron, USA, 1998
- [13] MURATORE, E – C., The effect of metallic charge/melt history on nucleation potential in ductile cast irons, AFS International Inoculation Conference, USA, 1998
- [14] KNOTHE, W., Practical application of thermal analysis as an aid to strict metalurgical control, BCIRA, 1987
- [15] LABRECQUE, C., GAGNE, M., Interpretation of cooling curves of cast irons: A literature review, AFS Transactions, pp:83-90, 1998

- [16] LABRECQUE, C., GAGNE, M., Review ductile iron: Fifty years of continuous development, Canadian Metallurgical Quarterly, No.5, 1998
- [17] İZGİZ, S., Yayınlanmamış çalışma, İzmit, 2008
- [18] SPENGLER, A.F., BRIGGS, H.K., The ductile iron process, Miller and Company Service Handbook, Compendium 4, 1972
- [19] The sorelmetal book of ductile iron, the essentials of gating and risering system design, Rio Tinto & Titanium Inc, Canada, 2004
- [20] DAVIS, J.R., ASM Specialty Handbook, Cast irons, 1996
- [21] LOPER, C.R., Preconditioning effect from crystalline recarburisers and their use in safety cast components production, II Foundry Technical Forum 2005, Bilbao/Spain, 2005
- [22] BROWN, J.R., Foseco foundryman's handbook, pp:221-229, Tenth Edition, 1994
- [23] BOCKUS, S., DOBROVOLSKIS A., Peculiarity of producing ferritic ductile iron castings, Materials Science, Vol.10, No.1, Lithuania, 2004
- [24] CHOI, J.O., KIM, J.Y., CHOI, C.O., KIM, J.K., ROGATHI, P.K., Effect of rare earth element on microstructure formation and mechanical properties of thin wall ductile iron castings, Materials Science and Engineering, pp.323-333, USA, 2004
- [25] LESOULT, G., CASTRO, M., LACAZE, J., Solidification of spheroidal graphite cast irons-I. physical modelling, Acta Metallurgica Inc. Vol.46, No.3, pp.983-995, France, 1998
- [26] ARAN, A., Lamel ve küresel grafitli dökme demirlerin ısı işlemleri, İTÜ, İstanbul, 1991
- [27] EKLEM, A., Nucleation mechanisms in ductile iron, Foundry Products, Kristiansand, Norway, 2005
- [28] TRUDEL, A., GAGNE, M., Effect of composition and heat treatment parameters on the characteristics of austempered ductile irons, Canadian Metallurgical Quarterly, Vol.36, No.5, pp:289-292, Canada, 1997
- [30] ARTHUR, E.S., MARTIN, A.R., ANDREW, B.M., US Patent No 3415307, Process for casting ductile iron, New Jersey, 1968
- [30] YOSHIO, T., SUSUMU, T., AKINORI, S., US Patent No 4157111, Method of heat-treating ductile cast iron pipe, Japan, 1979
- [31] TADASHI, M., HIROMU, T., YOSHIO, T., SUSUMU T., US Patent No 3954133, Spheroidal graphite cast iron pipe of ferritic structure and method of producing the same, Japan, 1976

- [32] RIO, B., US Patent No 4448610, Centrifugally cast tube of spheroidal graphite cast-iron and its method of manufacture, PONT-A-MOUSSON S – A, France, 1984
- [33] MAKOTO, S., MITSURU, Y., YASUOKI, I., KOHKI, O., US Patent No 4619713, Method of producing nodular graphite cast iron, Japan, 1986
- [34] ANDREW, B., US Patent No 3905809, Alloy for making ductile iron, Birmingham, 1975
- [35] <http://www.sewerhistory.org/grfx/components/pipe-iron1.htm>, Şubat 2007
- [36] TS EN 545, Borular – sünek dökme demir-su hatlarında kullanılan-borular, bağlantı parçaları, aksesuarlar ve ek yerleri-özellikler ve deney metotları, 2003
- [37] ŞEN, Ö., Dökme demirlerde ısı analiz yöntemiyle yapı belirlenmesi, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2004
- [38] www.gyte.edu.tr/dersler/107/TIM624/TIM624DersNotlari/TIM%20624%2002.pdf, Eylül 2007
- [39] UNKIC, F., GAVRONOVIC, N., VASILIC M., HREN, S., Effect of silicon content on microstructures and mechanical properties of spheroidal graphite cast iron grade EN-GJS-400-18-LT, The 66th World Foundry Congress, Istanbul, 2004
- [40] BJORKGREN, L.E., HAMBERG, K., Silicon alloyed ductile iron with excellent ductility and machinability, Foundryman, p: 42 – 48, Sweden, 2001
- [41] FIDOS, H., Effect of composition and cooling rate graphite nodule morphology in S.G. Iron, AFS International Cast, USA, 1980
- [42] DONG, M.J., HU, G.K., DIBOINE, A., MOULIN, D., Damage modelling in nodular cast iron, Journal De Pysique IV, Vol. 3, pp.643–648, France, 1993
- [43] KARSAY, I.S., Ductile iron I., Pruduction Quebec Iron and Titanium Co, Canada, 1976
- [44] LOPER, C.R., HEINE, R., ROSENTHAL, R.C., Principles of metals casting, Mc Graw Hill Book Co, New York, 1967
- [45] AFS Publication, Foundrymen’s guide to ductile iron microstructures, USA, 1984
- [46] BURNS, T.A., Foundryman’s Handbook, Foseco Limited, 9. Edition, London, 1994
- [47] TEKİN, E., Demir alaşımların uygulamalı optik metalografisi, Segem Yayını, Ankara, 1982

- [48] KAYALI, E.S., ENSARİ, C., DİKEÇ, F., Metalik malzemelerin mekanik deneyleri, İTÜ, İstanbul, 1983
- [49] MC SWAIN, R.H., BATES, C.E., Giesserei, Vol.64, No.15, pp.411-412, Hamburg, 1977
- [50] BULLOCH, H.J., Effect of temperature on the threshold fatigue crack growth behaviour of spheroidal graphite cast, Int. J. Pres. Ves. And Piping, vol.54, pp: 497–522, England, 1993
- [51] SHIMIZU, K., NOGUCHI, T., KAMADA, T., TAKASAKI, H., Progress of erosive wear in spheroidal graphite cast iron, Wear, vol.198. pp.150-155, Japan, 1999
- [52] BORTON, R., S.G. Iron, possible structural defects and their prevention, Foundry Trade Journal, vol.155, p.40-63, USA, 1983
- [53] ERSÜMER, A., Demir döküm, İTÜ, İstanbul, 1980
- [54] CEVHER, Ö., Dökme demirlerde sert faz oluşumunun önlenmesi ve giderilmesi, Yüksek Lisans Tezi, SAÜ, Sakarya, 2006
- [55] MAKAR, J.M., DESNOYERS, R., MC DONALD, S.E., Failure modes and mechanisms in gray cast iron pipes, Presented at Underground Infrastructure Research 2001 Waterloo, Ontario, 2001
- [56] ALAGARSAMY, A., Influence of section size microstructure and mechanical properties, Grede Foundries, Milwaukee, 1999
- [57] JAVAID, A., DAVIS, K.G., “Evaluation of microstructural factors affecting the mechanical properties of thin-wall ductile iron castings”, Microscopy Society of America, 2002
- [58] Ductile iron data for design engineers, Rio Tinto & Titanium Inc, Montreal, 1988
- [59] KARL, B.R., Metal casting, Dept. of materials science and engineering Michigan Tech. University, Reference book for MY4130, 1999
- [60] CEVHER, Ö., YILMAZ, F., İnce kesitli düktil demirlerin mikroyapı ve mekanik özellikleri, Türkcast Dergisi, Sayı:10, sf:38 – 41, TUDOKSAD, İstanbul, Mart 2009

ÖZGEÇMİŞ

1981 Sakarya-Sapanca doğumlu olan Mustafa BAYRAKTAR, ilk ve orta öğretimini Sapanca’ da tamamlamıştır. Sakarya Üniversitesinden 2001 yılında Makine teknikeri, 2006 yılında Metalurji ve Malzeme Mühendisi unvanlarını almıştır. SAÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümünde Yüksek Lisans eğitime devam eden Mustafa BAYRAKTAR, 2006 yılından bu güne İstanbul Su ve Kanalizasyon İdaresi (İSKİ) Genel Müdürlüğü’nde Satınalma Mühendisi olarak görev yapmaktadır.