

BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ❖ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİR MALZEMELERİN TAHRİBATSIZ
ULTRASONİK MUAYENE YÖNTEMİ İLE KÜRESELLİK ÖZELLİĞİNİN
İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Eren YALÇINDAĞ

İleri Teknolojiler Anabilim Dalı

Malzeme Bilimi ve Mühendisliği

AĞUSTOS 2019

BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ❖ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİR MALZEMELERİN TAHRİBATSIZ
ULTRASONİK MUAYENE YÖNTEMİ İLE KÜRESELLİK ÖZELLİĞİNİN
İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Eren YALÇINDAĞ
(161080306)**

İleri Teknolojiler Anabilim Dalı

Malzeme Bilimi ve Mühendisliği

Tez Danışmanı: Dr. Öğretim Üyesi İbrahim KÜÇÜK

AĞUSTOS 2019

BTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 161080306 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Eren YALÇINDAĞ, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “Küresel Grafitli Dökme Demir Malzemelerin Tahribatsız Ultrasonik Muayene Yöntemi ile Küresellik Özelliğinin İncelenmesi” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Dr. Öğretim Üyesi İsrail KÜÇÜK**
Bursa Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Dr. Öğr. Üyesi Yakup YÜREKTÜRK**
Bursa Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Burak BİROL
Yıldız Teknik Üniversitesi

Savunma Tarihi : 06 Ağustos 2019

FBE Müdürü : **Doç. Dr. Murat ERTAŞ**
Bursa Teknik Üniversitesi

.....
...../...../.....

İNTİHAL BEYANI

Bu tezde görsel, işitsel ve yazılı biçimde sunulan tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uyularak tarafımdan elde edildiğini, tez içinde yer alan ancak bu çalışmaya özgü olmayan tüm sonuç ve bilgileri tezde kaynak göstererek belgelediğimi, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim.

Eren YALÇINDAĞ

İmzası :



Çalışmada emeği geçen herkese,

ÖNSÖZ

Yüksek lisans çalışmalarının sonucu olan bu tez çalışmasında maddi, manevi desteklerini esirgemeyen, üst düzey bir sabır gösteren, her zaman farklı bakış açılarıyla çalışmaya bakmamı sağlayan, ufkumu genişleten sayın kıymetli danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi İsrail KÜÇÜK'e teşekkür ve saygılarımı sunarım.

Bu geniş çalışmanın diğer bir kısmı üzerinde çalışan ve birlikte çalışarak güzel şeyler üretilebileceğimizi öğrendiğimiz arkadaşım yüksek lisans öğrencisi Erdem FERİK'e destekleri için teşekkür ederim.

Ayrıca BAP kapsamında 190Y006 nolu projeyle desteklenen bu çalışma için kurumumuz Bursa Teknik Üniversitesi (BTÜ) Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğüne de teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmanın uygulama kısmında yardımlarını esirgemeyen, teknik yöntem ve cihaz konusunda bütün imkanları sağlayan ve tez çalışması devam ederken benim de bir çalışanı olduğum TMMOB Makine Mühendisleri Odası Kaynak Eğitim ve Muayene Merkezi'nden Sayın Dr. Ersan GÖNÜL'e ve Sayın Burak BAYRAKTAROĞLU'na da teşekkürü borç bilirim.

Son olarak yüksek lisans tez çalışmamda numunleri tedarik ederek ve her türlü maddi desteği sağlayarak bu çalışmanın gerçekleşmesini sağlayan en büyük aktörlerden biri olan DÖKTAŞ A.Ş döküm fabrikası Ar-Ge müdürü sayın Bülent ŞİRİN'e ve laboratuvar sorumlusu Erkan BULUT'a da özel olarak saygılarımı ve teşekkürlerimi sunarım.

Ağustos 2019

Eren YALÇINDAĞ

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	v
İÇİNDEKİLER	vi
KISALTMALAR.....	viii
SEMBOLLER	ix
ÇİZELGE LİSTESİ.....	x
ŞEKİL LİSTESİ.....	xi
ÖZET	xii
SUMMARY	xiv
1. GİRİŞ	16
1.1 Tezin Amacı	17
1.2 Dökme Demirler.....	17
1.2.1 Döküm tarihçesi	17
1.2.2 Döküm yöntemleri	17
1.2.2.1 Kum kalıba döküm.....	18
1.2.2.2 Kokil kalıba döküm (metal kalıp)	19
1.2.3 Ergitme yöntemleri	20
1.2.3.1 Elektrik ark ocağı	20
1.2.3.2 İndüksiyon ergitme.....	20
1.2.3.3 Kupola ergitmesi	21
1.2.4 Dökme demir türleri.....	22
1.2.4.1 Gri dökme demir	22
1.2.4.2 Beyaz dökme demir.....	23
1.2.4.3 Dövülebilir dökme demir	24
1.2.4.4 Küresel grafitli dökme demir	24
1.2.4.5 Vermiküler grafitli dökme demir	25
1.3 Küresel Grafitli Dökme Demirler.....	25
1.3.1 Tarihçe	25
1.3.2 Üretim yöntemi	26
1.3.2.1 MG treatmentı	26
1.3.2.2 Aşılama	27
1.3.3 Küreselliğe etki eden faktörler	28
1.3.3.1 Grafit miktarı.....	28
1.3.3.2 Matris yapısı.....	28
1.3.3.3 Kesit boyutu	28

1.3.3.4 Kompozisyon	29
1.3.4 KGDD türleri	29
1.3.4.1 ADI Östemtemperlenmiş Sünek Demir	29
1.3.4.2 Alaşımli küresel grafitli dökme demirler	29
1.3.5 Küresel grafitli dökme demirlerde döküm hataları	30
1.3.5.1 Çekinti oluşumu	30
1.3.5.2 Grafit flotasyonu	30
1.3.5.3 Patlak grafitler	31
1.4 Dökümlerde Kullanılan Tahratsız Muayene Yöntemleri	32
1.4.1 Radyografik muayene	32
1.4.2 Sıvı penetrant muayenesi	32
1.4.3 Gözle muayene	33
1.4.4 Girdap akımları muayenesi (Eddy currents)	34
1.4.5 Manyetik parçacık muayenesi	35
1.4.6 Ultrasonik muayene	36
1.4.6.1 Temel ekipmanlar	37
1.4.6.2 Ultrasonik muayenenin avantajları ve dezavantajları	38
1.4.6.3 UT Uygulamaları	39
1.5 Darbe-yankı yöntemi	41
1.5.1 Darbe-yankı yöntemlerinin ilkeleri	42
1.5.1.1 Dönüştürücü elementler	43
1.5.1.2 Piezoelektrik dönüştürücüler	43
1.5.1.3 Temas sıvıları	44
1.6 Küresel Grafitli Dökme Demirlerde UT Muayene Uygulamaları	45
1.6.1 Yüzeyaltı hataların tespit edilmesi	45
1.6.2 İç hataların tespit edilmesi	45
1.6.3 Yapısal değerlendirme	46
1.6.4 Grafit yapısının doğrulanması	47
1.7 Literatürde Gerçekleştirilmiş Çalışmalar	47
2. MATERYAL VE YÖNTEM	49
2.1 Darbe-Yankı Yöntemi ile Kalınlık Ölçümü ve Ses Hızlarının Hesaplanması ..	49
2.1.1 Deney numuneleri	49
2.1.2 Deney ekipmanları	51
2.1.2.1 Ölçüm cihazı ve dönüştürücü	51
Yakın alan etkisi :	51
2.1.2.2 Kalibrasyon bloğu	52
2.1.3 Deneyin yapılışı	52
3. BULGULAR VE TARTIŞMA	54
3.1 Ölçüm Sonuçları	54
3.2 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve Enerji Dağılımı Spektrometrisi (EDS) Sonuçları	56
3.2.1 Taramalı elektron mikroskobu (SEM) sonuçları	56
3.2.2 Enerji Dağılım Spektrometrisi (EDS) sonuçları	58
4. SONUÇLAR	61
KAYNAKLAR	63
ÖZGEÇMİŞ	65

KISALTMALAR

EDS	: Enerji Dağılım Spektrometresi
EMA	: Elektromanyetik Akustik
KGDD	: Küresel Grafitli Dökme Demir
LPI	: Sıvı Penetrant Muayenesi
MPI	: Manyetik Parçacık Muayenesi
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
UT	: Ultrasonik Muayene



SEMBOLLER

V_1	: Boyuna dalga hızı
E	: Elastisite modülü
ρ	: Yoğunluk, kg/m ³
μ	: Poisson' oranı
c_{mp}	: Numune ses hızı
c_{kal}	: Kalibrasyon bloğu ses hızı
T_{mp}	: Numune kalınlığı
T_{kal}	: Ölçülen kalınlık



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1 : ASTM E494 standartına göre malzemelerin ses hızları	46
Çizelge 2.1 : Küresel grafitli dökme demir numunelerinin kimyasal bileşimi [31]... 50	
Çizelge 2.2 : Küresel grafitli dökme demir numunelerinin mekanik özellikleri[31]. 51	
Çizelge 3.1 : Küresel grafitli dökme demir numunelerinin ses hızları	54
Çizelge 3.2 : Kalibrasyon bloğu ve küresel grafitli olmayan dökme demirin ses hızlarının karşılaştırılması.....	55
Çizelge 3.3 : 23 küresel grafitli dökme demir numunesi içerisinde rastgele seçilen 7 küresel grafitli dökme demir numunesinin EDS analizleri	58

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Kum kalıba döküm uygulama adımları	18
Şekil 1.2 : Sıcak odalı döküm sistemi	19
Şekil 1.3 : Soğuk odalı döküm sistemi.....	20
Şekil 1.4 : Gri dökme demir mikroyapı görüntüleri (Sınıf 1-4).....	23
Şekil 1.5 : Küresel grafitli dökme demir mikroyapı görüntüsü (%100 Küresellik)...	25
Şekil 1.6 : Mg tretmanı düzeneği, (a) Mg eklenmesi, (b) Mg tretmanı yapılması.....	27
Şekil 1.7 : Çekinti oluşumu kesit görüntüsü	30
Şekil 1.8 : Grafit flotasyonu mikroyapı görüntüsü.....	31
Şekil 1.9 : Patlak grafit mikroyapı görüntüsü	31
Şekil 1.10 : Sıvı penetrant muayenesi uygulama adımları.....	33
Şekil 1.11 : Manyetik parçacık muayene çalışması	36
Şekil 1.12 : Darbe-yankı yönteminin çalışma prensibi	42
Şekil 1.13 : Deneyde kullanılan piezoelektrik dönüştürücü.....	44
Şekil 2.1 : Kullanılan kalibrasyon bloğu.....	52
Şekil 2.2 : Kalibrasyon işleminin yapılışı	53
Şekil 2.3 : Numunelerin kalınlık ölçümlerinin yapılması	53
Şekil 3.1 : Küresel grafitli dökme demir numunelerinin ses hızları değişimi.....	Hata!
Yer işareti tanımlanmamış.	
Şekil 3.2 : Ses hızı değişimlerini gösteren grafik.(Numune 1: %90,06, Numune 13: %69,66 ve Numune 9: 28,05 küresellik oranına sahip)	55
Şekil 3.3 : Çalışma kapsamında optik mikroskoplarla analizi yapılan 23 numune içerisinde rastgele seçilmiş 7 küresel grafitli dökme demir numunesi	56
Şekil 3.4 : Numune 1 (5781 m/s) için alınmış SEM görüntüleri a) x100 büyütme b) x1000 büyütme.....	56
Şekil 3.5 : Numune 2 (5751 m/s) için alınmış SEM görüntüleri a) x100 büyütme b) x1000 büyütme.....	57
Şekil 3.6 : Numune 4 (5691 m/s) için alınmış SEM görüntüleri a) x100 büyütme b) x1000 büyütme.....	57
Şekil 3.7 : Numune 11 (5725 m/s) için alınmış SEM görüntüleri a) x100 büyütme b) x1000 büyütme.....	57
Şekil 3.8 : Numune 15 (5770 m/s) için alınmış SEM görüntüleri a) x100 büyütme b) x1000 büyütme.....	57
Şekil 3.9 : Numune 18 (5673 m/s) için alınmış SEM görüntüleri a) x100 büyütme b) x1000 büyütme.....	58
Şekil 3.10 : Numune 23 (5740 m/s) için alınmış SEM görüntüleri a) x100 büyütme b) x1000 büyütme.....	58

KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİR MALZEMELERİN TAHRİBATSIZ ULTRASONİK MUAYENE YÖNTEMİ İLE KÜRESELLİK ÖZELLİĞİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

Küresel grafitli dökme demirler (KGDD), son yıllarda dökme demirler ailesinin en çok kullanılan üyelerinden biri olmuştur. KGDD'ler gri ve beyaz dökme demirler gibi geleneksel dökme demirlerin, istenilen özellikleri karşılayamadığı durumlarda devreye girmiş ve ihtiyacı karşılamıştır. Yıllık üretim miktarı artarken yanında başka ihtiyaçlar da ortaya çıkmıştır. Bunlardan biri küresel grafitli dökme demirlerin üretim kalitesinin belirlenmesidir. Küresel grafitli dökme demirlerin üretim kalitesindeki parametrelerden biri de aynı zamanda bu çalışmanın da konusu olan küresellik oranıdır. KGDD'lerin üretiminde önemli bir özellik olan küresellik değerlerinin yüksek oranlarda olması ürünün kabul edilmesi için en önemli kriterdir. Dökümhanelerde KGDD'lerin mikroyapıları mikroskopla incelenerek, küresellik oranları yüzdesel olarak belirlenir. Belli bir değer altında kalan numuneler reddedilir. Bu çalışmada bu kalite kontrol yöntemine alternatif olarak, tahribatsız ultrasonik muayene yöntemiyle KGDD küreselliklerinin karakterizasyonu amaçlanmıştır. Küresellik oranlarının belirlenmesinde malzemelerin metalürjik özelliklerinden biri olan ses hızı değerlerinden yararlanılmıştır. Ses hızları farklı malzemelerde farklı değerlere sahiptir. Bu hız ultrasonik ses dalgalarının malzeme içerisinde ilerlediği hızdır ve malzeme iç yapısına bağlıdır. Ultrasonik muayene yöntemlerinden biri olan darbe-yankı metodu bu çalışmada ses hızlarının tespitinde kullanıldı. Küresel grafitli dökme demir numuneleri hali hazırda üretimi yapılan dökme demirlerden elde edildi. Bu nedenle farklı kalınlıklara sahip numuneler üzerinden ölçüm alındı. Kısaca, 1018 karbon çeliğinden imal edilmiş kalibrasyon bloğunda kalibre edilmiş ultrasonik ölçüm cihazıyla KGDD numunelerinin kalınlık ölçümü yapılmıştır. Ultrasonik cihazla ölçülen kalınlık değerleri numunelerin gerçek kalınlıklarından farklı çıkmıştır. Kalibrasyon bloğunun ses hızı, ölçülen kalınlık ve gerçek kalınlık değerleri kullanılarak, dökme demir numunelerinin ses hızları hesaplandı. Ölçülen değer ve gerçek kalınlık değeri arasındaki fark ne kadar büyükse küresellik oranları da o yönde düşüş gösterdi. Ölçülen ses hızlarıyla, numunelerin bilgisayar destekli görüntü işleme yazılımlarıyla belirlenen küresellik oranları karşılaştırılmıştır. Ek olarak küresel grafitli olmayan bir dökme demir numunesinden de ses hızı ölçümü alındı. 1018 karbon çeliği kalibrasyon bloğunun, KGDD numunelerinin ve küresel olmayan dökme demirin ses hızları da karşılaştırıldı. Bu karşılaştırmalarda numunelerin ses hızlarıyla küresellik oranları arasındaki ilişki değerlendirilmiş olup uç noktadaki küresellik oranları arasında (yüksek ve çok düşük yüzdeye sahip olanlar) ses hızı farklılıkları görüldü. Çalışmanın sonucunda yüksek ses hızına sahip numunelerin yüksek küresellik oranlarına sahip olduğu sonucuna varıldı. Ek olarak numunelerin mikroyapılarını yakından incelemek için taramalı elektron mikroskopu (SEM) kullanıldı ve numune yüzeyindeki elementlerin yüzdece ağırlıklarını bulmak için enerji dağılım spektroskopisi (EDS) yöntemi kullanıldı.

Anahtar kelimeler: Küresel grafitli dökme demir, ultrasonik muayene, ses hızı, darbe-yankı yöntemi, küresellik.



NODULARITY CHARACTERIZATION OF SPHEROIDAL GRAPHITE CAST IRONS BY NONDESTRUCTIVE ULTRASONIC METHOD

SUMMARY

Spheroidal graphite cast iron has become one of the most used members of the cast iron family in recent years. KGDDs have come into play when conventional cast irons such as gray and white cast irons cannot meet the required specifications. While the annual production amount has increased, other needs have also emerged. One of these is the determination of the production quality of spheroidal graphite cast iron. One of the parameters in the production quality of spheroidal graphite cast iron is the nodularity rate which is also the subject of this study. High rates of nodularity, which is an important feature in the production of KGDDs, is the most important criterion for product acceptance. In foundries, microstructure of KGDDs is examined by microscope and nodularity ratios are determined as a percentage. Samples below a certain value are rejected. In this study, as an alternative to this quality control method, it was aimed to characterize KGDD nodularity by using non-destructive ultrasonic inspection method. Sound velocity, which is one of the specific metallurgical properties of the materials, were investigated to determine the nodularity ratios. This velocity is the speed at which ultrasonic sound waves travel through the material and depends on the material microstructure. One of the ultrasonic inspection methods, pulse-echo method, was used to determine the sound velocities in this study. Samples of spheroidal graphite cast iron were obtained from the cast iron already in mass production process. Therefore, measurements were taken on samples of different thicknesses. Briefly, the thickness of KGDD samples was measured with an ultrasonic measuring device calibrated in a calibration block made of 1018 carbon steel. The thickness values measured by the ultrasonic device were different from the actual thickness of the samples. The sound velocity of the cast iron samples was calculated using the sound velocity of the calibration block, measured thickness and actual thickness values. The larger the difference between the measured thickness value and the actual thickness value, the more the nodularity rate reduced. The measured sound velocities were compared with the nodularity ratios obtained from the manufacturer of the samples, as well as the nodularity ratios determined by computer-aided image processing softwares. In addition, sound velocity measurement was taken from a non-spheroidal graphite cast iron sample. The sound velocities of the 1018 carbon steel calibration block, KGDD samples and non-spherical cast iron were also compared. In these comparisons, the relationship between the sound velocities of the samples and the sphericity ratios was evaluated and the differences in the velocity of sound between the extreme nodularity ratios (those with high and very low percentages) were observed. Because of the study, it was concluded that samples with high sound velocity had high nodularity ratios. In addition, scanning electron microscopy (SEM) was used to closely examine the microstructures of the samples and energy distribution spectroscopy (EDS) method was used to find the percentage weights of the elements on the sample surface.

Keywords: Spheroidal graphite cast iron, ultrasonic inspection, sound velocity, pulse - echo method, nodularity.



1. GİRİŞ

Küresel grafitli dökme demirler (KGDD) üretimi gün geçtikçe yaygınlaşan ve özellikle otomotiv sanayinde ihtiyaçları karşılayan bir dökme demir türü olmuştur. Sunduğu cazip özellikler sayesinde dökme demirler arasındaki yerini sağlamlaştırmıştır [1-4]. Artan talep ve üretim hacimleri nedeniyle, bu malzemelerin kalite kontrolü de önemli hale gelmiştir. Mevcut kalite kontrol yöntemlerinin içeriğinde, döküm sırasında küçük bir kalıpla alınan numunenin mikroskop altında incelenerek gözle yapılan referans karşılaştırılması veya mikroyapı görüntü analizi yöntemleri ile incelenmesi bulunur [5]. Bu yöntemler tahribatlı test yöntemleri kapsamında değerlendirilebilir. Standarta göre geçerli olsa da bu yöntemlerin de yetersiz kalacağı bazı durumlar vardır. Örneğin kritik güvenlik elemanı olacak döküm parçaların kalite kontrolü ve karakterizasyonunda tahribaatsız yöntemlere yönelim gerekmektedir. Ayrıca numune almanın mümkün olmadığı, kontrolün son ürün üzerinden yapılması gereken durumlarda da tahribatsız muayeneler devreye girmektedir. Tahribatsız muayene yöntemleri arasında ise yaygın olarak ultrasonik muayene yöntemi tercih edilmektedir. Küresel grafitli dökme demirlerin kalite kontrolünde en önemli parametrelerden biri olan küresellik oranları bu yöntemlerle ile tayin edilebilmektedir. Ultrasonik yöntemle küresellik değerlendirmesi için ses dalgalarının malzemenin içerisindeki ilerleme hızları ölçümü yapılır. Ses hızları malzemeler için spesifik bir değer olduğundan malzeme mikroyapısı ile ilgili değerlendirmeler yapmak mümkün olmaktadır [6]. İnce taneli ve homojen mikroyapılarda ses hızları yüksek, iri taneli ve homojen olmayan mikroyapılarda ses hızları düşük çıkması beklenmektedir. Mikroyapı-ses hızı arasında kurulabilecek bir ilişki aynı şekilde malzemenin elastisite modülü hakkında da bilgi verebilecektir. Geleneksel gri dökme demirlerde mevcut olan lamel (pul) grafit şekilleri malzeme içine gönderilen ses dalgaları için yansıtıcı bir yüzey olacak ve ses dalgaları malzeme içerisinden çıkmadan önce bir çok defa yansıma yapacak ve aldığı yol gittikçe artacaktır. Bu da ses hızının düşmesine neden olmaktadır. Bu davranışa göre yapısında küresel grafitler bulunduran KGDD'lerde ses dalgaları daha az yansıma yaparak ilerleyecektir.

1.1 Tezin Amacı

Bu tezin amacı özellikle otomotiv sanayiinde kullanılan küresel grafitli dökme demir malzemelerin küresellik özelliklerinin tahribatsız olarak ultrasonik muayene yöntemiyle incelenmesidir. Mikroskop ile yapılan tahribatlı ve zaman zaman subjektif olan küresellik tayinine alternatif olarak öne çıkması beklenen ultrasonik muayene yönteminin uygulanabilirliği üzerine çalışılacaktır. Yöntemin düşük maliyeti ve uygulama pratikliği incelenecektir. Darbe-yankı (pulse-echo) yöntemiyle uygulama yapılacaktır. Ölçümü yapılan ses hızları ilgili malzeme standartına göre değerlendirecek ve numuneler için küresellik-ses hızı karşılaştırmaları yapılacaktır. Ayrıca numunelerin mikroyapılarının daha iyi anlaşılması için taramalı elektron mikroskopuyla (SEM) inceleme yapılacaktır. Malzemelerin kimyasal bileşimlerinin de ağırlıkça oranlarının tayini için de enerji dağılım spektrometrisi (EDS) yapılacaktır. Çalışmanın sonunda tahribatsız ultrasonik muayene yöntemiyle küresellik incelemesinde kullanılabilirliği değerlendirilecektir.

1.2 Dökme Demirler

1.2.1 Döküm tarihçesi

Ergimiş metallerin kalıplar ile şekillendirilmesi işlemi medeniyetin ilk zamanlarına kadar takip edilebilir. İlk insanlar kil gibi şekil verilebilen malzemelerin varlığını keşfedip onu şekillendirerek farklı eşyalara dönüştürmüşlerdir. Bu eşyalardan biri de ergimiş metalin dökülebileceği kadar dayanıklı kalıplardı. Metal dökümünün yapıldığı ilk kalıplarda kil kullanılmıştır. İlk kalıplar tek parça halindeydi ve üstü açık halde döküm yapılıyordu. Bu döküm parçalar daha sonra çekiçlerle dövülerek şekillendirilebiliyordu. Daha sonra iki parçalı kalıplar kullanılmış ve bitmiş ürüne daha yakın döküm parçalar elde edilmiştir. Balta ve ok uçları gibi ilkel silah parçaları bu yöntemlerle üretilmeye başlamıştır [7].

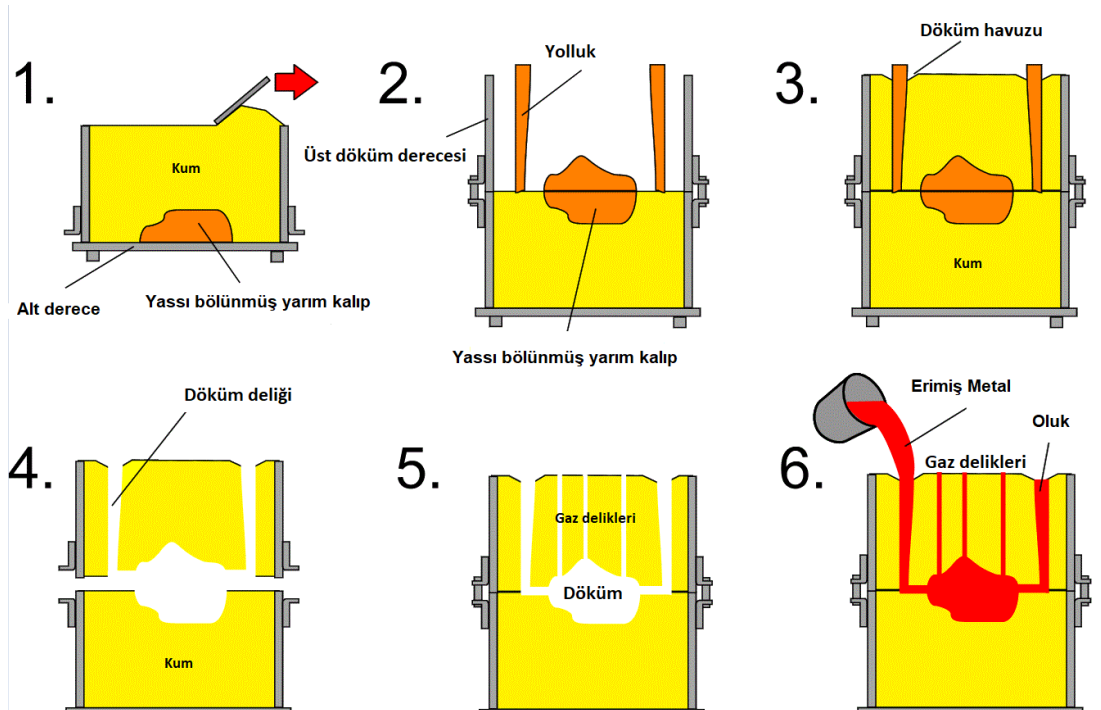
1.2.2 Döküm yöntemleri

İnsan, yaratıcılığı ve ustalığı sayesinde günümüze kadar birçok döküm yöntemi geliştirilmiştir. Kum kalıba döküm, kokil kalıba döküm ve savurma döküm bu yöntemlerdendir. Türkiye de kum kalıba döküm geniş bir alan kaplamaktadır. Bunun

nedenlerinden bazıları; düşük kalıplama maliyeti, üretim esnekliği ve yeniden kullanılabilirliktir.

1.2.2.1 Kum kalıba döküm

Kum kalıba döküm, yaygın olarak kullanılan döküm yöntemlerinden biridir. Yöntem, erimiş metalin kum kalıplara dökülmesiyle gerçekleşir. Bu yöntemle neredeyse her alaşımın dökümü yapılabilir. Kum kalıp için düşük termal genişleme katsayısına sahip kumlar kullanılır. Silis kumu en yaygın kullanılan kumdur. Silis kumu uygun kimyasal özellikleri, düşük maliyeti ve temin edilmesinin nispeten kolay olan bir kum türüdür. Fakat kum tek başına kalıp oluşturmak için yeterli değildir, kum, kömür tozu, su ve çeşitli bağlayıcılar kullanılarak karışım oluşturulur. Kum karışımı derece diye adlandırılan metal çerçeveler içerisinde preslenir. Dökümü yapılacak parçanın modeli kullanılarak, kalıbın şekillendirilmesi tamamlanır. Yatay veya dikey olarak döküm yapılabilir. Kum kalıba döküm yöntemi genellikle, takım tezgâhı kaideleri ve bileşenleri, yapısal parçalar, büyük gövdeler, motor blokları, aktarma organları, bağlantı çubukları ve boyutlarından dolayı başka yöntemlerle dökümü yapılamayan büyük parçalar için kullanılır. Geniş bir yelpazede döküm yapılabilmesine karşın döküm parçalarda boyut toleransları yüksektir. Bu nedenle ek olarak yüzey işleme operasyonlarına ihtiyaç duyulmaktadır.



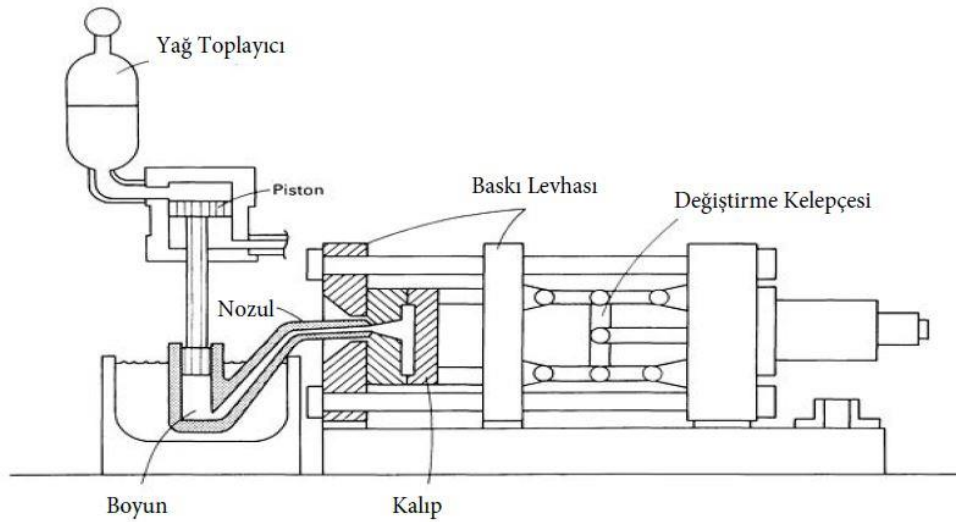
Şekil 1.1 : Kum kalıba döküm uygulama adımları

Bu yöntemim avantajlarının yanında üretim kalitesi yönünden eksiklikleri de vardır. Gaz boşlukları, çekinti oluşumları, kum kalıntıları gibi döküm hatalarıyla karşılaşabilir. Bu hataların giderilmesi içinde gerekli önlemler alınmalıdır [7].

1.2.2.2 Kokil kalıba döküm (metal kalıp)

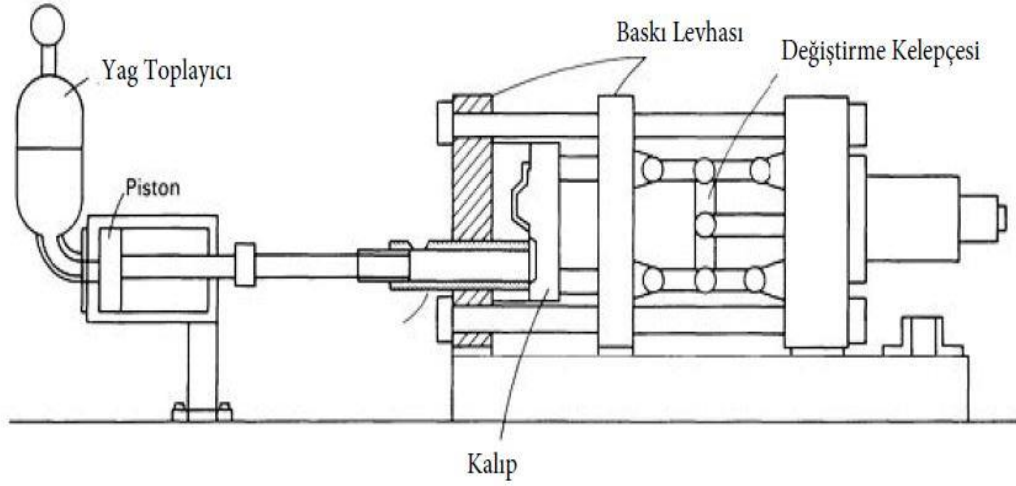
Kokil kalıba dökümde, kum kalıba döküm yönteminden farklı olarak metal kalıplar kullanılır. Metal kalıba döküm ergimiş metalin basınç altında kalıba enjekte edildiği bir işlemdir. Ergimiş metal soğuyarak katılaşır ve kalıbın şeklini alır. Parça geometrisi ne kadar ayrıntılı olursa, kalıp maliyeti de o kadar yüksek olur. Kalıp döküm işlemi bir fırın, kalıp döküm makinesi ve kalıp kullanımını içermektedir. Metal olarak demir dışı alaşımlar, çinko, alüminyum, magnezyum ve bakır yaygın olarak kullanılır. Buna ek olarak kurşun, kalay ve demir alaşımları da dökülebilir.

Döküm yöntemi olarak da iki ana tip kullanılır: Sıcak oda ve soğuk oda prosesleri. Sıcak odalı bir sistemde, enjeksiyon mekanizması ergimiş metal batırılmıştır. Piston ergimiş metale batırıldığı için yalnızca çinko, kalay ve kurşun gibi enjeksiyon sistemine mekanik ve kimyasal olarak zarar vermeyen alaşımların dökümünde kullanılır. Alüminyum ve bakır alaşımları sıcak odalı sisteme uygun değildir [7].



Şekil 1.2 : Sıcak odalı döküm sistemi

Soğuk odalı sistemde, ayrı bir fırında ergitilmiş metal kalıp kapatıldıktan sonra soğuk oda kasasına yerleştirilir. Ergimiş metal daha sonra kalıba enjekte edilir ve katılaştıktan sonra parça kalıptan sökülür. Bu iki genel yöntem dışında silindirik boşluklu parçalar için santrifüj döküm yöntemi ve hassas parçalar için hassas döküm yöntemleri de vardır.



Şekil 1.3 : Soğuk odalı döküm sistemi

1.2.3 Ergitme yöntemleri

1.2.3.1 Elektrik ark ocağı

Elektrik ark ocağı 20. yüzyılın başında bir üretim aracı olarak ortaya çıkmıştır. Bu ilkel fırınlar 910- 15,000 kg (1- 15 ton) kapasiteye sahipti. Günümüzde, elektrik ark ocağı, dökümhaneler ve çelik fabrikaları tarafından kullanılan birincil ergitme araçlarından biri olarak kabul edilmektedir. Elektrik ark ocakları, dubleks işlemlerde eriticiler ve tutucular olarak aynı zamanda eritme ve arıtma üniteleri olarak kullanılır.

1.2.3.2 İndüksiyon ergitme

Çekirdeksiz endüksiyon fırınında, eritilecek metali içeren refrakter pota etrafını saran bir bakır bobin içinden alternatif bir akım geçirilir. Bobindeki akım, bir trafodaki primer olarak görev yapar ve transformatörün sekonderi olan yükte girdap akımlarını indükler. Bir ton demirin oda sıcaklığından 1538 ° C'ye ısıtılması için yaklaşık 430 kWh enerji gerekir. Bu, enerji girişinin yaklaşık %75'ini temsil eder, geri kalanı, sıvı metal hazırlama soğutma suyu ve radyasyon yoluyla kaybolur. Eriyikte üretilen türbülans, fırın gücüyle orantılıdır ve frekansın karekökü ile ters orantılıdır. Bu, belirli bir fırında belirli bir frekans boyutuna uygulanabilecek güç miktarına bir üst sınır uygular. Örneğin, ana frekansta bir ton fırın kapasitesi için 200-250 kW'dan fazla uygulanması olağan değildir. Bu, etkili maksimum saatlik erime oranının toplam kapasitenin yaklaşık üçte biri olduğu anlamına gelir. Türbülans, ilavelerin hızlı bir şekilde çözünmesi için faydalıdır, ancak şarj oksidasyona veya gaz alımına

eğilimli olduğunda dezavantaj olabilir. Pota küçük fırınlarda kullanılabilir, ancak genellikle bir çelik kalıbı ve fırın bobini arasına bir refrakter astarı sıkıştırmak suretiyle oluşturulur. Önceki, ilk şarjın yavaş ısıtılması sırasında yerinde kalır ve sinterleme gerçekleşene kadar astarı destekler [8].

1.2.3.3 Kupola eritmesi

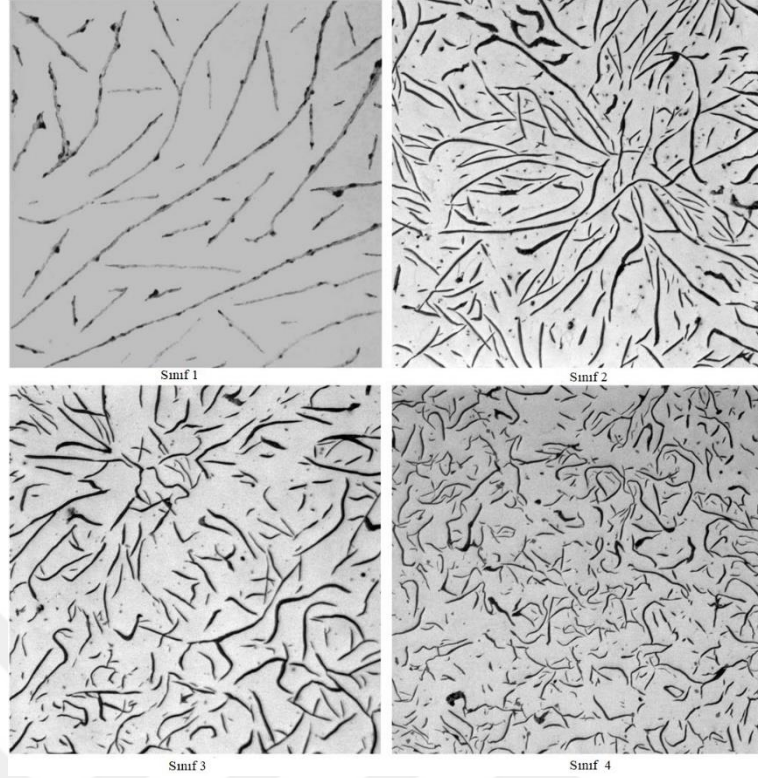
Kupola temel olarak havanın tuyelerden (nozullar) üflenmesiyle yoğunlaşan kok kömürü yakan silindirik bir şaft fırındır. Alternatif metal tabakalar, yedek kok ile birlikte, üste yüklenir. İnşinde metal, kok yanmasından sıcak gazların karşı akım ile doğrudan temasıyla eritilir. Erimiş metal aralıklı kılavuz çekme veya sürekli akış ile kullanım için boşaltıldığı kuyuda toplanır. Bir kupolada eritme birkaç yüzyıl önce el pompalı körüklerle şişirilmiş eski fiçı tipi birimlere dayanır. Bugün bildiğimiz kupola 1794 yılında John Wilkinson tarafından patentlendirilmiştir. 1950'lerden önce, kupola basitliği ve düşük erime maliyeti nedeniyle demir eritme için en yaygın kullanılan fırındır. Yıllar boyunca, kupola giderek daha verimli ham madde kullanımında daha verimli yanma, daha iyi kontrol ve daha fazla esneklik için artırılmıştır. Bununla birlikte, kupola önemli miktarda duman ve parçacık madde yaymaktadır. Emisyon, en yüksek çevre standartlarını karşılayacak şekilde temizlenmiştir, ancak bu çok fazla mühendislik çalışması ve önemli bir masraf gerektirmiştir. 1950'lerde, ayrıntılı kirlilik kontrol ekipmanı gerektiren çevre yasaları ile, kupola, özellikle kirlilik ekipmanının nispeten daha pahalı olduğu küçük kupolalarda düşük maliyet ve basitlik avantajını kaybetmiştir. Bu arada, elektrikli endüksiyon ocağı ekipmanlarında ilerici gelişmeler kaydedilmiştir. Endüksiyon fırınları çok az kirlilik kontrol ekipmanı gerektirdiğinden hızlı büyüyen küresel grafitli dökme demir endüstrisi için tatmin edici olan düşük kükürtlü demir ürettiği için, elektrik indüksiyon fırınları, özellikle küçük tonaj işlemlerinde ve küresel grafitli dökme demir veya birkaç demir tipinin üretildiği birçok kupolanın yerini almıştır. Elektrik indüksiyon erimesinin, bu koşulların çoğunda daha düşük erime maliyetine sahip olduğu bulunmuştur. Kupola sayıları 1950'lerin başında 4000'den bugün 1400'e düşmüştür. Yüksek tonajlı işlemlerde, kupola, yüksek üretim dökümhanelerinin çoklu döküm hatlarını veya santrifüj boru üreticilerinin çoklu döküm makinelerini karşılamak için ihtiyaç duyulan sürekli yüksek demir hacimlerinin en güvenilir kaynağı olmaya devam etmektedir. Sürekli kupola erimiş demir akımı, arka tarafta bağımsız bir şekilde üst kısımda yapılan yükleme ile veya

cüruf giderme ile kesintiye uğramaz, çünkü cüruf, ergitme işlemini kesintiye uğratmadan sürekli olarak bir ön veya arka cüruf ağzından yana doğru akar. Bu gibi yüksek tonajlı sürekli talep durumlarında, kupola, geçerli kok ve elektrik gücü maliyetleri altında en düşük eritme maliyet yöntemi olmuştur. Kupola, çok çeşitli dökme hurdayı eritebilmektedir. Kupolada demirin kontrol edilmesi daha zordur, ancak olumlu bir şekilde, kokla sürekli temastan kaynaklanan doğal çekirdeklenme nedeniyle iyi akışkanlık, işlenebilirlik ve büzülme eğilimlerine karşı düşük bir eğilim göstermesi ile karakterize edilir [7, 8].

1.2.4 Dökme demir türleri

1.2.4.1 Gri dökme demir

Gri dökme demirler, demir matrisinde lamel şeklinde grafit varlığıyla karakterize edilen çok sayıda dökme demir için kullanılan bir terimdir. Bu türdeki dökme demirler %2,5 ila %4 karbon, %1 ila %3 silisyum ve %0,1 ila %1,2 arasında değişen mangan eklentisi içerir. Gri dökme demirler en yaygın demir alaşımlardan biridir. Gri dökme demir özellikleri grafitlerin bulunduğu demir matrisiyle ilişkilidir. Matris ferrit, perlit veya iki fazın karışımından oluşabilmektedir. Büyük lamel oluşumları gri dökme demirlerin sünekliğinin ve mukavetini azaltır, bu nedenle grafit aşıl原因ıcılar kullanılarak yapıda küçük grafitler elde edilmesi amaçlanmaktadır (Şekil 1.4).



Şekil 1.4 : Gri dökme demir mikroyapı görüntüleri (Sınıf 1-4)

Gri dökme demirlerin metalürjisi, katılaşmaların ve ardından katı hal dönüşümlerini etkileyen birçok faktör nedeniyle oldukça karmaşıktır. Buna rağmen gri dökme demirler olağanüstü dökülebilirlik, mükemmel işlenebilirlik ve ekonomik özellikleriyle geniş bir kullanım alanına sahiptir. Gri dökme demirler motor blokları, silindir kafaları, manifoldlar, gaz brülörleri, dişli kutuları gibi parçaların üretiminde sıklıkla kullanılmaktadır [7, 9, 10].

1.2.4.2 Beyaz dökme demir

Beyaz dökme demirler, çözelti içerisindeki karbonlar katılaşma durumunda grafit oluşturamadığında meydana gelir. Beyaz dökme demirler sert ve kırılındır, kolayca işlenemezler. Beyaz dökme demirler, karbonun sadece karbür olarak mevcut olduğu yegane dökme demir türüdür. Grafit yokluğundan dolayı açık renkli bir görünüme sahiptir. Beyaz dökme demir yüksek basma mukavemetine sahiptir ve yüksek sıcaklıkta sertliğini ve mukavemetini korur. Yapısındaki alaşım içeriğine bağlı olarak farklı karbürlerin varlığı, bu dökme demirleri çok sert, aşınmaya dirençleri fakat aynı zamanda çok kırılğan bir hale getirir. Aşağıda beyaz dökme demirlerin genel mikroyapısı görülmektedir. Beyaz dökme demirler, bu özellikleri nedeniyle öğütücü

balatalarında, kumlama nozullarında, demiryolu fren pabuçlarında, pompa gövdelerinde, haddeleme merdaneleri ve kırıcılarda kullanılır [7].

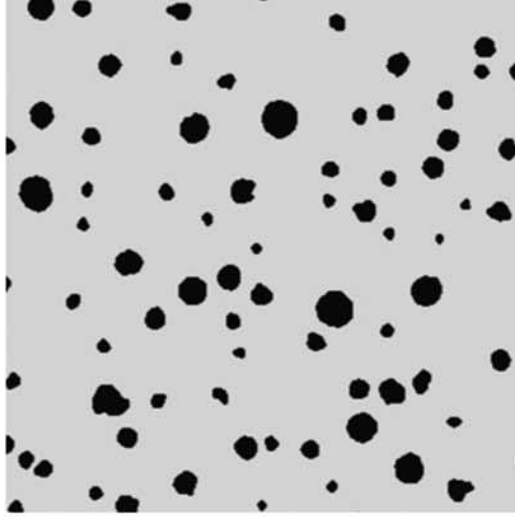
1.2.4.3 Dövülebilir dökme demir

Dövülebilir demir olarak da adlandırılan bu dökme demir sınıfında karbon grafitleri lamel yerine düzensiz grafit taneleri şeklindedir. Esasen karbürlerin düzensiz grafit tanelerine dönüştürmek için ısıtılmış beyaz dökme demirlerdir. Bu demirler, aktarma elemanlarında, bağlantı çubuklarında, zincir ve zincir dişlilerinde, demiryolu, tarım ve inşaat makinelerinde kullanılır.

1.2.4.4 Küresel grafitli dökme demir

Küresel grafitli dökme demir, son 80 yıldır bilinen, gün geçtikçe önemi ve kullanımını artıran bir dökme demir türüdür. Günümüzde %30 gibi bir pazar payına sahiptir. Sünek demir (ductile iron) ya da sfero demir olarak da adlandırılmaktadır. Lamel grafitler içeren gri dökme demirlerin aksine matris içindeki küresel grafit yapıları içeren dökme demirlerdir. Bu nedenden dolayı gri dökme demirlerden daha yüksek sünekliğe ve mukavemete sahiptir. Ek olarak bu özellikler ısıtılmış işlemlerle daha da geliştirilebilir [1, 11].

Küresel grafitli dökme demir, düşük sülfürlü sıvı metalin, magnezyum veya bazen seryum içeren katkı maddesiyle tretman yapılarak ve döküm sonrası ya da döküm esnasında silisyum içeren alaşımlarla aşılama yapılarak üretilir. Kimyasal kompozisyonu gri dökme demirlere benzese de işlem aşamasında farklılık gösterirler. Bu çalışmada küresel grafitli dökme demirlerden daha ayrıntılı olarak bahsedilecektir.



Şekil 1.5 : Küresel grafitli dökme demir mikroyapı görüntüsü (%100 Küresellik)

1.2.4.5 Vermiküler grafitli dökme demir

Vermiküler grafitli dökme demir, lamel ve küresel grafit arasındaki morfolojik bir ara formdur. Oda sıcaklığındaki vermiküler grafitli dökme demir özellikleri, gri dökme demir ve küresel grafitli dökme demir özellikleri arasında orta düzeydedir. Bu demirler, gri dökme demirden daha iyi mekanik özelliklere (plastisite dahil), sertlik ve yorulma direncine sahiptir. Vermiküler dökme demir matrisi içerisindeki grafitler, termal iletkenlik, titreşimleri bastırma kabiliyeti ve işlenebilirlik açısından, KGDD'den daha yüksek özellikler gösterir [7].

1.3 Küresel Grafitli Dökme Demirler

1.3.1 Tarihçe

Yüzyılın ilk yarısında gri dökme demirin dökülebilirlik özelliği ve çeliğin tokluğunun bir malzemede birleştirilmesi amaçlanmaktaydı. Bu amaç, dövülebilir dökme demir kullanımıyla kısmen yerine getirilmiştir. Bu dökme demir sınıfı beyaz dökme demirin uzun süreli tavlama işleminden geçirilmesiyle elde edilir. Uzun süreli tavlama işlemi ve kaliteli bir beyaz dökme demir üretiminin yüksek maliyetleri bu malzemenin elde edilmesini kısıtlamıştır. 1948 yılında dökümcülerin ve tasarım mühendislerinin hayalleri gerçekleşmiştir. Amerikan Dökümcüler Topluluğunun (American Foundrymen Society, AFS) kongresinde, ötektiküstü gri dökme demirin içine eklenen küçük miktardaki seryumun (Ce) küresel grafitler oluşturduğu açıklanmıştır. Böylece günümüze kadar gelişmeye devam eden küresel grafitli

dökme demirler ortaya çıkmıştır. Son yıllarda üretim haciminde tek büyümeyi küresel grafitli dökme demirler göstermiştir [1, 10].

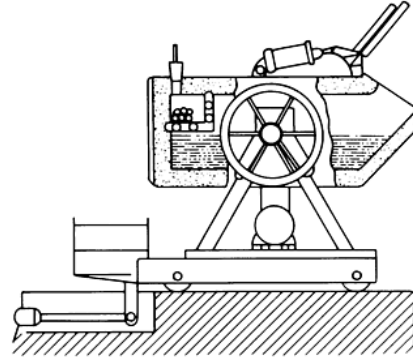
1.3.2 Üretim yöntemi

Küresel grafitli dökme demirler, grafit oluşumunu sağlaması için yeterli silisyum oranına sahip, kükürt ve oksijenin dikkatlice uzaklaştırılmış ergimiş metalin doğrudan katılmasıyla üretilmektedir. Ergimiş metale eklenen magnezyum ilavesi, kükürt ve oksijeni bağlar, grafit büyüme morfolojisini de doğrudan etkiler. Magnezyum oksijenle tepkimeye girerek yüzeyde yüzer halde bulunan ve uzaklaştırılması kolaylaşan yüksek kararlılıktaki MgO bileşimini oluşturur. Magnezyum oksijenle olduğu gibi MgS oluşturmak için sülfürle tepkimeye girer ve sülfüründe ergimiş metalden uzaklaştırılmasını sağlar. Magnezyum metal içinde düşük çözünürlüğe sahip ve uçucu olduğundan bu tepkimeler geri dönüşümlü hale gelebilmektedir. Ek olarak oksidasyon sağlamak için genellikle demir-silisyum formunda silisyum elementi eklenir. 1A,2A ve 3B gruplarından diğer elementler de oksijen ve kükürtü bağlamak için kullanılabilir. Özellikle, seryum oldukça stabil oksitler ve sülfürler oluşturur ve genellikle birlikte kullanıldığı, magnezyumdan daha az uçucudur. Aşıluyıcıların oluşturduğu kalıntıların bazıları da grafitlerin merkezinde çekirdek görevi görür ve nodüllerin bu çekirdek etrafında oluşmasını sağlar [12]. Kükürt ve oksijenin ortamdaki uzaklaşmasıyla izotropik bir grafit büyümesi gözlenir. Deoksidasyon, grafit oluşumu ve çekirdeklenme etkilerini uygun şekilde ayarlamak için dikkatlice seçilmiş alaşım ilaveleri kullanılır. Geleneksel düşük alaşım küresel grafitli dökme demirlerde C, Si, S, P ve Mn elementleri bulunur. Karbon eşdeğeri, sıradan gri dökme demirlerden daha yüksek ve kükürt içeriği çok daha düşüktür. Küresel grafitli dökme demirlerden son mikro yapı ısı işlemler sonrasında belirlenir. Genellikle ısı işlemsiz kullanılırlar. Malzemede iyi oksidasyon direnci arandığında silisyum oranı %1,8'den %6'lara kadar değişebilir. Bununla birlikte yüksek silisyum ve karbon içeriği, grafit nodüllerinin yüzer hale gelmesine neden olurken, düşük karbon katılma çekilmesini ve düşük silisyum grafit oluşumu yerine karbür oluşumuna yol açmaktadır [7, 11].

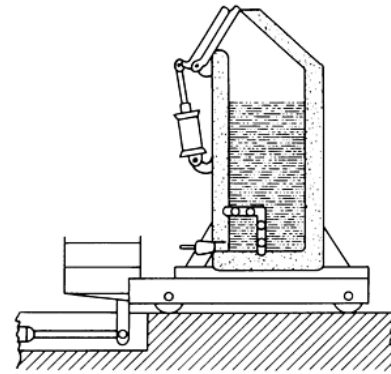
1.3.2.1 MG treatmentı

Küresel grafitli dökme demirlerde, küresel morfolojiyi elde etmek için, küreselleştirici bir tretman gereklidir. Bu, ergimiş metale magnezyum ilave

edilmesiyle gerçekleştirilir. Seryum gibi nadir toprak elementleri de kullanılabilir, fakat magnezyum en yaygın kullanılan elementtir. Magnezyum saf halde, ergimiş metale eklenebilir veya %3-10 Mg içeren demir-silisyum, %4-16 Mg içeren nikel bazlı küreselleştiricilerle alaşım haline kullanılabilir. Magnezyum ilavesi döküm esnasında eklenebildiği gibi daldırma yöntemiyle de eklenebilir. Magnezyum ekleme yönteminden bağımsız olarak amaç mümkün olduğunca fazla magnezyumu geri kazanmaktır. Metalik magnezyum ve ergimiş metal arasında gerçekleşen tepkime oldukça şiddetlidir. Magnezyum buharlaştırılır ve havada kuvvetli bir şekilde yanar ve magnezyum oksit oluşturur. Kapalı tanklarda gerçekleştirilen bu işlem magnezyumun nikel ve demir-silisyumla alaşımlanmasıyla azaltılabilir. Magnezyum geri kazanımı yaklaşık %50'dir. İşlem sonucunda kalan magnezyumun metalde küresel grafitler oluşturması için %0,04 ila 0,06 aralığında olması gerekmektedir [7].



(a)



(b)

Şekil 1.6 : Mg tretmanı düzeneği, (a) Mg eklenmesi, (b) Mg tretmanı yapılması

1.3.2.2 Aşılama

Magnezyum ile tretman yapıldıktan sonra, dökme demir son bir aşlamaya tabi tutulur. Aşılama genellikle kepçeyle granül aşılama şeklinde, %75 Si içeren demir-

silisyum ya da %60 ila %80 Si içeren özel alaşımlardan kullanılarak yapılmaktadır. Eklenen aşılama miktarı genellikle yaklaşık % 0,25 ila 1,0 arasında değişmektedir. Magnezyum ilaveli alaşımda daha yüksek bir silikon yüzdesi daha az aşılama izin verebilir. Aşılama işlemi yeniden doldurma sırasında eklenebilir, metale karıştırılır, doldurmadan önce pota tabanına yerleştirilir veya dökümden önce mümkün olduğu kadar geç bir refrakter çan içine daldırılabilir. Etkili karıştırma gereklidir ve bunu başarmanın bir yolu, aşılama yapılırken ergimiş metalin içinden hava ve nitrojen kabarcıklarının geçirilmesidir. Aşılama, katılaşma sırasında aşırı soğutmayı azaltır ve yapıda, özellikle ince kesitlerde karbürlerin oluşmasını önlemede yardımcı olur. Grafit tanelerinin sayısını artırır, böylece ferrit oluşumuna yardımcı olan ve sünekliği artıran homojenliği artırır. Tavlama süresinin azaltılmasına yardımcı olur ve sertliği azaltır. Bir aşılama miktarının en etkili hali çözüldükten hemen sonrasındır. Daha sonra 20 ila 30 dakikalık bir sürede kaybolur. Hem başlangıç gücü hem de uzaklaşma hızı, kalsiyum, alüminyum, seryum, stronsiyum, baryum ve bizmut gibi eser miktardaki elementlerden ektilenir.

1.3.3 Küreselliğe etki eden faktörler

1.3.3.1 Grafit miktarı

Grafit miktarı arttıkça, mukavemet ve uzamada nispeten az olan, elastisite modülünde ve yoğunlukta daha fazla görülen bir azalma vardır. Genel olarak, bu etkiler diğer değişkenlerin etkileriyle karşılaştırıldığında küçüktür, çünkü küresel grafitli demirin karbon eşdeğer içeriği büyük bir değişken değildir ve genellikle ötektik değere yakın tutulur.

1.3.3.2 Matris yapısı

Standartlardaki farklı küresel grafitli dökme demir derecelerinin belirlenmesinde ana faktör matris yapısıdır. Yüzey işlemsiz durumda, matris değişen oranlarda perlit ve ferrit içermektedir ve perlit miktarı arttıkça demirin mukavemeti ve sertliği de artmaktadır.

1.3.3.3 Kesit boyutu

Kesit boyutu küçüldükçe kalıptaki katılaşma ve soğutma hızları artar. Bu, daha hızlı bir şekilde tavlatabilen ince taneli bir yapıya neden olur. Ancak, daha ince

bölümlerde sertliği artıracak, işlenebilirliği azaltacak ve kırılmalığa yol açacak karbürler mevcut olabilir. İnce kesitlerde yumuşak sünek yapıların elde edilmesi için, muhtemelen geç bir aşamada olan yüksek aşılama, yüksek küresel grafit oluşumunu teşvik etmek için istenmektedir. Kesit boyutu arttıkça, küresel grafit sayısı azalır ve mikro-ayırışma daha belirgin hale gelir. Bu, büyük küresel grafit boyutu, dökme demir ferrit oranında bir azalma ve tavlama üzerine tamamen ferritik bir yapının oluşumuna karşı direnci artırma ile sonuçlanır.

1.3.3.4 Kompozisyon

Elementlerin perlit veya geciktirici dönüşümündeki (matris yapısını ve özelliklerini değiştirmek için ısı işlem yapılmasını kolaylaştıran) etkilerine ek olarak, bileşimin bazı yönleri bazı özellikler üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Silisyum ferriti sertleştirir ve kuvvetlendirir ve darbe geçiş sıcaklığını yükseltir; bu nedenle, silisyum içeriği maksimum süneklik ve tokluk elde etmek için % 2'nin altında tutulmalıdır [13].

1.3.4 KGDD türleri

1.3.4.1 ADI Östemperlenmiş Sünek Demir

Östemperleme işleminin alaşım küresel grafitli dökme demirlere uygulanması, yeni küresel grafitli dökme demir grubunun geliştirilmesiyle sonuçlanmıştır. Östemperlenmiş sünek demir ya da kısaca ADI olarak adlandırılmıştır. Özel bir ısı işleme tabi tutularak elde edilmektedir. ADI'nin özel mikro yapısı, tasarım esnekliği ve düşük maliyet ile birlikte çekme ve yorulma dayanımları, süneklik, tokluk, aşınma direnci ve işlenebilirlik arasında benzersiz bir kombinasyon sunar [14, 15].

1.3.4.2 Alaşım küresel grafitli dökme demirler

Alaşım küresel grafitli dökme demirler, isteğe bağlı olarak %2'ye kadar Mo ile birlikte %4-6 Si ile birlikte alaşımlandırılarak, yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılmak üzere geliştirilmiştir. İyi derecede oksidasyon direnci, yapısal kararlılık, dayanıklılık ve iyi dökülebilirlik özellikleriyle birlikte yüksek sıcaklık dayanımı nedeniyle bu küresel grafitli dökme demirler egzoz manifoldları ve turnoşarj gibi parçalar için ideal malzemelerdir. Genellikle "Ni-Resist" küresel dökme demirler olarak bilinen bu küresel grafitli dökme demirler, özel kimyasal, mekanik ve fiziksel özellikler gerektiren çok çeşitli uygulamalar için piyasaya sürülmüştür. %18-38 Ni ve %6'ya kadar Cr içeren bu ürünler, 380-550 MPa çekme dayanımını ve %4-40'lık

uzama gibi özellikleri korozyon direnci, aşınma ve erozyon direnci gibi özelliklerle birleştirir. Bu dökümler için tipik uygulamalar, tuzlu ortamda veya yüksek kriyojenik sıcaklıklarda çalışan parçalardır [1].

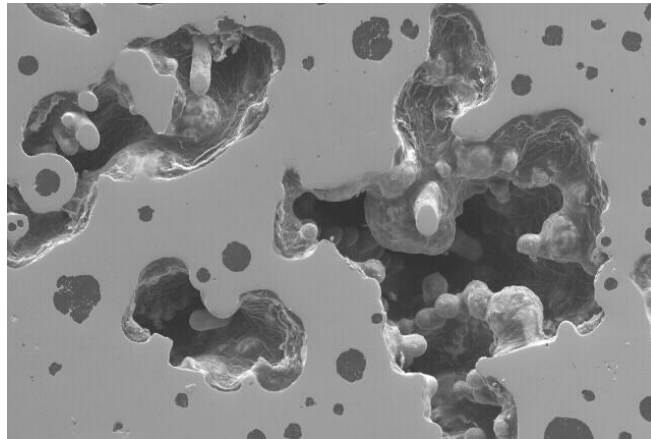
1.3.5 Küresel grafitli dökme demirlerde döküm hataları

1.3.5.1 Çekinti oluşumu

Küresel grafitli dökümde birçok çekinti oluşumu nedeni vardır, dünyadaki deneyimler çekinti kusurlarının yaklaşık % 50'sinin kum sistemleri, besleme ve geçitlerle ilgili olduğunu göstermiştir. Diğer % 50, karbon eşdeğeri, sıcaklık, aşılama veya yüksek magnezyum kalıntıları gibi metalurjik faktörlere bağlanabilir.

Bir dökümde bir çekme veya gözeneklilik tespit edildiğinde, sorunun nedenini belirlemek için atılabilecek birkaç acil ve basit adım vardır. İlk olarak, kusurun konumunun keskin bir yarıçapa veya potansiyel bir sıcak noktaya yakın olup olmadığını belirlemek için döküm geometrisi incelenmelidir [16].

Metalurjik olarak, çekinti eğilimini etkileyebilecek birçok farklı etken vardır. Magnezyum, en güçlü karbür stabilizatörlerinden biri olmasının dışında, küresel grafitli dökme demirlerin çekinti oluşumu eğilimi üzerinde belirgin bir etkiye sahiptir. Magnezyum aralığının daha yüksek oranlarında, % 0,05 ya da üzerinde çalışan dökümhanelerde demirin daha düşük aralıklarda çalışanlara göre çekinti oluşumuna daha eğilimli olduğu görülmüştür (Şekil 1.7).

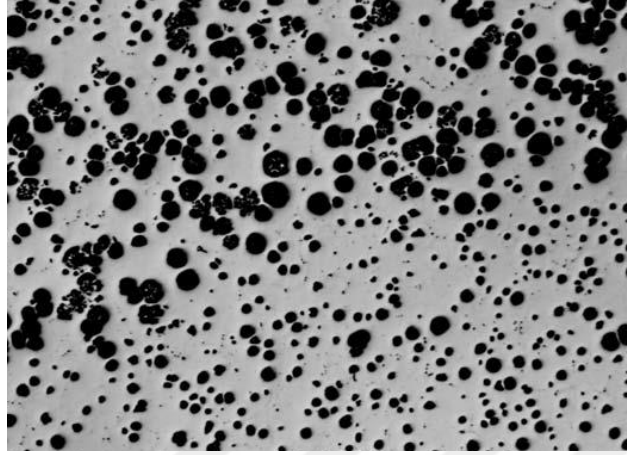


Şekil 1.7 : Çekinti oluşumu kesit görüntüsü

1.3.5.2 Grafit flotasyonu

Grafit flotasyonu, kalın bölümlerin katılaşması sırasında veya yavaş soğutma dökümleri sırasında büyük hacimli, düşük yoğunluklu grafit nodüller oluştuğunda

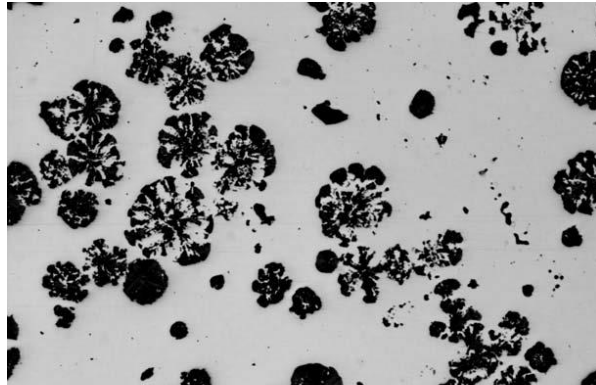
ortaya çıkar [16]. Matristen daha düşük bir yoğunluğa sahip olan nodüller, döküm yüzeyine doğru yüzmeye meyillidir ve bu nedenle o bölgedeki mekanik özellikler (ve yüzey kalitesi) üzerinde olumsuz bir etkiye sahip olabilmektedir (Şekil 1.8).



Şekil 1.8 : Grafit flotasyonu mikroyapı görüntüsü

1.3.5.3 Patlak grafitler

Karakteristik olarak patlamış grafit, tam olarak patlayarak parçalanmış şekilde görünen grafitleri tanımlamak için kullanılmaktadır. Çoğu MgFeSi alaşımları bazı nadir toprak metalleri, seryum, lantan, neodim, praesodimium vs. içerirler ve bunlar kurşun, bizmut, antimon, titanyum vb. gibi bazı zararlı elementlerin etkilerini bertaraf etmede faydalıdır. Nadir toprak elementleri aynı zamanda magnezyum gibi küreselleştirici etkiye sahiptir. Fakat aşırı kullanımı grafitlerde patlamalara neden olmaktadır [16]. Patlamış grafit normalde yavaş soğutma oranlarına sahip veya çok yüksek karbon eşdeğeri seviyelerinde kalın kesit dökümlerinde bulunur (Şekil 1.9).



Şekil 1.9 : Patlak grafit mikroyapı görüntüsü

1.4 Dökümlerde Kullanılan Tahribatsız Muayene Yöntemleri

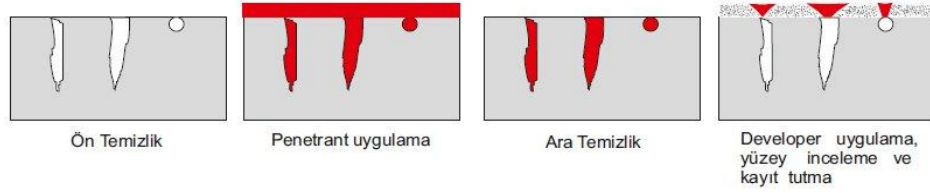
1.4.1 Radyografik muayene

Radyografik muayene, bir x-ışını üreticiden veya bir radyoaktif kaynaktan üretilen radyasyon ve x-ışınlarının malzemedan geçirilecek, bir film ve ya elektronik görüntüleme cihazı ile incelenmesi işlemidir. Malzemenin içinden geçerken, malzemenin kalınlığına ve radyografik yoğunluğuna bağlı olarak radyasyonun bir kısmı zayıflarken, malzemedan zayıflamadan geçen radyasyon bir görüntü oluşturur. Radyografik görüntü, malzemedan geçen ışının yoğunluğundaki değişikliklerle oluşturulur. Bazı iç hatalar bu ışınların zayıflamasında doğrudan etki gösterir. Bu hatalar, malzeme kalınlığında değişiklikler yaratarak görüntüde yerel olarak koyu veya açık lekeler oluşturur. Radyografi terimi genellikle film (geleneksel radyografi) veya kâğıt üzerinde (kâğıt radyografi veya xero radyografi) kalıcı bir görüntü üreten radyografik bir işlemi ifade eder, ancak geniş anlamda tüm radyografik inceleme biçimlerini ifade etmektedir. İnceleme, bir görüntünün flüoresan bir ekranda veya görüntü kuvvetlendirici üzerinde görüntülenmesini içerdiğinde, radyografik işlem filmsiz veya gerçek zamanlı inceleme olarak adlandırılır. Radyasyon yoğunluğunu ölçmek için elektronik görüntüleme cihazları kullanılmadığı zaman, işlem radyasyon ölçümü olarak adlandırılır. Medikal olarak kullanılan bilgisayarlı tomografi yöntemi de radyografik incelemeye adapte edilmiş ve test parçalarının kesit görüntülerini elde etmek için kullanılmaktadır. Bu belirtilen yöntemlerde x ışınlarının formunda elektromanyetik radyasyon kullanılmaktadır. Nötron radyografisi, elektromanyetik radyasyondan ziyade nötronların kullanıldığı radyografik muayeneyi ifade eder. Radyografik muayenenin hassasiyeti veya kusurlarını algılama yeteneği, x ışını emisyon noktası, döküm ve röntgen görüntüleme düzlemi arasındaki geometrik ilişkiler de dahil olmak üzere muayene tekniğinin kontrolüne bağlıdır [17].

1.4.2 Sıvı penetrant muayenesi

Sıvı penetrant muayenesi, renkli veya flüoresan bir boyadaki kusurdan sızarak yüzey çatlak kusurlarını ortaya çıkarmak için kullanılan bir yöntemdir. Teknik, bir sıvının kılcal hareketle kusurdan yüzeye doğru çekilmesi prensibine dayanır. "Penetrasyon süresi" adı verilen bir süre sonra, fazla yüzey penetrantı giderilir ve bir geliştirici uygulanır. Bu bir kurutma kâğıdı görevi görür. Varlığını ortaya çıkarmak için nüfuz ediciyi kusurdan yüzeye doğru çeker (Şekil 1.10). Renkli (kontrast) penetrantlar iyi

beyaz ışık gerektirirken, floresan penetrantların karanlık koşullarda ultraviyole "siyah ışık" ile kullanılması gerekir.



Şekil 1.10 : Sıvı penetrant muayenesi uygulama adımları

Bir sıvı penetrant muayenesinin (LPI) yardımsız bir görsel muayeneye göre sunduğu avantaj, denetçinin kusurlarını görmesini kolaylaştırmasıdır. Nüfuz edici bir inceleme işleminin kusurları daha kolay görmesini sağlamanın iki yolu vardır. Birincisi, LPI, gözün tespit etmesi için kusurun kendisinden çok daha büyük ve daha kolay bir kusur göstergesi üretir. Birçok kusur, çıplak gözle tespit edilemeyecek kadar küçük veya dardır. Gözün fiziksel özellikleri nedeniyle, nesnelerin çözülemeyeceği bir eşik vardır. Görme keskinliğinin bu eşiği, 20/20 görüş sahibi bir kişi için 0.007 mm civarındadır.

LPI'nin bir kusurun tespit edilebilirliğini geliştirmesinin ikinci yolu, göstergeyle arka plan arasında yüksek bir kontrast seviyesine sahip bir kusur göstergesi üretmesidir ve gösterimin daha kolay görülmesini sağlar. Görünür bir boya ile penetrasyon muayenesi gerçekleştirildiğinde, nüfuz eden malzemeler beyaz geliştirici arasında yüksek düzeyde kontrast sağlayan parlak kırmızı bir boya kullanılarak formüle edilir. Başka bir deyişle, geliştirici, kusura dolmuş penetrantı kusurdan çekmek için yüksek kontrastlı bir arka planın yanı sıra bir kurutma kağıdı görevi görür. Bir flüoresan penetrasyon muayenesi gerçekleştirildiğinde, nüfuz eden malzemeler parlak bir şekilde parlamak ve gözün en düşük aydınlatma koşullarında en duyarlı olduğu dalga boyunda ışık vermek için formüle edilir [18].

1.4.3 Gözle muayene

Gözle muayene, korozyon, kirlenme, yüzey kaplaması ve birleştirmelerdeki (örneğin, kaynaklar, contalar, lehim bağlantıları ve yapıştırma bağları) yüzeydeki süreksizlikler gibi çeşitli yüzey kusurlarını tespit etme ve inceleme aracı sağlayan tahribatsız bir muayene tekniğidir. Gözle muayene, yapısal hata mekanizmalarıyla olan ilişkileri nedeniyle özellikle önemli olan yüzey çatlaklarını tespit etmek ve

incelemek için en yaygın kullanılan yöntemdir. Yüzeydeki çatlakları tespit etmek için diğer tahribatsız teknikler kullanılsa bile, gözle muayene genellikle yararlı bir ek sağlar. Örneğin, proses tüpünün girdap akımı incelemesi gerçekleştirildiğinde, yüzey bozulmasını doğrulamak ve daha yakından incelemek için genellikle gözle muayene yapılır. Gözle muayene ile tespit edilebilecek çok çeşitli yüzey kusurları göz önüne alındığında, bu yöntem, ürüne ve izlenen yüzey kusurunun tipine bağlı olarak farklı teknikleri kapsayabilir. Gözle muayene yöntemleri, hataların tiplerine göre inceleme yapılması için çok çeşitlilikte donanım içerir. Gözle muayeneye yardımcı olmak için kullanılan donanımlardan bazıları şunlardır:

- İç, kapalı veya erişilemeyen alanları aydınlatmak ve gözlemlemek için esnek veya rijit boroskoplarda
- Uzaktan algılama veya fotoğraflar, video kasetler ve bilgisayar destekli görüntüler biçiminde kalıcı görsel kayıtların geliştirilmesi için görüntü sensörleri
- Yüzey kalitesini, yüzey şekillerini (profil ve çevre çizgisi ölçümü) ve yüzey mikro yapılarını değerlendirmek için büyüteç sistemleri
- Yüzey çatlaklarının gözlemlenmesini arttırmak için boya ve flüoresan penetranlar ve manyetik parçacıklar (ve manyetik parçacık muayenesi durumunda bazen yüzeye yakın koşullar)[19, 20].

1.4.4 Girdap akımları muayenesi (Eddy currents)

Girdap akımı muayenesi, elektromanyetik alanlar ve metaller arasındaki etkileşimin gözlemlenmesinden oluşur. Temel bir sistemde, akımlar test parçası içinde alternatif akım taşıyan bir tel bobin tarafından akım geçirilir. Parça bobine girdiğinde veya bobin bir prob veya boyunduruk formunda yerleştirildiğinde, bobinler tarafından üretilen elektromanyetik enerji, direnç ve gecikme etkisiyle kısmen emilir ve ısıya dönüştürülür. Kalan enerjinin bir kısmı test bobinine geri yansır, elektriksel karakteristiği test parçasının özellikleri tarafından belirlenen bir şekilde değiştirilmiştir. Sonuç olarak, prob bobinden akan akımlar, test cihazının özelliklerini tanımlayan bilgi kaynağıdır. Bu akımlar, bir referans numunesinde akan akımlarla analiz edilebilir ve karşılaştırılabilir [21]. Girdap akımlarıyla karakterizasyon çalışmaları da yapılmıştır [22]. Girdap akımı denetim yöntemleri, hem ferromanyetik hem de ferromanyetik olmayan metallerde etkilidir. Girdap akımı

yöntemleri, sıvı penetrant veya manyetik parçacık yöntemleri kadar küçük, açık kusurlara karşı hassas değildir. Yüzey etkisinden dolayı, girdap akımı muayenesi genellikle 6 mm'den daha az olan derinliklerle sınırlıdır. Ferromanyetik malzemelerin incelenmesinin sonuçları test parçasının manyetik geçirgenliğindeki değişiklikler nedeniyle gizlenebilir. Metalurjik özellikler de dahil olmak üzere elektriksel iletkenlik veya diğer özellikler belirlenirken, hatalı sonuçları önlemek için sıcaklıktaki değişikliklerden kaçınılmalıdır. Girdap akımı ve elektromanyetik inceleme yöntemlerinin dökümlere uygulanması aşağıdaki üç kategoriye ayrılabilir:

- Çatlaklar, boşluklar, kapanımlar, hava delikleri ve iğne delikleri gibi yüzeye yakın kusurları tespit etme (girdap akımı incelemesi)
- Alaşım, elektriksel iletkenlik, sertlik ve diğer metalurjik faktörlere göre sıralama (öncelikle elektromanyetik inceleme)
- Büyüklük, şekil, kaplama kalınlığı veya yalıtım kalınlığına göre ölçüm (girdap akımı veya elektromanyetik inceleme)

1.4.5 Manyetik parçacık muayenesi

Manyetik parçacık muayenesi (MPI), hata tespitinde kullanılan tahribatsız bir muayene yöntemidir. MPI'nin uygulanması hızlı ve nispeten kolaydır ve parça yüzey hazırlığı diğer bazı NDT yöntemlerinde olduğu kadar kritik değildir. Bu özellikler MPI'yi en yaygın kullanılan tahribatsız muayene yöntemlerinden biri yapar.

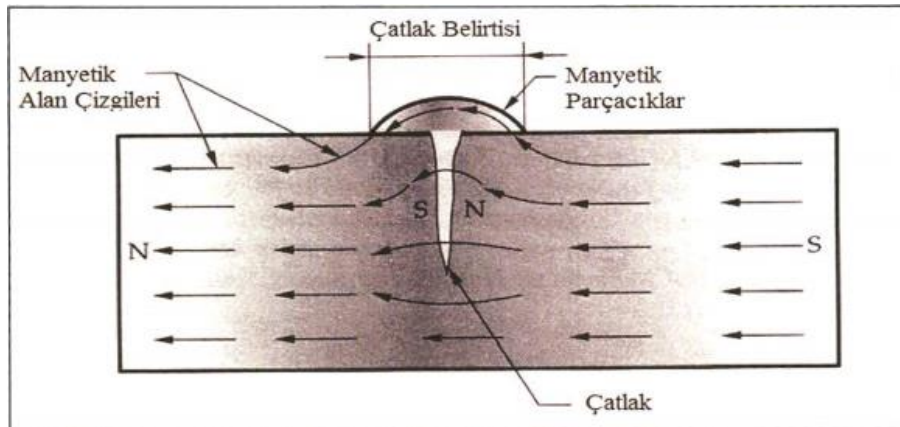
MPI, bileşenlerdeki kusurları tespit etmek için manyetik alanlar ve küçük manyetik parçacıklar (yani demir dolguları) kullanır. Denetlenebilirlik açısından tek gereksinim, denetlenen bileşenin demir, nikel, kobalt veya bunların bazı alaşımları gibi ferromanyetik bir malzemedan yapılmış olmasıdır. Ferromanyetik malzemeler, incelemenin etkili olmasını sağlayacak bir seviyeye mıknatıslanabilen malzemelerdir.

Yöntem, döküm, dövme ve kaynak gibi çeşitli ürün formlarını incelemek için kullanılır. Birçok farklı endüstri, bir bileşenin kullanım uygunluğunu belirlemek için manyetik parçacık incelemesini kullanır. Manyetik parçacık muayenesi kullanan bazı sektör örnekleri, yapısal çelik, otomotiv, petrokimya, enerji üretimi ve havacılık endüstrileridir. Su altı muayenesi, açık deniz yapıları ve su altı boru hatları gibi maddeleri test etmek için manyetik parçacık muayenesinin kullanılabileceği başka bir alandır.

Teoride, manyetik parçacık muayenesi (MPI) nispeten basit bir kavramdır. İki tahribatsız muayene yönteminin bir kombinasyonu olarak düşünülebilir: manyetik akı kaçağı testi ve görsel test. Bir çubuk mıknatısı durumunu düşünündüğümüzde. Mıknatıs içinde ve çevresinde manyetik bir alana sahiptir. Manyetik bir kuvvet hattının mıknatısa girdiği veya girdiği herhangi bir yere kutup denir. Manyetik bir kuvvet çizgisinin mıknatıstan çıktığı bir kutup kuzey kutbu ve bir kuvvet çizgisinin mıknatısa girdiği bir kutup güney kutbu olarak adlandırılır.

Uzunluğunun merkezinde bir çubuk mıknatıs kırıldığında, her bir parçanın her bir ucunda manyetik kutuplara sahip iki tam çubuk mıknatıs ortaya çıkacaktır. Eğer mıknatıs sadece çatlamış, ancak ikiye tam olarak kırılmamışsa, çatlağın her bir kenarında kuzey ve güney kutbu oluşacaktır. Manyetik alan kuzey kutbundan çıkar ve güney kutbundaki oyuklardan çıkar. Manyetik alan, çatlak tarafından oluşturulan küçük hava boşluğu ile karşılaştığında yayılır, çünkü hava, birim hacim başına mıknatısın olabildiğince fazla manyetik alanını destekleyemez. Alan yayıldığı zaman, malzemedeki dışarı sızdığı ve dolayısıyla akı sızıntısı alanı olduğu anlaşılmaktadır (Şekil 1.10).

Eğer demir partikülleri çatlamış bir mıknatıs üzerine serpilirse, partiküller sadece mıknatısın ucundaki kutuplara değil, çatlağın kenarlarındaki kutuplara da çekilir ve kümelenir. Bu parçacık kümesinin görülmesi, gerçek çatlaktan çok daha kolaydır ve bu, manyetik parçacık incelemesinin temelini oluşturur [23].



Şekil 1.11 : Manyetik parçacık muayene çalışması

1.4.6 Ultrasonik muayene

Ultrasonik muayene, malzemedeki yüzey ve yüzeyaltı kusurlarının tespiti için malzemelere yüksek frekanslı ses dalgalarının yayıldığı bir tahribatsız yöntemdir.

Ses dalgaları, malzeme içinde bir miktar enerji kaybıyla (zayıflama) hareket eder ve arayüzlerden yansır. Yansıtılan ses dalgası, kusurların veya süreksizliklerin varlığını ve yerini tanımlamak için görüntülenir ve analiz edilir. Yansıtma derecesi büyük ölçüde arayüzü oluşturan malzemelerin fiziksel hallerine bağlıdır. Bununla beraber malzemelerin özgül fiziksel özelliklerinden de az ölçüde etkilenir. Örneğin, ses dalgaları metal-gaz arayüzlerinden tamamen yansıma yapar. Metal-sıvı veya metal-katı gibi arayüzlerde ise kısmen yansıma yapabilmektedir. Malzemelerin özelliklerine bağlı olarak bu yansıma derecesi yüzdesel olarak belirtilebilir. Çatlaklar, laminasyonlar, büzülme boşlukları, patlama, pullar, gözenekler ve yansıtıcı arayüzler üreten diğer süreksizlikler kolayca tespit edilebilir. Kalıntılar ve homojen olmayan süreksizlikler ses dalgalarının kısmen yansmasıyla ya da ses dalgalarının üzerinde tespit edilebilir başka etkiler üretilmesiyle de tespit edilebilir. Ultrasonik muayene cihazlarının çoğu aşağıdaki yöntemlerden birini izleyerek kusurları tespit edebilir:

- Sesin, metalin içindeki malzeme sınırlarından veya süreksizliklerden oluşan arayüzlerden yansması
- Ses dalgasının test parçası içinde izlediği yolun süresi
- Muayene parçası içinde absorpsiyon ve saçılma ile ses dalgalarının zayıflaması

Ultrasonik muayenelerin çoğu, yaklaşık 20 Hz ila 20 kHz olan insan işitme aralığının oldukça üzerinde olan 0,1 ila 25 MHz arasındaki frekanslarda yapılır. Ultrasonik dalgalar mekanik titreşimlerdir; metal parçalardaki titreşimlerin genliği ultrasonik olarak kontrol edilir ve elastik sınırın çok altında baskı uygular, böylelikle parçalar üzerindeki kalıcı etkileri önler. Ultrasonik muayene, tahribatsız muayene için en yaygın kullanılan yöntemlerden biridir. Metallerin incelenmesinde birincil uygulama, iç kusurların tespiti ve karakterizasyonudur; ayrıca yüzey kusurlarını tespit etmek, bağ özelliklerini tanımlamak, korozyonun kalınlığını ve boyutunu ölçmek ve fiziksel özellikleri, yapıyı, tane büyüklüğünü ve elastik sabitleri belirlemek için (daha az sıklıkla) kullanılır [24, 25].

1.4.6.1 Temel ekipmanlar

Ultrasonik muayene sistemlerinin çoğu aşağıdaki temel ekipmanları içerir:

- Elektronik olarak tetiklendiğinde alternatif voltaj patlamaları (negatif bir ani veya kare dalga) üreten elektronik bir sinyal jeneratörü
- Alternatif voltaj patlamaları uygulandığında bir ultrasonik dalga ışını yayan bir dönüştürücü (prop veya arama ünitesi)
- Ultrasonik dalgaların ışını içindeki enerjiyi muayene parçasına aktarmak için bir temas sıvısı
- Ultrasonik dalgaların muayene parçasına aktarılmasını ve test parçasından gelen dalgaların voltaj sinyallerine dönüştürülmesini sağlayan bir dönüştürücü
- Ultrasonik dalgaların (akustik enerji) çıkışını muayene parçasından alıcıya aktarmak için bir temas sıvısı
- Dönüştürücüden gelen sinyalleri güçlendirmek ve gerektiğinde düşürmek için ya da değiştirmek için kullanılan elektronik cihaz
- Muayene cihazından gelen çıkışı karakterize etmek veya kaydetmek için bir gösterge veya gösterge cihazı. Görüntüleme cihazı, bazen osiloskop olarak adlandırılan bir CRT olabilir; bir grafik veya şerit kaydedici, bir işaretleyici, gösterge veya alarm cihazı veya bir bilgisayar çıktısı olabilir.

1.4.6.2 Ultrasonik muayenenin avantajları ve dezavantajları

Metal parçaların tahribatsız muayenesi için diğer yöntemlere kıyasla ultrasonik muayenenin başlıca avantajları şunlardır:

- Parçanın derinliklerindeki kusurların algılanmasını sağlayan üstün penetrasyon gücü. Uzun çelik miller veya dövme rotor gibi parçaların eksenel muayenesinde rutin olarak birçok parça tipinde birkaç metrelik kalınlıklara ve yaklaşık 6 m kalınlığa kadar ultrasonik muayene yapılabilmektedir.
- Son derece küçük kusurların algılanmasını sağlayan yüksek hassasiyet
- İç kusurların konumunu belirleme, boyutlarını tahmin etme ve yönelimlerini, şekillerini ve yapılarını karakterize etmedeki diğer tahribatsız yöntemlerden daha yüksek doğruluk
- Sadece bir yüzeyden erişim olması yeterlidir
- Operasyon elektronik olup, neredeyse anında hataların göstergelerini sağlar. Bu, yöntemi anında yorumlama, otomasyon, hızlı tarama, hat içi üretim

izleme ve proses kontrolü için uygun hale getirir. Çoğu sistemde, ileride başvurmak üzere kalıcı bir denetim sonuçları kaydı yapılabilir.

- Bir parçanın ön yüzeyinden arka yüzeyine uzanan bir metal hacminin incelenmesini sağlayan hacimsel tarama kabiliyeti
- Operasyonlara veya yakındaki personele tehlikeli değildir ve civardaki ekipman ve malzemeler üzerinde etkisi yoktur.
- Taşınabilirlik
- Hataları karakterize etmek ve malzeme özelliklerini belirlemek için bir bilgisayar tarafından dijital olarak işlenebilen bir çıktı sağlar.

Ultrasonik muayenenin dezavantajları aşağıdakileri içerir:

- Manuel operasyon deneyimli teknisyenler tarafından dikkatle yapılmalıdır.
- Denetim prosedürlerinin geliştirilmesi için kapsamlı teknik bilgi gereklidir.
- Pürüzlü, düzensiz, çok küçük veya ince veya homojen olmayan parçaları kontrol etmek zordur.
- Hemen yüzeyin altındaki sığ bir katmanda bulunan süreksizlikler tespit edilemeyebilir.
- Proplar ve muayene edilen parçalar arasında ultrasonik dalga enerjisinin etkin bir şekilde aktarılmasını sağlamak için temas sıvısına ihtiyaç vardır.
- Hem ekipmanı kalibre etmek hem de kusurları tanımlamak için referans standartları gereklidir.

1.4.6.3 UT Uygulamaları

Metallerin ultrasonik muayenesi temel olarak süreksizliklerin tespiti için yapılır. Bu yöntem çoğu mühendislik metalindeki ve alaşımlarındaki iç kusurları tespit etmek için kullanılabilir. Kaynak, lehimleme ve yapışkanla bağlanma ile yapılan birleştirmeler de ultrasonik olarak kontrol edilebilir. Malzemeyi kabul edilebilir, kurtarılabilir veya hurda olarak izlemek ve sınıflandırmak aynı zamanda prosesini takip etmek için de teknikler geliştirilmiştir. Hem elektrikle çalışan hem de pille çalışan ticari ekipmanlar mevcuttur, dükkânda, laboratuvarında, depoda veya alanda incelemeye izin verilir. Ultrasonik muayene, tüm büyük endüstrilerde kalite kontrol ve malzeme kontrolü için kullanılır. Bu, elektrikli ve elektronik bileşen üretimini içerir. Aynı zamanda metalik ve kompozit malzemelerin üretimi ve uçak gövdeleri, boru ve basınçlı kaplar, gemiler, köprüler, motorlu taşıtlar, makineler ve

jet motorları gibi yapıların imalatını da içermektedir. Koruyucu bakım için hizmet içi ultrasonik muayene, demiryolu haddeleme-stok akslarının, pres kolonlarının, hafriyat ekipmanlarının, değirmen rulolarının, madencilik ekipmanlarının, nükleer sistemlerin ve diğer makinelerin ve bileşenlerin olası hatalarını tespit etmek için kullanılır.

Hataların varlığı için ultrasonik olarak denetlenen başlıca ekipman türlerinden bazıları şunlardır:

- Değirmen bileşenleri: Rulolar, miller, tahrikler ve pres kolonları
- Güç ekipmanı: Dövme türbin parçaları, jeneratör rotorları, basınçlı borular, kaynaklar, basınçlı kaplar, nükleer yakıt elemanları ve diğer reaktör bileşenleri
- Jet motor parçaları: Türbin ve kompresör dövme ve dişli boşlukları
- Uçak parçaları: Dövme ürünler, çerçeve parçaları ve bal peteği sandviç takımları
- Makine malzemeleri: Kalıp blokları, takım çelikleri ve sondaj borusu
- Demiryolu parçaları: Akslar, tekerlekler, palet ve kaynaklı ray
- Otomotiv parçaları: Dövme demirler, küresel grafitlik dökümler ve lehimli ve/veya kaynaklı bileşenler

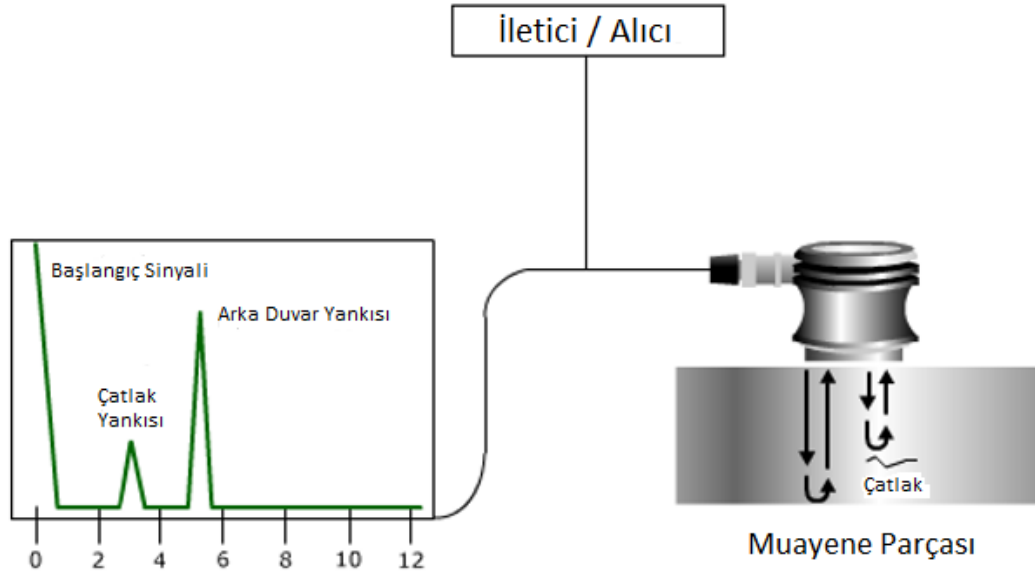
Tespit edilecek kusurlar boşlukları, çatlakları, kapanımları, boruları, laminasyonları ve lamelleri içerir. Hammaddelerin doğasında bulunabilirler, üretim ve ısıl işlemde kaynaklanabilirler veya yorgunluk, darbe, aşınma, korozyon veya diğer nedenlerden dolayı işletme anında da olabilirler.

Ultrasonik muayene ayrıca metal parçaların kalınlığını ölçmek için de kullanılabilir. Rafineri ve kimyasal işlem ekipmanları, çelik dökümler, denizaltı gövdeleri, uçak bölümleri ve basınçlı kaplarda kalınlık ölçümleri yapılır. Kalınlık ölçümleri için çeşitli ultrasonik teknikler mevcuttur; bunların çoğu dijital olarak kalınlığı görüntüler. Kalınlığı milimetrenin binde biri ve birkaç metre arasında değişen yapısal malzemeleri % 1'den daha iyi doğruluklarla ölçülebilir. Ultrasonik muayene yöntemleri, kimyasal işleme ekipmanı gibi kapalı sistemlerdeki korozyon kaynaklı kalınlık kaybının değerlendirilmesi için özellikle uygundur. Bu tür ölçümler genellikle işlemi kapatmadan yapılabilir. Yorulma çatlaklarının büyüme hızı, elastisite modülü ölçümü, dökme demirlerde küreselliğin incelenmesi ve metalürjik olarak araştırmalar yapılabilmesi için özel ultrasonik teknikler ve ekipmanlar

kullanılmaktadır. Ultrasonik muayenenin başarılı bir şekilde uygulanabilmesi için, muayene sistemi yapılan muayene türüne uygun olmalı ve operatör yeterince eğitilmiş ve deneyimli olmalıdır. Bu önkoşullardan herhangi biri yerine getirilmezse, denetim sonuçlarında ağır hata potansiyeli yüksektir. Örneğin, uygun olmayan ekipmanla ya da iyi eğitilmemiş bir operatörle, ürün performansına çok az ya da hiç sahip olmayan süreksizlikler ciddi sayılabilir ya da zarar veren süreksizlikler tespit edilemez veya önemsiz sayılabilir. Bir parçanın bir veya daha fazla kusur içermesi, parçanın şartnameye uygun olmadığı veya kullanım için uygun olmadığı anlamına gelmez. Parçaları kabul etme veya reddetme kararlarının, verilen bir hatanın hizmet ömrü veya ürün güvenliği üzerindeki olası etkisine dayanması için standartların oluşturulması önemlidir[24].

1.5 Darbe-yankı yöntemi

Darbe-yankı incelemesinde, düzenli aralıklarla bir test parçasına kısa ultrasonik dalgalar (darbeler) gönderilir. Eğer darbeler yansıtıcı bir yüzeye rastlarsa, enerjinin bir kısmı veya tamamı yansıtılır. Yansıtılan enerjinin oranı, olaydaki ultrasonik ışınının boyutuna göre yansıtıcı yüzeyin büyüklüğüne büyük ölçüde bağlıdır. Yansıtılan ses dalgasının (eko) yönü, yansıtıcı yüzeyin, gelen ışının yönüne bağlıdır. Yansıyan sinyal izlenir; hem belirli bir yöne yansıyan sinyal miktarı hem de ilk darbenin iletilmesi ile yankı alımı arasındaki zaman gecikmesi ölçülür (Şekil 1.12) [25].



Şekil 1.12 : Darbe-yankı yönteminin çalışma prensibi

1.5.1 Darbe-yankı yöntemlerinin ilkeleri

Çoğu darbe-yankı sistemleri şunları içerir:

- Elektronik sinyal üretici veya pulser
- Sinyal gönderici prop
- Sinyal alıcı prop
- Yankı sinyali güçlendirici
- Görüntüleme cihazı

Darbe-yankı sistemlerinin en yaygın kullanılan sürümünde, tek bir dönüştürücü alternatif olarak gönderme ve alma probu olarak işlev görür. Saat ve sinyal üretici genellikle tek bir elektronik üniteye birleştirilir. Sık sık, dönüştürücünden gelen yankı sinyallerini yükselten ve düşüren devreler aynı üniteye bulunur. Düzenli aralıklarla, elektronik saat, yüksek frekanslı alternatif voltajın kısa bir aralığını ya da transdüser tek kutuplu (negatif) bir ani yükselme uygulayan sinyal üreticini tetikler. Eşzamanlı olarak, saat ekran cihazına bağlı bir zaman ölçme devresini harekete geçirir. Operatör darbe gönderme aralıklarını seçebilir, genellikle saniyede 60 ila 2000 darbe gönderilir. Ticari olarak temin edilebilen bir çok hata dedektöründe, darbe tekrarlama oranı bazı büyük sistemler hariç otomatik olarak kontrol edilir. Operatör ayrıca sinyal üreticisinin çıkış frekansını da seçebilir. Dönüştürücü prop daha sonra voltaj darbesini, esasen uygulanan alternatif voltaj ile aynı frekansa sahip mekanik titreşim

darbesine dönüştürür. Mekanik titreşim (ultrason), bir test parçası içine bir temas sıvısı yoluyla verilir ve malzemeye bağlı olan ses hızında test parçası boyunca dalga hareketi ile hareket eder. Ultrasonun darbesi, transfer yönüne dik olan yansıtıcı bir yüzeyle karşılaştığında, ultrasonik darbe yansıtılır ve dönüştürücüye geri döner. Geri dönen darbe, aynı yol boyunca ve iletilen darbe ile aynı hızda, ancak ters yönde hareket eder. Dönüştürücüye temas sıvısı içinden ulaştığında geri dönen darbe, dönüştürücü elemanının titreşmesine neden olur, bu da dönüştürücü boyunca alternatif bir elektrik voltajı oluşturur. İndüklenen voltaj anlık olarak yükseltilir (ve bazen düşürülür), sonra görüntüleme cihazına aktarılır. Bu işlem her ultrasonik darbe için tekrarlanır [24, 25].

1.5.1.1 Dönüştürücü elementler

Muayene için ultrasonik dalgaların üretilmesi ve algılanması, bir temas sıvısı içinden geçen bir dönüştürücü eleman vasıtasıyla gerçekleştirilir. Dönüştürücü eleman genellikle prop olarak adlandırılır. Piezoelektrik elemanlar ultrasonik muayenede en yaygın kullanılan dönüştürücüdür, ancak EMA (elektromanyetik akustik) dönüştürücüleri de kullanılır.

1.5.1.2 Piezoelektrik dönüştürücüler

Piezoelektrik, basınçla uyarılmış elektriktir; bu özellik, doğal olarak oluşan bazı kristalin bileşiklerin ve bazı insan yapımı malzemelere özgüdür. Piezoelektrik adından da anlaşılacağı gibi, basınç uygulandığında kristal tarafından elektrik yükü artar. Buna karşılık, bir elektrik alan uygulandığında, kristal mekanik olarak şekil değiştirir [24]. Piezoelektrik kristalleri çeşitli deformasyon modları sergiler; kalınlık genişmesi, transdüserlerde ultrasonik muayene için kullanılan ana modlardan biridir (Şekil 1.13).



Şekil 1.13 : Deneyde kullanılan piezoelektrik dönüştürücü

1.5.1.3 Temas sıvıları

Hava, megahertz frekanslarında ses dalgaları çok zayıf olarak transfer etmektedir ve hava ile çoğu katı arasındaki empedans uyumsuzluğu, çok ince bir hava tabakasının bile ses dalgalarının dönüştürücüden muayene parçasına geçişini ciddi şekilde geciktirecek kadar büyüktür. Piezoelektrik dönüştürücülerle tatmin edici bir muayene yapmak için, dönüştürücü ile muayene parçası arasındaki havayı bir temas sıvısı kullanarak ortadan kaldırmak gerekir. Normalde temas kontrolü için kullanılan sıvılar su, yağlar, gliserin, petrol gresleri, silikon gres, duvar kâğıdı macunu ve çeşitli ticari tutkal kıvamındaki maddeleri içerir.

Bir temas sıvısı seçiminde aşağıdakiler göz önünde bulundurulmalıdır:

- Muayene parçasının son yüzey durumu
- Muayene parçasının sıcaklığı
- Temas sıvısı ile muayene yüzeyinin arasında oluşabilecek kimyasal reaksiyonlar
- Temizleme gereksinimleri

Su, nispeten pürüzsüz bir yüzeyde kullanım için uygun bir temas sıvısıdır; bununla birlikte, bir ıslatıcı madde eklenmesi gerekmektedir. Viskoziteyi arttırmak için gliserin eklemek bazen uygundur; fakat gliserin alüminyumda korozyona neden olma eğilimindedir ve bu nedenle havacılık uygulamalarında önerilmez. Ağır yağ veya gres, sıcak veya dikey yüzeylerde veya düzensizliklerin doldurulması gereken sert yüzeylerde kullanılmalıdır. Duvar kâğıdı tutkalı, arka plan gürültüsünü en aza

indirmek için iyi bir bağlantı gerektiğinde özellikle pürüzlü yüzeylerde yararlıdır. Su, karbon çeliği muayene parçalarıyla kullanmak için iyi bir temas sıvısı değildir, çünkü yüzey aşınmasına neden olabilir. Aşındırıcı olmayan nitelikteki yağlar, gresler ve tescilli macunlar kullanılabilir. Ağır yağ, gres veya duvar kâğıdı macunu, su yeterli olduğunda, bu maddelerin çıkarılması daha zor olduğu için iyi seçenekler olmayabilir. Duvar kâğıdı macunu gibi havaya maruz kaldığında sertleşen temas sıvıları tel fırçayla kolayca ayrılabilir. Yağ ya da gres sıklıkla solventlerle çıkarılmalıdır. Muayenede kullanılan temas sıvıları, tutarlı bir kontrol sonucu elde etmek için düzgün, ince bir kaplama olarak uygulanmalıdır [26].

1.6 Küresel Grafitli Dökme Demirlerde UT Muayene Uygulamaları

1.6.1 Yüzealtı hataların tespit edilmesi

Küçük şişirme delikleri, iğne delikleri veya döküm yüzeyinin 3 veya 4 mm derinliklerinde meydana gelen kalıntılar gibi kusurları tespit etmek en zor olanlardır. Geleneksel manyetik parçacık yöntemlerinin hassasiyet sınırlarının ötesindedir ve girdap akımı teknikleriyle kolayca tanımlanamazlar. Doğrudan döküm yüzeyine uygulanan geleneksel tek kristalli ultrasonik problemlerin ölü bölgesi (kontrol edilemeyen yüzey katmanı) içine düşerler, ancak yüzeyin çok altında olmayan derinliklere odaklanan çift kristal problemler kullanılarak bir miktar iyileştirme elde edilebilir. Bir diğer çözüm de açılı prob kullanmaktır. Fakat bu durum daha nitelikli operatörler gerektirir ve değerlendirmesi daha zor ölçümler alınmaktadır.

1.6.2 İç hataların tespit edilmesi

Ultrasonik muayene, dökümlerde iç kusurların tespiti için iyi bilinen bir yöntemdir. Muayene ekipmanı gelişmeleri, otomatik muayene prosedürleri ve kusurların büyüklüğünü ve konumunu belirleme konusundaki gelişmeler, varlıklarının dökümün çalışma performansını büyük olasılıkla etkileyip etkilemeyeceğini değerlendirmek için esas olduğundan, ultrasonik test ekipmanlarının kullanımının artmasına katkıda bulunmuştur. Kusurların konumunu ve boyutunu belirlemek için, ultrasonik verilerin sunumunun olağan yöntemi, A-taramasıdır, burada kusurlardan gelen yankıların genliği, bir zaman bazında gösterilir ve iyi bilinen sınırlamalara sahiptir. Boyutlandırma, sinyal bir kusurun sınırından geçerken yankının genliğindeki düşüşün veya arka duvar yankısının yankısındaki azalmanın

ölçülmesine dayanır. Çoğu durumda, boyutlandırma yaklaşıktır ve bir veya iki boyutla sınırlıdır [24, 25].

1.6.3 Yapısal değerlendirme

Yapısal değerlendirme, dökümhane mühendisleri için artan bir önem alanıdır. Ultrasonik hız ölçümleri, grafit yapısının küreselliğini garanti etmek için bir araç olarak ve matris yapısının tutarlı olduğu biliniyorsa, küresel grafitli dökme demirlerin temel malzeme özelliklerini garanti etmek için yaygın olarak kullanılır. İstenen özelliklerin tutarlı bir şekilde elde edilmesini sağlamak için küresel grafit demir yapılarını değerlendirmek için hız ölçümleri kullanılmıştır. Boylamasına ultrasonik ses dalgalarının malzeme içinde ilerlemesinin hızı elastisite modülü E, poisson oranı μ ve yoğunluk ρ parametreleriyle denkleştirilmiştir [24, 27, 28].

$$V_l = \sqrt{\frac{E(1 - \mu)}{\rho(1 + \mu)(1 - 2\mu)}} \quad (1.1)$$

E: Elastisite Modülü, N/m²

ρ : Yoğunluk, kg/m³

μ : Poisson' Oranı

Ayrıca ASTM E494 standartında mühendislikte kullanılan malzeme türlerinin ses hızları liste halinde verilmiştir. Standartta verilen ses hızları malzemelerin ayırt edilmesinde referans olarak kullanılabilir. Çeliklerin ses hızları 5900 m/s'lere ulaşırken geleneksel dökme demirler 4500 m/s'lerdedir. Küresel grafitlik dökme demirlerde elde edilen sonuçların çelik malzemelere yakın olması teorik olarak beklenmektedir. Pratik olarak yapılan ultrasonik muayene yöntemi ile değerlendirme sonuçları da bu teoriyi desteklemektedir. Bazı mühendislik malzemelerinin ses hızları çizelge 1.1'de verilmiştir [6].

Çizelge 1.1 : ASTM E494 standartına göre malzemelerin ses hızları

Malzeme	Ses Hızı (m/s)
---------	----------------

Dökme Demirler	3500-5600
Çelik	5900
Titanyum	6240
Alüminyum	6300

1.6.4 Grafit yapısının doğrulanması

Hem ultrasonik iletim hızı hem de bir dökümün rezonans frekansı elastisite modülü ile ilgili olabilir. Dökme demirde, lamel grafitten küresel grafitte geçiş hem elastisite modülünün hem de mukavemet modülünün artmasıyla ilgilidir; bu nedenle, ultrasonik hız veya rezonans frekans ölçümü, küresellik, mukavemet ve diğer ilgili özelliklere bir rehber olarak kullanılabilir. Küreselliğin mikroskopik olarak değerlendirilmesi öznel bir ölçüm olduğundan, bu tahribatsız inceleme yöntemleri, matrisin sabit kalması koşuluyla bazı özellikler için daha iyi bir değerlendirme sağlayabilir [24, 27, 29].

1.7 Literatürde Gerçekleştirilmiş Çalışmalar

Alternatif bir karakterizasyon yaklaşımı olan tahribatsız muayene yöntemlerinin (Örneğin; ultrasonik muayene ve girdap akımları) kullanılması ile malzemelerin (özellikle; KGDD malzemeler) gerek mikroyapı gerekse de mekanik özelliklerin tespiti ve analizi çalışmaları son yıllarda yaygın bir şekilde çalışılmaya devam etmektedir.

Türkiye’de Gür ve arkadaşları, farklı ısıl işlemlere tabi tuttıkları kendi dökümleri olan küresel grafitli dökme demir malzemelerin ultrasonik test metoduyla mekanik özelliklerinin incelenmesi üzerine bir çalışma gerçekleştirmiş ve literatüre kazandırmıştır. Bu çalışmada elde edilen hız değerleri ve sinyal düşüşü ölçümleri ile nodularite oranları arasında bir korelasyon elde etmiştir [30].

Lee ve arkadaşları da ultrasonik yöntemle ses hızlarının küresel grafitli dökme demirlerde elastisite modülü gibi malzemenin mekanik karakteristik özelliğiyle olan ilişkisini incelemiştir. Bu konu hakkında birçok çalışmada kaynağı olan çalışma teorik kökenlere inmiştir [27].

Ortowicz ve arkadaşları küresel grafitli dökme demirlerdeki mikroyapı değişikliklerini ultrasonik yöntemlerle tespit etmeye çalışmıştır. Bu çalışmada ses dalgalarının mikroyapı içindeki davranışı incelenmiş tane sınırlarına, ısıl işlemlere ve matris dağılımına göre nasıl değişiklik gösterdiğini tespit edilmiştir [28].

Collins ve arkadaşları da yine aynı şekilde ultrasonik yöntemler ile ses hızı-nodularite arasındaki ilişkiyi açıklamak için birtakım çalışmalar yapmıştır. Çalışma sonucunda hız ve nodularite arasında açık bir ilişkiye rastlarken, matris faz dağılımının ses hızı üzerindeki etkisi hakkında belirgin bir kanıya ulaşamamıştır [31].

Belan, çalışmasında önceden belli olmayan dökme demir numunelerinin tanımlanmasında ultrasonik yöntemleri kullanmıştır. Lamel grafitli, vermiküler ve küresel grafitli dökme demir numunelerini ultrasonik davranışlarına göre tanımlayabilmiştir [32].

Yukarıdaki çalışmalar ışığında bu konu hakkında güncel bir çalışma gerçekleştirerek, Döktaş işletmesinde üretilen ve farklı küresellik değerlerine sahip, metal kalıba döküm ile üretilen numunelerin, gelişen teknolojinin de yardımıyla küresellik oranı analizinde ultrasonik muayene yönteminin kullanılması ve literatürüne katkı sağlamak amaçlanmıştır. Literatürdeki çalışmalar değerlendirildiğinde, ultrasonik muayene yönteminin küresellik tayininde kullanılmasının yaygınlaştırılması hedeflenmektedir. Dahası elde edilen sonuçların literatürle karşılaştırılması hedeflenmiştir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada, küresel grafitli dökme demir numulerinin, darbe-yankı yöntemi kullanarak kalınlıkları ölçülmüş, ölçülen değerler kullanılarak formül yardımıyla ses hızları hesaplanmıştır. Ses hızlarıyla, gözle ve mikroskop yazılımlarıyla tayin edilmiş küresellik oranları karşılaştırılmıştır. Ayrıca numuneler arasından körleme yapılarak seçilen 7 numunede Taramalı Elektron Mikroskobu ve Enerji Dağılım Spektroskopisi analizleri yapılmıştır.

2.1 Darbe-Yankı Yöntemi ile Kalınlık Ölçümü ve Ses Hızlarının Hesaplanması

Darbe-yankı yöntemi kalınlık ölçümünde kullanılan ve doğru sonuçlar veren bir yöntemdir. Yöntemin çalışma prensibi nedeniyle kalınlık ölçümü bize aynı zamanda ses hızlarını hesaplama olanağı sağlar.

2.1.1 Deney numuneleri

Bu tez çalışmasında farklı küreselliklere sahip olduğu tespit edilmiş, hali hazırda dökümhanede üretimi yapılan küresel grafitli dökme demir numunelerinden 23 tane kullanılmıştır [33]. Bu çalışmanın amaçlarından biri olan, güncel olarak üretimi yapılan dökme demirlerden ölçüm almak için tercih edilen bu numuneler, yine bu nedenle farklı kalınlıklara ve kompozisyonlara sahiptir. Döktaş A.Ş. tarafından sağlanmış olan numunelerin yine Döktaş A.Ş. tarafından paylaşılmış olan kimyasal kompozisyonları aşağıdaki tabloda verilmiştir. Numunelerin mekanik özellikleri de Döktaş A.Ş. tarafından paylaşılmıştır. Numuneler ayrıca görüntü analiz programları kullanılarak mikroskop altında da incelenmiştir. Görüntü analiz programıyla tayin edilen küresellik oranlarıyla da karşılaştırma yapılmıştır. Numunelerin kalınlıkları 8-12 mm arasında değişmektedir ve üst yüzeyleri mikroskopla inceleme yapılabilmesi için parlatılmıştır. Numunelerde dağlama ve ısıtma işlemi uygulanmamıştır. Yüzeyin parlatılmış olması ultrasonik muayene uygulaması için de uygun bir ortam oluşturmuştur.

Çizelge 2.1 : Küresel grafitli dökme demir numunelerinin kimyasal bileşimi [34].

Numune No	Kimyasal Bileşim (Ağırlık. %)							
	%C	%Si	%Mn	%Cr	%S	%P	%Cu	%Mg
1	3.60-	2.10-	0.30-	0.08	0.008-	0.08	0.25-	0.035-
	3.70	2.40	0.35	Maks.	0.025	Maks.	0.35	0.045
2	3.70-	1.40-	0.25	0.08	0.008-	0.08	0.20	0.035-
	3.80	1.70	Maks.	Maks.	0.025	Maks.	Maks.	0.045
3	3.60-	2.10-	0.35-	0.08	0.008-	0.08	0.35-	0.035-
	3.70	2.40	0.45	Maks.	0.025	Maks.	0.50	0.045
4	3.70-	1.40-	0.25	0.08	0.008-	0.08	0.20	0.035-
	3.80	1.70	Maks.	Maks.	0.025	Maks.	Maks.	0.045
5	3.60-	2.10-	0.30-	0.08	0.008-	0.08	0.40-	0.035-
	3.70	2.40	0.35	Maks.	0.025	Maks.	0.50	0.045
6	3.70-	1.50-	1.40-	0.30-	0.008-	0.08	0.25-	0.035-
	3.80	1.70	1.60	0.35	0.025	Maks.	0.35	0.045
7	3.70-	1.50-	1.40-	0.30-	0.008-	0.08	0.25-	0.035-
	3.80	1.70	1.60	0.35	0.025	Maks.	0.35	0.045
8	3.60-	2.10-	0.30-	0.08	0.008-	0.08	0.25-	0.035-
	3.70	2.40	0.35	Maks.	0.025	Maks.	0.35	0.045
9	3.45-	2.10-	0.40-	0.08	0.008-	0.08	0.45-	0.035-
	3.55	2.40	0.50	Maks.	0.025	Maks.	0.55	0.045
10	3.60-	2.10-	0.30-	0.08	0.008-	0.08	0.25-	0.035-
	3.70	2.40	0.35	Maks.	0.025	Maks.	0.35	0.045
11	3.60-	2.10-	0.30-	0.08	0.008-	0.08	0.25-	0.035-
	3.70	2.40	0.35	Maks.	0.025	Maks.	0.35	0.045
12	3.30-	2.70-	0.35	0.08	0.008-	0.05	0.20	0.040-
	3.40	3.20	Maks.	Maks.	0.025	Maks.	Maks.	0.060
13	3.45-	2.10-	0.40-	0.08	0.008-	0.08	0.45-	0.035-
	3.55	2.40	0.50	Maks.	0.025	Maks.	0.55	0.045
14	3.70-	1.40-	0.25	0.08	0.008-	0.08	0.20	0.035-
	3.80	1.70	Maks.	Maks.	0.025	Maks.	Maks.	0.045
15	3.65-	1.40-	0.35-	0.08	0.008-	0.08	0.85-	0.035-
	3.75	1.80	0.45	Maks.	0.025	Maks.	1.00	0.045
16	3.70-	1.40-	0.25	0.08	0.008-	0.08	0.20	0.035-
	3.80	1.70	Maks.	Maks.	0.025	Maks.	Maks.	0.045
17	3.70-	1.40-	0.25	0.08	0.008-	0.08	0.20	0.035-
	3.80	1.70	Maks.	Maks.	0.025	Maks.	Maks.	0.045
18	3.60-	2.10-	0.30-	0.08	0.008-	0.08	0.25-	0.035-
	3.70	2.40	0.35	Maks.	0.025	Maks.	0.35	0.045
19	3.60-	2.10-	0.30-	0.08	0.008-	0.08	0.25-	0.035-
	3.70	2.40	0.35	Maks.	0.025	Maks.	0.35	0.045
20	3.10-	3.15-	0.35	0.08	0.008-	0.05	0.20	0.040-
	3.20	3.55	Maks.	Maks.	0.025	Maks.	Maks.	0.060
21	3.70-	1.40-	0.25	0.08	0.008-	0.08	0.20	0.035-
	3.80	1.70	Maks.	Maks.	0.025	Maks.	Maks.	0.045
22	3.70-	1.40-	0.25	0.08	0.008-	0.08	0.20	0.035-
	3.80	1.70	Maks.	Maks.	0.025	Maks.	Maks.	0.045
23	3.60-	2.10-	0.30-	0.08	0.008-	0.08	0.25-	0.035-
	3.70	2.40	0.35	Maks.	0.025	Maks.	0.35	0.045

Çizelge 2.2 : Küresel grafitli dökme demir numunelerinin mekanik özellikleri[34].

Numune No	Mekanik Özellikler		
	Sertlik	Çekme Dayanımı	% Uzama
1	190-205 HB	Min. 600 MPa	Min. % 10
2	195-210 HB	Min. 500 MPa	Min. % 7
3	220-230 HB	Min. 690 MPa	Min. % 8
4	155-165 HB	Min. 400 MPa	Min. % 15
5	230-240 HB	Min. 690 MPa	Min. % 8
6	205-215 HB	Min. 600 MPa	Min. % 10
7	200-210 HB	Min. 600 MPa	Min. % 10
8	185-200 HB	Min. 600 MPa	Min. % 10
9	225-235 HB	Min. 690 MPa	Min. % 8
10	190-200 HB	Min. 600 MPa	Min. % 10
11	195-205 HB	Min. 600 MPa	Min. % 10
12	195-210 HB	Min. 600 MPa	Min. % 14
13	195-215 HB	Min. 690 MPa	Min. % 8
14	150-155 HB	Min. 410 MPa	Min. % 15
15	265-280 HB	Min. 410 MPa	Min. % 15
16	170-175 HB	Min. 410 MPa	Min. % 15
17	170-180 HB	Min. 410 MPa	Min. % 15
18	190-205 HB	Min. 600 MPa	Min. % 10
19	180-190 HB	Min. 600 MPa	Min. % 10
20	215-220 HB	Min. 580 MPa	Min. % 12
21	165-170 HB	Min. 410 MPa	Min. % 15
22	165-175 HB	Min. 410 MPa	Min. % 15
23	185-195 HB	Min. 600 MPa	Min. % 10

2.1.2 Deney ekipmanları

2.1.2.1 Ölçüm cihazı ve dönüştürücü

Küresel grafitli dökme demir numunelerinin ölçümünde “Starmans Dio 1000” marka ve modele sahip olan ultrasonik hata ölçüm ve görüntüleme cihazı kullanılmıştır. Dönüştürücü olarak piezoelektrik tek kristalli prop kullanılmıştır. Prop “Siui DM10-6L” marka çapı 6mm, çalışma frekansı 10Mhz olarak seçilmiştir. Ayrıca prop üzerinde sinyal geciktirici bir aparat kullanılmıştır. Bu aparatın başlıca görevi numune üzerinde daha iyi ölçüm alabilmek için ultrasonik muayenelerde ortaya çıkan yakın alan etkisini en aza indirmektir. Çünkü dökme demirlerde ses dalgaları çok fazla dağılma eğilimi göstermektedir.

Yakın alan etkisi:

Prob kristalinin hemen önündeki sıfır noktası ile ses basıncının en yüksek olduğu nokta arasındaki mesafe yakın alan mesafesidir. Yakın alan içerisindeki ses dalgaları düzensizlik eğilimi gösterirler bu nedenle doğru sonuç veren ölçümler almak zorlaşır.

2.1.2.2 Kalibrasyon bloğu

Çalışmada doğru ölçümlerin yapılabilmesi için ultasonik cihazın öncelikle kalibrasyon işleminden geçerek ayarlanması gerekmektedir. Bu kalibrasyon işlemi için 1018 karbon çeliği malzemeden üretilmiş basamaklı kalibrasyon bloğu kullanılmıştır [35]. Kalibrasyon bloğu 12,5 mm ila 2,5 mm kalınlıkları arasında beş basamağa sahiptir (Şekil 2.1).



Şekil 2.1 : Kullanılan kalibrasyon bloğu

2.1.3 Deneyin yapılışı

Çalışmada kullanılan numunelerin kalınlıkları dijital kumpas ile ölçüldü. Kalınlık ölçümü yapıldıktan sonra ultrasonik cihaz kullanımı aşamasına geçildi. İlk olarak cihazın doğru ölçüm yapıp yapımadığını doğrulamak için I.M.S markalı ASTM E797 5A basamak kalibrasyon bloğu ile kalibrasyon işlemi yapıldı (Şekil 2.2). Kalibrasyon işleminde blok üzerinde bulunan iki farklı basamak ölçüsü alınmış ve aradaki kalınlık farkı ölçüldü. 12,5 mm ila 7,5 mm arasında kalibrasyon yapıldı. Bu kalibrasyon bize 12,5 mm ila 7,5 mm yapılan ölçümlerde daha doğru sonuçlar vermektedir. Kalibrasyon işlemi tamamlandığında UT cihazı kalibrasyon bloğunun yani 1018 karbon çeliğinin ses hızını verir. Bu ses hızı hesaplamalarda kullanılmak üzere kayıt altına alınır. Ses hızı kaydedildikten sonra sıra numuneler üzerinden ölçüm almaya gelir. Numunelerin seçilen beş noktasından kalınlık ölçümü alınır (Şekil 2.3). Kalibrasyon ve numune ölçümlerinde temas sıvısı olarak şanzıman yağı kullanılmıştır. Bu sayede prop ile numune yüzeyinde oluşabilecek temassızlıklar giderildi. Beş farklı bölgeden alınan ölçümler kaydedildi ve ortalaması alındı.



Şekil 2.2 : Kalibrasyon işleminin yapılışı



Şekil 2.3 : Numunelerin kalınlık ölçümlerinin yapılması

Bu deneyde kalibrasyon karbon çeliği için yapıldığından, küresel grafitli dökme demirlerde alınan sonuçlar gerçek kalınlık sonuçlarını yansıtmayacaktır. Bu noktada basit bir orantı denkleminde yararlanıldı. Bu formülde bilinen değerler kullanılarak küresel grafitli dökme demirlerin ses hızları hesaplanabilmektedir.

$$T_{mp} = T_{kal} \times \frac{c_{mp}}{c_{kal}} \quad (2.1)$$

T_{mp} = Numunenin kumpas ile ölçülen gerçek kalınlığı (mm)

T_{kal} = Cihaz ile ölçülen kalınlık (mm)

c_{mp} = Numunenin ses hızı (m/s)

c_{kal} = Kalibrasyon bloğunun ses hızı (m/s)

Yukarıdaki formülden yola çıkarak numunelerin ses hızları hesaplanmıştır. Hesalanan ses hızları ile numunelerin metalografik incelemesiyle tespit edilen küresellikleri karşılaştırılmış ve sonuçları değerlendirilmiştir.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

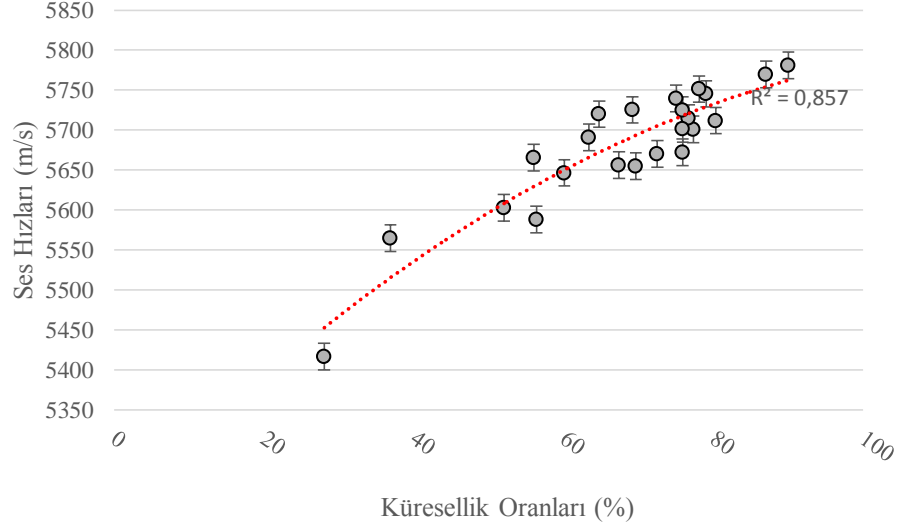
3.1 Ölçüm Sonuçları

Çalışmada kullanılan darbe-yankı metoduyla kalınlık ölçümü yapılan numunelerin ses hızları formül (2.1) ile hesaplanmış ve çizelge haline getirilmiştir. Görüntü analiz yazılımıyla da elde edilen küresellik oranları karşılaştırılmıştır. (Çizelge 3.1)

Çizelge 3.1 : Küresel grafitli dökme demir numunelerinin ses hızları

Numune	Küresellik %	Gerçek ölçü	Cihaz ölçüsü	Ses hızı (m/s)
1	90,06	10,960	11,250	5781
15	87,08	10,460	10,758	5770
10	80,36	9,980	10,368	5712
12	79,07	9,870	10,194	5745
2	78,12	9,320	9,616	5751
14	77,34	9,340	9,722	5701
22	76,76	11,230	11,660	5715
19	75,94	11,240	11,698	5702
18	75,91	10,850	11,350	5673
20	75,91	9,040	9,370	5725
23	75,07	10,930	11,300	5740
17	72,56	8,650	9,052	5670
13	69,66	9,360	9,822	5655
11	69,23	9,990	10,354	5725
21	67,42	10,480	10,994	5657
3	64,79	9,090	9,430	5720
4	63,43	11,520	12,012	5691
16	60,14	10,140	10,656	5647
6	56,41	10,220	10,852	5588
5	56,05	10,420	10,914	5665
7	52,05	10,060	10,654	5603
8	36,9	9,810	10,460	5565
9	28,05	10,330	11,316	5417

Yukarıda verilen Çizelge 3.1’de numuneler görüntü analiz yazılımıyla elde edilen küresellik oranlarına göre sıralanmıştır. Kumpas ile ölçülen kalınlıklar “Gerçek kalınlık”, UT cihazı ile ölçülen kalınlık “Cihaz ölçüsü” olarak belirtilmiştir. Çizelge 3.1’de bulunan veriler grafik haline getirilmiş ve Şekil 3.1’de sunulmuştur.

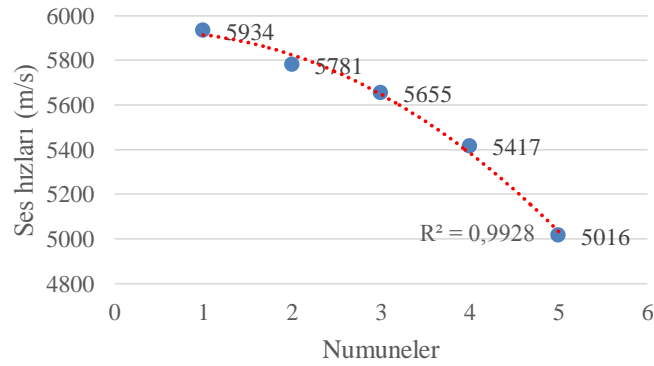


Şekil 3.1 : Küresel dökme demir numunelerinin ses hızları değişimi

Numunelerin birbirleri arasındaki karşılaştırma yapıldıktan sonra en yüksek, orta ve en düşük küresellik oranlarına sahip numuneler kalibrasyon bloğunun ve küresel grafitli olmayan numunenin ses hızıyla karşılaştırıldı (Çizelge 3.2).

Çizelge 3.2 : Kalibrasyon bloğu ve küresel grafitli olmayan dökme demirin ses hızlarının karşılaştırılması

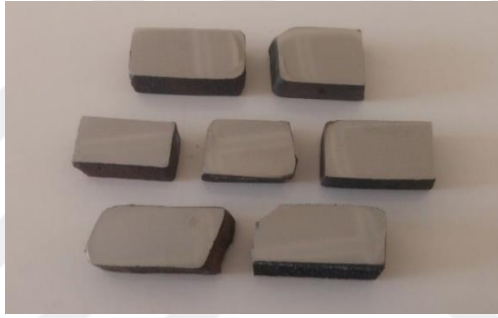
Numune	Küresellik %	Gerçek ölçü	Cihaz ölçüsü	Ses hızı
1018	-	12,5	12,5	5934
1	90,06	10,96	11,25	5781
13	69,66	9,36	9,822	5655
9	28,05	10,33	11,316	5417
Küresel Olmayan	-	8,8	10,44	5016



Şekil 3.2 : Ses hızı değişimlerini gösteren grafik.(Numune 1: %90,06, Numune 13: % 69,66 ve Numune 9: 28,05 küresellik oranına sahip)

3.2 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve Enerji Dağılımı Spektrometrisi (EDS) Sonuçları

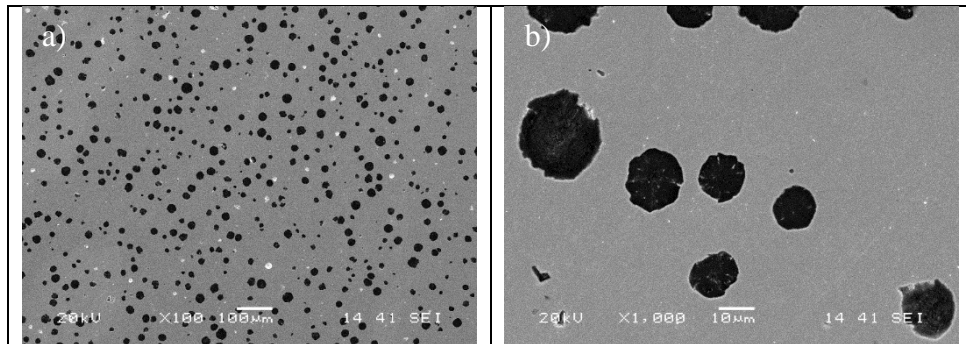
Numune havuzundan körleme seçim yapılarak seçilen 7 adet numune SEM ve EDS yöntemleriyle analiz edilmiştir (Şekil 3.4). Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve EDS analizleri Sakarya Üniversitesi laboratuvarlarındaki JEOL marka JSM-6060LV model SEM cihazı ile yapılmıştır. SEM analizinde görüntüler numune üzerinde rastgele seçilen bölgelerden x100 ve x1000 olmak üzere 2 büyütme olarak x100 büyütme alınıp, x100 büyütmedeki görüntü bölgesi üzerinden x1000 büyütmede büyütme görüntüsü alınmıştır. EDS analizinde ise numune üzerinde seçilen rastgele bölgenin x100 büyütmede görüntünün kapladığı alanın tamamını kapsayacak şekilde bölgesel kimyasal kompozisyon analizi yapılmıştır (Çizelge 3.3)



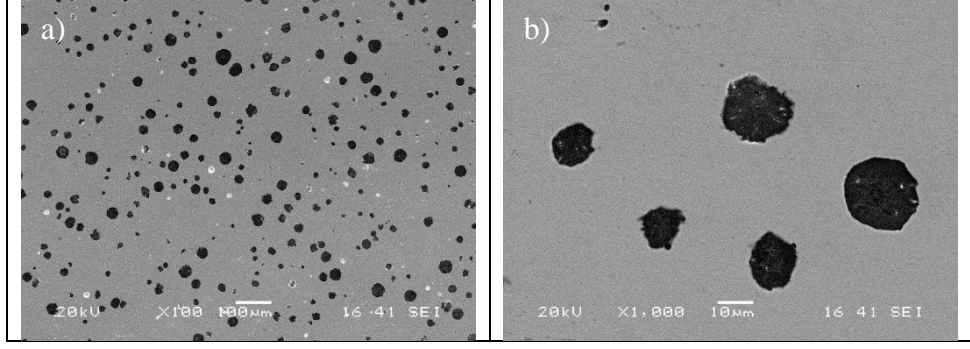
Şekil 3.3 : Çalışma kapsamında optik mikroskoplarla analizi yapılan 23 numune içerisinde rastgele seçilmiş 7 küresel grafitli dökme demir numunesi

3.2.1 Taramalı elektron mikroskobu (SEM) sonuçları

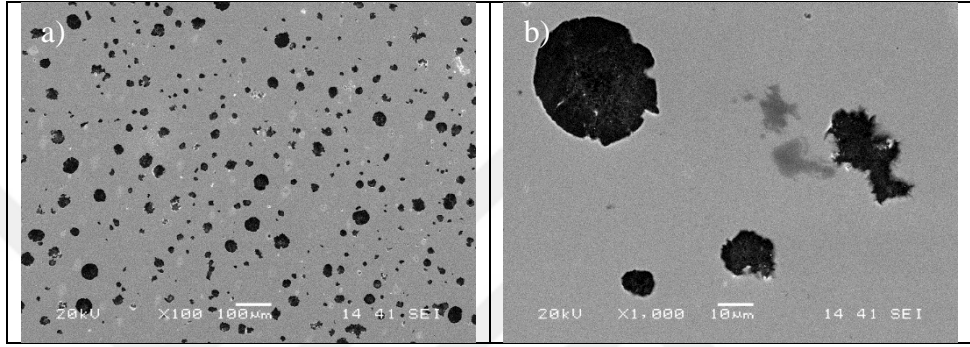
Taramalı elektron mikroskobu ile 1,2,4,11,15,18 ve 23 numaralı numuneler incelenmiştir. Şekillerde sırasıyla x100 ve x1000 büyütme ile çekilmiş görüntüler bulunmaktadır (Şekil 3.4, Şekil 3.5, Şekil 3.6, Şekil 3.7, Şekil 3.8, Şekil 3.9 ve Şekil 3.10).



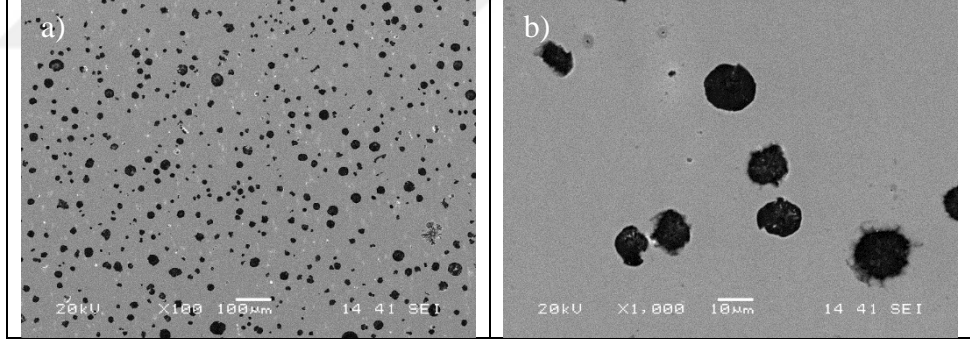
Şekil 3.4 : Numune 1 (5781 m/s) için alınmış SEM görüntüleri a) x100 büyütme b) x1000 büyütme



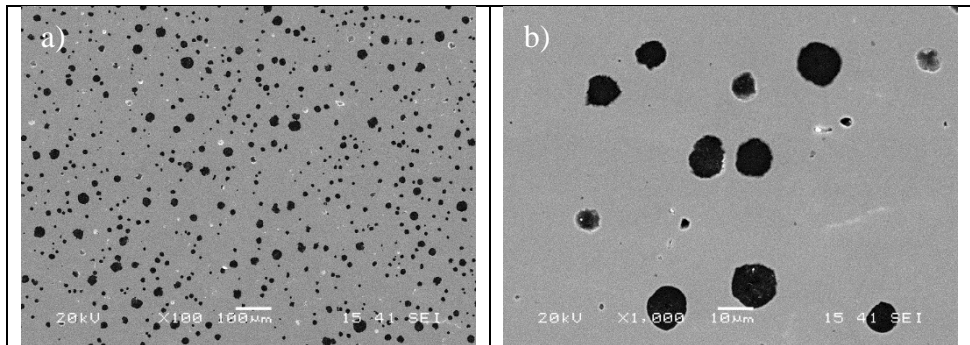
Şekil 3.5 : Numune 2 (5751 m/s) için alınmış SEM görüntüleri a) x100 büyütme b) x1000 büyütme



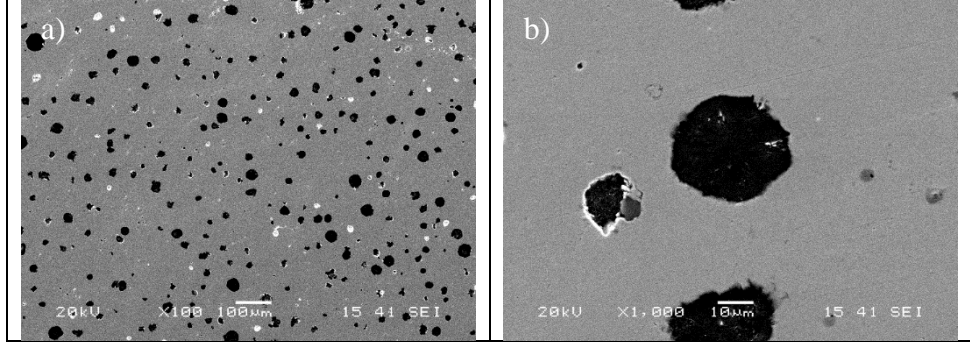
Şekil 3.6 : Numune 4 (5691 m/s) için alınmış SEM görüntüleri a) x100 büyütme b) x1000 büyütme



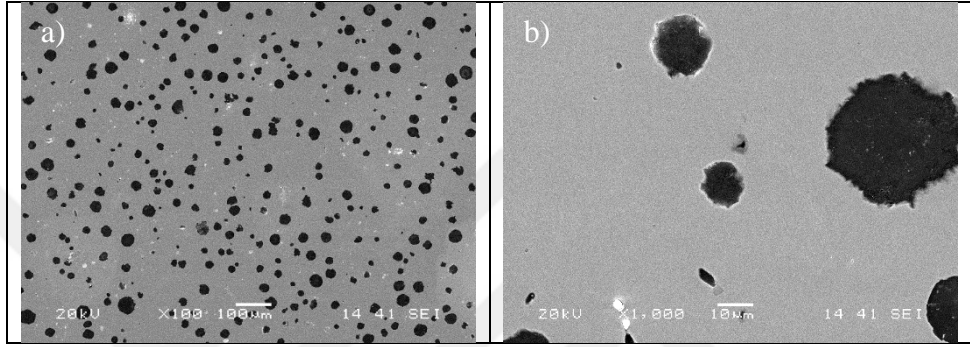
Şekil 3.7 : Numune 11 (5725 m/s) için alınmış SEM görüntüleri a) x100 büyütme b) x1000 büyütme



Şekil 3.8 : Numune 15 (5770 m/s) için alınmış SEM görüntüleri a) x100 büyütme b) x1000 büyütme



Şekil 3.9 : Numune 18 (5673 m/s) için alınmış SEM görüntüleri a) x100 büyütme b) x1000 büyütme



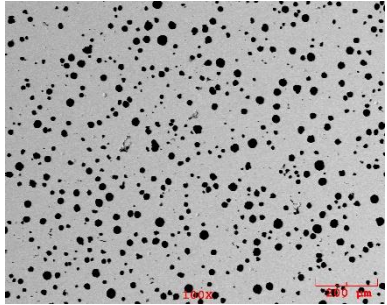
Şekil 3.10 : Numune 23 (5740 m/s) için alınmış SEM görüntüleri a) x100 büyütme b) x1000 büyütme

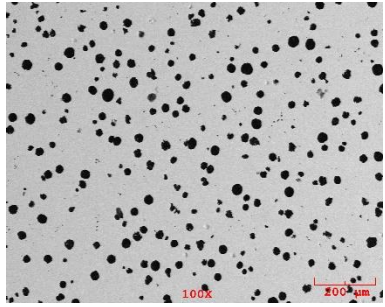
3.2.2 Enerji Dağılım Spektrometrisi (EDS) sonuçları

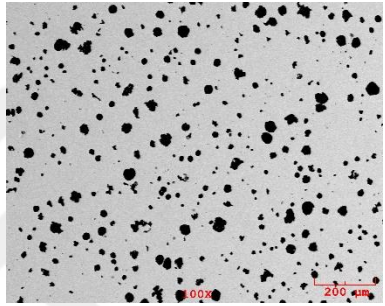
Her numune üzerinde seçilen rastgele bölgenin x100 büyütmede görüntünün bölgesel kimyasal analizi yapılmıştır.

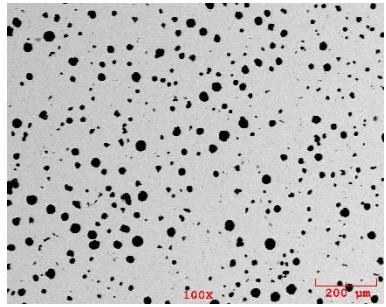
Çizelge 3.3 : 23 küresel grafitli dökme demir numunesi içerisinde rastgele seçilen 7 küresel grafitli dökme demir numunesinin EDS analizleri

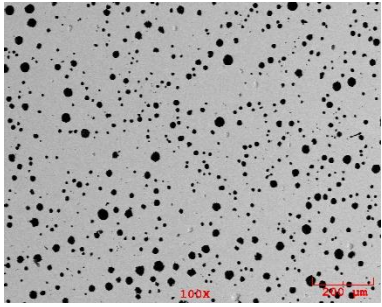
	Element	Atomik %	Ağırlıkça %
Numune 1	C	42.588	14.173
	Mg	0.371	0.250
	Si	3.352	2.609
	P	0.005	0.005
	S	0.205	0.183
	Cr	0.071	0.102
	Mn	0.082	0.125
	Fe	53.120	82.195
	Cu	0.204	0.359
		100.000	100.000

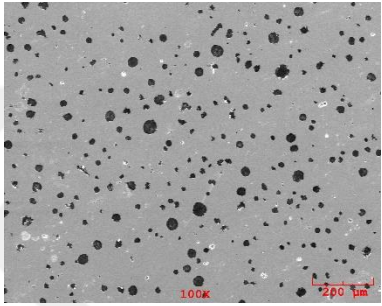


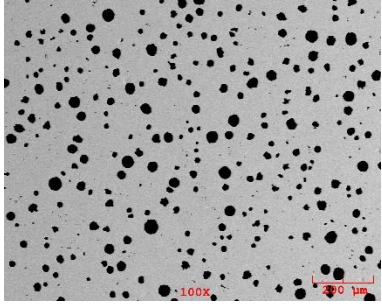
	Element	Atomik %	Ağırlıkça %	
Numune 2	C	36.284	11.311	
	Mg	0.404	0.255	
	Si	4.430	3.229	
	P	0.250	0.201	
	S	0.031	0.026	
	Cr	0.091	0.122	
	Mn	0.058	0.082	
	Fe	58.186	84.333	
	Cu	0.268	0.442	
		100.000	100.000	

	Element	Atomik %	Ağırlıkça %	
Numune 4	C	39.789	12.799	
	Mg	0.307	0.200	
	Si	3.294	2.477	
	P	0.132	0.109	
	S	0.103	0.088	
	Cr	0.022	0.030	
	Mn	0.092	0.135	
	Fe	56.187	84.034	
	Cu	0.075	0.127	
		100.000	100.000	

	Element	Atomik %	Ağırlıkça %	
Numune 11	C	33.183	9.969	
	Mg	0.426	0.259	
	Si	3.936	2.765	
	P	0.127	0.099	
	S	0.288	0.231	
	Cr	0.046	0.060	
	Mn	0.173	0.238	
	Fe	61.717	86.214	
	Cu	0.104	0.165	
		100.000	100.000	

	Element	Atomik %	Ağırlıkça %	
Numune 15	C	33.272	10.037	
	Mg	0.484	0.295	
	Si	4.611	3.253	
	P	0.067	0.052	
	S	0.070	0.056	
	Cr	0.047	0.061	
	Mn	0.090	0.124	
	Fe	61.098	85.701	
	Cu	0.263	0.420	
		100.000	100.000	

	Element	Atomik %	Ağırlıkça %	
Numune 18	C	32.365	9.673	
	Mg	0.212	0.128	
	Si	4.659	3.256	
	P	0.217	0.167	
	S	0.241	0.192	
	Cr	0.095	0.123	
	Mn	0.076	0.103	
	Fe	62.089	86.283	
	Cu	0.046	0.073	
		100.000	100.000	

	Element	Atomik %	Ağırlıkça %	
Numune 23	C	40.431	13.139	
	Mg	0.383	0.252	
	Si	3.367	2.559	
	P	0.281	0.235	
	S	0.194	0.169	
	Cr	0.022	0.031	
	Mn	0.242	0.359	
	Fe	54.920	82.982	
	Cu	0.159	0.274	
		100.000	100.000	

4. SONUÇLAR

Bu yüksek lisans tez çalışmasında küresel grafitli dökme demir numunelerde ultrasonik muayene yöntemiyle tahribatsız olarak küresellik değerlendirmesi yapılmıştır. KGDD numunelerinde ultrasonik muayene yöntemlerinden biri olan darbe-yankı yöntemi kullanılarak kalınlık ölçümü yapılmış, ilgili formül (2.1) kullanılarak ses hızları hesabı yapılmıştır.

KGDD numuneleri Döktaş A.Ş tarafından sağlanmıştır. Numuneler güncel olarak üretilen ve otomotiv sektöründe kullanılan malzemelerden seçilmiştir. Deneysel çalışmada 23 adet numune incelenmiş ve numune başına 5 bölgeden kalınlık ölçümü alınmıştır. UT ölçüm cihazı 1018 karbon çeliği malzemedan üretilmiş 5 basamaklı kalibrasyon bloğu ile kalibre edilmiştir. Kalibre edilen sinyalin hızı kaydedilmiş ve numunelerin kalınlık ölçümlerinde referans olarak kullanılmıştır. Numunelerin ölçülen kalınlıkları, gerçek kalınlıklar ve referans bloğun ses hızı kullanılarak numunelerin ses hızları da kaydedilmiştir. Döktaş A.Ş. tarafından beyan edilen, görsel kalite kontrol ve mikroyapı görüntü analiziyle tespit edilmiş küresellik değerleriyle, hesaplanmış ses hızları arasında bir korelasyon aranmıştır. Korelasyon katsayısı 0,915315 olarak hesaplanmıştır. Pozitif ve +1'e yakın olan bu değer ses hızları ve küresellik oranları arasında pozitif yönde artan bir grafik oluşturmuştur.

Elde edilen sonuçlara göre; yüksek küresellik oranlarına (%80+) sahip olduğu belirtilen numunelerde aynı doğrultuda yüksek ses hızları elde edilmiştir. Bunun nedeni malzemenin tane yapısındaki homojenlik ve Aynı şekilde düşük küresellik oranlarına sahip olduğu belirtilen numunelerde ise düşük ses hızları ölçülmüştür. Orta derecede küresellik oranlarına sahip (%30-%80) numunelerde ise ses hızları arasında orantısız olmayan ve birbirine çok yakın ses hızları ölçülmüştür. Ayrıca numuneler çizelge 3.4'de görüldüğü gibi çelik malzemenin ve küresel olmayan dökme demirin ses hızlarıyla da karşılaştırıldı. Grafikte görüldüğü üzere yüksek küreselliğe sahip numunelerin ses hızları çelik malzemeye yaklaşmıştır.

Orta derecede küresellik oranlarına sahip düzensiz ses hızı ölçümlerinin nedeni uygulanan yöntemlerin prensiplerinden kaynaklanmaktadır. Görüntü analizi yöntemlerinde ne kadar çok bölge kontrol edilirse sonuç o kadar doğru olmaktadır. Ayrıca görüntü analizi yüzeysel bir kontrol yöntemidir. Aksine ultrasonik muayene yöntemi daha az kontrole daha çok alanı hacimsel olarak analiz edebilmektedir.

Fakat seri üretimde kalite kontrol standartında küresellik oranı %80 ve üstü olduğundan genellikle yüksek küresellik oranlarına sahip malzemelerde bu sorun ortaya çıkmayacaktır. Bu ölçümleri desteklemek amacıyla numunelerin arasından seçilen 7 tanesi taramalı elektron mikroskopuyla taranmıştır. Yüksek küresellik oranlarına sahip numunelerde düşük çaplı ve homojen küresel grafitler olduğu görülmüştür. Şekil 3.4b'de görüldüğü gibi küresel olmayan grafit yapıları hızda düşüşe neden olmuştur. Diğer numuneler 5700 m/s üzerinde hızlara sahipken 4 numaralı numune daha düşük bir hıza sahiptir. Dört numaralı numune dışında 18 numaralı numunede de hız değeri nispeten düşük çıkmıştır. İki numunenin de EDS analizlerine bakılırsa diğerlerinden çok daha düşük Mg miktarına sahip olduğu görülmektedir. Mg elementi küresel grafit oluşumundaki en önemli etkenlerden biridir.

Bu çalışmanın sonucunda elde edilen veriler ışığında, tahribatsız ultrasonik muayene yönteminin, küresellik analizleri için hem uygulanabilirlik hem de maliyet açısından uygun bir yöntem olduğunu savunulmaktadır. Bu çalışmanın devamında sabit matris yapısı ve ürün geometrisi sabit tutularak, küresellik oranı kesin olarak bilinen referans numuneler kullanılarak daha iyi karşılaştırma yapma imkanı da mevcuttur. Bu yöntemin ayrıca mevcut tahribatlı yöntemlere ek olarak, tamamlayıcı bir yöntem olarak kullanılması da gereklidir. Gelişen teknolojiyle gün geçtikçe yaygınlaşan tahribatsız muayene yöntemleri, gelişen sanayi için büyük bir tasarruf kaynağı olacak ve aynı zamanda daha yüksek kaliteli üretimin kapılarını açacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] **Labrecque, C. and M. Gagne**, (1998). *Review ductile iron: fifty years of continuous development*. Canadian Metallurgical Quarterly. 37(5): p. 343-378.
- [2] **Rebasa, N., R. Dommarco, and J. Sikora**, (2002). *Wear resistance of high nodule count ductile iron*. Wear, 253(7-8): p. 855-861.
- [3] **Dix, L., et al.**, (2003). *Static mechanical properties of ferritic and pearlitic lightweight ductile iron castings*. AFS Transactions. 111: p. 1149-1164.
- [4] **Dommarco, R., M. Sousa, and J. Sikora**, (2004). *Abrasion resistance of high nodule count ductile iron with different matrix microstructures*. Wear. 257(11): p. 1185-1192.
- [5] **A247, A.**, (2010). *Standard Test Method for Evaluating the Microstructure of Graphite in Iron Castings*. ASTM International.
- [6] **International, A.**, (2005). *Standard Practice for Measuring Ultrasonic Velocity in Material*.
- [7] **Stefanescu, D., J. Davis, and J. Destefani**, (1988) *Metals Handbook, Vol. 15-- Casting*. ASM International.
- [8] **Campbell, J.**, (2015) *Complete casting handbook: metal casting processes, metallurgy, techniques and design* : Butterworth-Heinemann.
- [9] **Stefanescu, D.M.**, (1990). *Classification and basic metallurgy of cast iron*. ASM International, Metals Handbook. Tenth Edition. 1: p. 3-11.
- [10] **Durand-Charre, M.**, (2004). *From iron to steel*, in *Microstructure of Steels and Cast Irons*. Springer. p. 356-366.
- [11] **Alagarsamy, A.**, (1992) *Ductile iron handbook*. 1992: American Foundrymen's Society. 4-19.
- [12] **Riposan, I., et al.**, (2014). *The importance of rare earth contribution from nodulizing alloys and their subsequent effect on the inoculation of ductile iron*. International Journal of Metalcasting. 8(2): p. 65-80.
- [13] **Stefanescu, D., J. Davis, and J. Destefani**, (1988). *Metals Handbook, Vol. 15-- Casting*. ASM International, p. 1400.
- [14] **Refaey, A. and N. Fatahalla**, (2003). *Effect of microstructure on properties of ADI and low alloyed ductile iron*. Journal of Materials Science. 38(2): p. 351-362.
- [15] **Trudel, A. and M. Gagne**, (1997). *Effect of composition and heat treatment parameters on the characteristics of austempered ductile irons*. Canadian Metallurgical Quarterly. 36(5): p. 289-298.
- [16] **Ecob, C.**, (2005). *A review of common metallurgical defects in ductile cast iron*. Customer Services Manager, Elkem AS, Foundry Products Division.
- [17] **Handbook, A.**, (1992). *Nondestructive evaluation and quality control*. American Society of Metals, Metals Park, Ohio, USA. 200: p. 628-763.
- [18] **Handbook, A.**, (1992). *Nondestructive evaluation and quality control*. American Society of Metals, Metals Park, Ohio, USA. 200: p. 136-177.

- [19] **1370:2011, EN**, (2011). *Founding- Examination of surface condition*.
- [20] **13018, EN**, (2016). *Non-Destructive Testing - Visual testing - General Principles*.
- [21] **Handbook, A.**, (1992). *Nondestructive evaluation and quality control*. American Society of Metals, Metals Park, Ohio, USA. 200: p. 339-407.
- [22] **Konoplyuk, S., et al.**, (2005). *Characterization of ductile cast iron by eddy current method*. NDT & E International. 38(8): p. 623-626.
- [23] **Handbook, A.**, (1992). *Nondestructive evaluation and quality control*. American Society of Metals, Metals Park, Ohio, USA. 200: p. 178-266.
- [24] **Handbook, A.**, (1992). *Nondestructive evaluation and quality control*. American Society of Metals, Metals Park, Ohio, USA. 200: p. 486-592.
- [25] **Krautkrämer, J. and H. Krautkrämer**, (2013). *Ultrasonic testing of materials*. Springer Science & Business Media. 167-177.
- [26] **16810, ISO**, (2012). *Non-destructive - Ultrasonic testing - General Principles*.
- [27] **Lee, S.-C. and J.-M. Suen**, (1989). *Ultrasonic nondestructive evaluation of matrix structures and nodularity in cast irons*. Metallurgical transactions A. 20(11): p. 2399-2407.
- [28] **Orłowicz, W., et al.**, (2010). *Evaluation of ductile iron casting material quality using ultrasonic testing*. Journal of Materials Processing Technology. 210(11): p. 1493-1500.
- [29] **Alagarsamy, A.**, (2005). *Sound advice for nodularity testing*. Modern Casting. 95(7): p. 31-34.
- [30] **Gür, C. and B. Aydınmakina**. (2000). *Non-destructive Characterisation of Nodular Cast Irons by Ultrasonic Method*. in *15th World Conf on NDT*.
- [31] **Collins, D.N. and W. Alcheikh**, (1995). *Ultrasonic non-destructive evaluation of the matrix structure and the graphite shape in cast iron*. Journal of materials processing technology. 55(2): p. 85-90.
- [32] **Belan, J.**, (2010). *Identification of cast iron type with using of NDT methods*. Archives of Foundry Engineering. 10(1): p. 103-106.
- [33] **Testing, A.S.f. and Materials**. *ASTM E3-01: Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens*. 2009. ASTM.
- [34] **DöktaşDökümA.Ş.Laboratuvarı**, (2018). *Döküm Malzemelerin Kimyasal Bileşimleri ve Mekanik Özellikleri*.
- [35] **ASTM, E.**, 797-90. *Standard Practice for Measuring Thickness by Manual Ultrasonic Pulse-Echo Contact Method*.

ÖZGEÇMİŞ



Ad-Soyad : Eren YALÇINDAĞ
Doğum Tarihi ve Yeri : Bursa 06/12/1988
E-posta : eren.yalcindag@mmo.org.tr

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2014, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği
- **Yüksek Lisans** : 2016-2019, Bursa Teknik Üniversitesi, İleri Teknolojileri Ana Bilim Dalı, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Yüksek Lisans Programı

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- Beşiktaş Vodafone Park Çelik Konstrüksiyon İmalatı 2014-2015
- TMMOB Makine Mühendisleri Odası Kaynak Eğitim ve Muayene Merkezi NDT uzmanı 2018-...

TEZDEN TÜRETİLEN ESERLER, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- Eren Yalçındağ, Erdem Ferik, İsrail Küçük, “Yüksek Küreselliğe Sahip Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Ultrasonik Muayene Yöntemiyle Karakterizasyonu”, Poster sunumu, III. International Scientific And Vocational Studies Congress Engineering (Bilmes En 2019).

DİĞER ESERLER, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- Bülent Şirin, İsrail Küçük, Eren Yalçındağ, Derya Dışpınar, “New Trends In Casting Materials And Adaptation To Recent Developments In The Automotive Sector”, Sözlü Sunum, 9th International Automotive Technologies Congress, OTEKON 2018, 07-08 Mayıs 2018, Bildiriler Kitabı Sayfalar: 1049-159, Bursa, Türkiye.