

Bu tez çalışması 07.FENED.13 numaralı proje ile Afyon Kocatepe Üniversitesi
Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi Başkanlığı tarafından
desteklenmiştir.

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DOKTORA TEZİ

ÇELİKLERDE TANE BOYUTUNUN
ULTRASONİK YÖNTEMLE İNCELENMESİ

Ahmet DENİZ

DANIŞMAN
Prof. Dr. Mevlüt DOĞAN

METAL EĞİTİMİ ANABİLİM DALI

Ağustos, 2012

TEZ ONAY SAYFASI

Ahmet DENİZ tarafından hazırlanan “ÇELİKLERDE TANE BOYUTUNUN ULTRASONİK YÖNTEMLE İNCELENMESİ” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 01/08/2012 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy çokluğu ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Metal Eğitimi Anabilim Dalı’nda DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Mevlüt DOĞAN

Başkan	: Prof. Dr. Rifat ÇAPAN Balıkesir Ü. Fen-Edebiyat Fakültesi,	İmza
Üye	: Prof. Dr. Mevlüt DOĞAN Afyon Kocatepe Ü. Fen-Edebiyat Fakültesi,	İmza
Üye	: Doç. Dr. Yılmaz YALÇIN Afyon Kocatepe Ü. Teknoloji Fakültesi,	İmza
Üye	: Doç. Dr. Şükrü TAKTAK Afyon Kocatepe Ü. Teknik Eğitim Fakültesi,	İmza
Üye	: Yrd. Doç. Dr. Sinan ULU Afyon Kocatepe Ü. Teknoloji Fakültesi,	İmza

Afyon Kocatepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun
...../...../..... tarih ve
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

.....
Prof. Dr. Mevlüt DOĞAN
Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

02/08/2012

Ahmet DENİZ

ÖZET

Doktora Tezi

ÇELİKLERDE TANE BOYUTUNUN ULTRASONİK YÖNTEMLE İNCELENMESİ

Ahmet DENİZ

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Metal Eğitimi Anabilim Dalı

Danışmanı: Prof. Dr. Mevlüt DOĞAN

Metallerin mekanik özellikleriyle doğrudan ilişkili olan tane boyutu, metaller içinde ilerleyen ultrases dalgalarını da etkiler. Bu çalışmada düşük karbon çeliklerinden olan AISI 1020, Gemi sacı, St-37 ve 7-Mn-6 çeliklerinde, ultrases dalgalarının frekansına bağlı olarak sönümlerindeki değişime tane boyutunun etkisi incelenmiştir. Isıl işlem uygulanarak elde edilen farklı tane boyutlu numunelerden, Pulse-Echo metodu ile ultrasonik ölçümler alınmış, elde edilen ultrasonik veriler numunelerin optik mikroskop görüntülerinden ASTM E.112-88 standardına göre belirlenen tane boyutlarıyla karşılaştırılmıştır.

Tane boyutu belirleme için mevcut olan optik yönteme alternatif olarak geliştirilmeye çalışılan ultrasonik yöntemin, AISI 1020, Gemi sacı, St-37 ve 7-Mn-6 çeliklerinde hangi frekanslarda uygulanabilirliği de bu çalışmada incelenmiştir.

Ölçümlerin alınacağı ultrasonik malzeme muayene sisteminin, bu çalışma paralelinde kurulması amaçlanmıştır. Bu sistem ile tane boyutu belirleme ve içyapı ile ilgili ultrasonik çalışmalar ileride geliştirilmeye müsait duruma getirilmeye çalışılırken, aynı zamanda malzemelerin tahribatsız muayenesinde de kullanılabilecektir.

2012, x+114 sayfa

Anahtar Kelimeler: Tane boyutu, ultrasonik dalgalar, sönüm, puls-eko metodu, düşük karbon çelikleri

ABSTRACT

PhD Thesis

INVESTIGATION OF GRAIN SIZES OF STEELS

BY ULTRASONIC METHOD

Ahmet DENİZ

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Metalic Education

Supervisor: Prof. Dr. Mevlüt DOĞAN

Grain size that related directly to the mechanical properties of metals also influences ultrasonic waves that travel into materials. In this study, effect of grain size on attenuation and velocity of scattering ultrasonic waves in AISI type 1020, Ship Plate, St37 and 7-Mn-6 steels which are some types plain carbon steels, have been investigated. The specimens were heat treated to obtain variations in grain sizes. Ultrasonic parameters were measured using pulse-echo method and correlated with grain sizes measured with ASTM E112-88 standard from optical photomicrographs of specimens.

In this study, applicability of ultrasonic grain size determination in AISI type 1020, Ship Plate, St37 and 7-Mn-6 steels and available frequency are tested.

It is aimed to set up a non-destructive material testing system for ultrasonic measurements.

2012, x+114 pages

Key words: Grain size, ultrasonic waves, attenuation, pulse-echo method, plain carbon steels.

TEŞEKKÜR

Her yönden eksiğimi tamamlayan Danışman Hocam Prof. Dr. Mevlüt DOĞAN'a, her bakımdan desteğini esirgemeyen annem ve eşime, Afyon Kocatepe Üniversitesi Metal Labaratuvarı ve Metal Eğitimi Bölümü Öğretim elemanlarına, özellikle Yrd. Doç. Dr. Sinan ULU'ya, tez izleme komitesinde bulunan diğer hocalarım Doç. Dr. Yılmaz YALÇIN ve Doç. Dr. Şükrü TAKTAK'a, Fizik Bölümü e-Col Labaratuvarı'nda çalışan tüm arkadaşlarıma gönülden teşekkür ederim.

Ahmet DENİZ

AFYONKARAHİSAR, 2012

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
1. GİRİŞ	1
1.1 Literatür Bilgileri	3
1.1.1 Ultrasesin Malzeme Analizi Alanındaki Uygulamaları	4
1.1.2 Akustik Mikroskop	7
1.1.3 Tanecik Boyutu	8
2. GENEL BİLGİLER	12
2.1 Ultrases	12
2.1.1 Sesin Özellikleri ve Mekanik Dalgaların Yayılması	12
2.1.2 Ultrasonik Dalga Türleri	14
2.1.2.1 Boyuna Ultrases Dalgaları	14
2.1.2.2 Enine Ultrases Dalgaları	16
2.1.2.3 Yüzey Dalgaları	17
2.1.2.4 Plaka (Lamb) Dalgaları	18
2.1.3 Ultrasonik Dalgaların Üretilmeleri	18
2.1.4 Ultrasonik Demet ve Özellikleri	20
2.1.5 Ultrasonik Muayene Tekniği	22
2.1.6 Ultrasonik Dalgaların Sönümü	25
2.1.6.1 Ultrasonik Dalgaların Saçılması	26
2.1.7 Ultrasesin Etkileri	29
2.1.8 Ultrasesin Kullanımı	30
2.1.8.1 Endüstride Kullanımı	30
2.1.8.2 Ultrasesin Medikal Alanda Kullanımı	31
2.2 Metaller	33
2.2.1 Malzemeler ve Sınıflandırılmaları	33
2.2.2 Demir Esaslı Metaller	34
2.2.3 Çelikler ve Sınıflandırılması	35

2.2.4 Karbon ve Alaşım Bileşimlerine Göre Çelikler	36
2.2.4.1 Çeliklerin Karbon Oranına Göre Sınıflandırılması	36
2.2.4.2 Çeliklerin Alaşım Bileşimlerine Göre Sınıflandırılması	37
2.2.5 Tane Kavramı ve Tane Boyutunun Malzemeye Etkisi	38
2.2.5.1 Tane Büyümesi	39
2.2.6 Çeliklerde Uygulanan Isıl İşlemler.....	40
2.2.6.1 Demirin Allotropisi	41
2.2.6.2 Demir-Karbon (Fe-C) Denge Diyagramı	42
2.2.6.3 Isıl İşlemlerin Genel Grafiği.....	47
2.2.6.4 Isıl İşlemin Malzeme Özellikleri Üzerine Etkisi.....	48
2.2.7 Isıl İşlem Çeşitleri.....	49
2.2.7.1 Tavlama	49
2.2.7.2 Rekristalizasyon	50
2.2.7.3 Tam Tavlama	52
2.2.7.4 Normalleştirme Tavlaması (Normalizasyon).....	54
2.2.7.5 Yumuşatma Tavlaması	56
2.2.7.6 Gerilim Giderme Tavlaması	56
3. MATERYAL METOD	59
3.1 Kullanılan Çelikler ve Numunelerin Hazırlanması	59
3.2 Uygulanan Isıl İşlemler.....	60
3.3 Metalografi.....	62
3.4 Ortalama Tane Boyutlarının Hesaplanması	63
3.5 Deney Düzeneği ve Ultrasonik Ölçümler	63
3.5.1 Kullanılan Transduserler.....	67
4. DENEYSEL BULGULAR.....	69
4.1 AISI 1020 Çeliğinden Alınan Ölçümler	72
4.2 Gemi Sacından Alınan Ölçümler.....	78
4.3 St37 Çeliğinden Alınan Ölçümler	82
4.4 7-Mn-6 Çeliğinden Alınan Ölçümler.....	86
4.5 Sönüm-Tane Boyutu İlişkisine Frekansın Etkisi.....	89
4.6 5 MHz Frekansta Sönüm-Tane Boyutu İlişkisi.....	92
5. TARTIŞMA ve YORUM.....	95
6. KAYNAKLAR	98
6.1 İnternet Kaynakları	112
ÖZGEÇMİŞ.....	113

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

λ	Dalga Boyu
D	Tane Boyutu
C_r	Rayleigh Bölgesi Malzeme Esneme Sabiti
C_s	Stochastic Bölge Malzeme Esneme Sabiti
C_d	Difüzyon Bölgesi Malzeme Esneme Sabiti
S	Saçılma Parametresi
Ac_1	Alt Kritik Sıcaklığı
Ac_3	Üst Kritik Sıcaklığı
f	Frekans
T	Periyot
V	Hız
t	Zaman
a	Parçacıkların t anında denge konumundan olan uzaklığı
a_0	Parçacık titreşiminin genliği
Z	Akustik Empedans
ρ	Ortam Yoğunluğu
P	Akustik Basınç
E	Elastisite Modülü
γ	Poisson Oranı
G	Kayma Modülü
V_b	Boyuna Dalgaların Hızı
V_e	Enine Dalgaların Hızı
V_y	Yüzey Dalgalarının Yayılma Hızı
α	Sönüm Katsayısı
α_a	Soğrulma (Absorbsiyon) Katsayısı
α_s	Saçılma (Scattering) Katsayısı
σ_y	Malzemenin kalıcı şekil değiştirdiği akma dayanımı
σ_0	İç Sürtünme Gerilmesi
$\alpha(F)$	Ferrit
$\gamma(O)$	Östenit
Fe_3C	Sementit
ℓ_i	Çizgi Boyu
R	Büyütme Oranı
N_i	Çizginin Kestiği Tane Sayısı
T_{rk}	Rekristalizasyon Sıcaklığı
T_{er}	Ergime Sıcaklığı

Kısaltmalar

SAM	Taramalı Akustik Mikroskobu (Scanning Acoustics Microscopy)
EMAT	Elektromanyetik Akustik Prob (Electromagnetic Acoustic Transducer)
AISI	Amerikan Demir Çelik Enstitüsü (American Iron and Steel Institute)
ASTM	Amerikan Malzeme Birliği (American Society for Testing and Materials)

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1 Maddeler içindeki atomlar arası yay modellemesi.	13
Şekil 2.2 Boyuna dalgalar	15
Şekil 2.3 Enine dalgalar	16
Şekil 2.4 Yüzey dalgaları.	18
Şekil 2.5 Uçlarına gerilim uygulanan bir Piezo-elektrik malzemenin boyutlarındaki değişme.....	19
Şekil 2.6 Ultrasonik demetin transduserdan ayrıldıktan sonra ilerlediği Fresnel ve Fraunhofer alanları şematik gösterimi	21
Şekil 2.7 Transduserdan ayrılan demetin uzak ve yakın alanda şiddetindeki değişim... ..	21
Şekil 2.8 Darbe Yankı metodunun diyagramı.....	23
Şekil 2.9 Hatalı ve hatasız malzemelerin darbe yankı metoduyla muayenesinde oluşan ekran görüntüleri.....	23
Şekil 2.10 Transmisyon metodu	24
Şekil 2.11 Saçılma mekanizmaları a)Etkisiz Saçılma b)Rayleigh Saçılma c)Stokastik Saçılma, d)Difüzif Saçılma	27
Şekil 2.12 Paslanmaz çeliklerin farklı tane boyutlarında sönüm – frekans ilişkisi	28
Şekil 2.13 Ferrit tane boyutunun tavllanmış yumuşak çeliğin dayanımı üzerine etkisi ..	39
Şekil 2.14 Demirin polimorf dönüşüm grafiği	42
Şekil 2.15 Fe-C denge diyagramında görülen fazlar ve içyapılarının şematik olarak gösterimi.....	44
Şekil 2.16 Demir-Karbon denge diyagramında çelik ve tav sıcaklıkları bölgeleri	46
Şekil 2.17 Isıl işlemlerin genel grafiği.....	47
Şekil 2.18 Östenitin soğuma hızına bağlı olarak yaptığı dönüşümler	48
Şekil 2.19 Rekrystalizasyon işleminin şematik gösterimi	51
Şekil 2.20 Bazı metaller için yeniden kristalleşme ve ergime sıcaklıkları	52
Şekil 2.21 % 0,2 C içeren çelikte tam tavlama sonucu oluşan içyapı değişiklikleri	53
Şekil 2.22 Ötektoid altı çelikler için tam tavlama işleminin genel grafiği	54
Şekil 2.23 Normalizasyon işleminin sıcaklık değişim grafiği	55
Şekil 2.24 Normalizasyon tavlama sıcaklığı ve zamana bağlı olarak içyapının dönüşmesi.....	55

Şekil 2.25 Sade karbonlu çeliklerin özellikleri üzerine karbon miktarı ve ısıtma işlem çeşitlerinin etkisi	57
Şekil 3.1 Deneysel çalışmada kullanılan düşük karbonlu çelik numuneleri	60
Şekil 3.2 Atmosfer destekli tüp fırın	61
Şekil 3.3 Metalografik numune zımparalama ve parlatma cihazı.	62
Şekil 3.4 Metalografik incelemelerin yapıldığı optik mikroskop	62
Şekil 3.5 AISI 1020 çeliğinin örnek içyapı görüntüsü ve taneleri kesen çizgiler.	63
Şekil 3.6 Optel Ltd Şti. firmasına ait Opbox-Usb 2.0 ultrasonik test cihazı ve yazılımı	64
Şekil 3.7 Ölçümler sırasında kullanılan yazılımın ekran görüntüsü	65
Şekil 3.8 Ultrases dalgasının numune içinde izlediği yol.	67
Şekil 3.9 Ultrasonik boyuna dalga gönderen temaslı transduserler	68
Şekil 4.1 Isıl işlem uygulanmamış çeliklerin kesitten alınmış içyapıları; a) AISI1020, b) Gemi Sacı, c) St37, d) 7-Mn-6.	69
Şekil 4.2 Homojenleştirme ısıtma işlemi sonrası içyapı resimleri; a) AISI 1020, b) Gemi Sacı, c) St37, d) 7-Mn-6.	70
Şekil 4.3 AISI 1020 çeliği numunelerinin a) Homojenleştirme sonrası, b) 915°C, c) 1000°C, d) 1050°C, e) 1100°C, f) 1200°C sıcaklıklarında tam tavlama sonrası oluşan içyapılar.	72
Şekil 4.4 AISI 1020 Çeliklerinde ısıtma işlem görmüş numunelerde ortalama tane boyutlarının değişimi.	74
Şekil 4.5 AISI 1020 çeliği numunelerinden farklı frekanslarda alınan ultrasonik sönüm değerlerinin ısıtma işlem sıcaklıklarına göre değişimi.	76
Şekil 4.6 Isıl işlem görmüş AISI 1020 çeliği numunelerinden elde edilen sönüm değerlerinin tane boyutlarına göre değişimi.	77
Şekil 4.7 Gemi Sacı numunelerinin a)Homojenleştirme sonrası, b)915 °C, c)1000 °C, d) 1050 °C, e) 1100 °C, f) 1200 °C sıcaklıklarında tam tavlama sonrası oluşan içyapılar.	78
Şekil 4.8 Gemi Sacında ısıtma işlem görmüş numunelerde ortalama tane boyutlarının değişimi.	79
Şekil 4.9 Gemi Sacı numunelerinden farklı frekanslarda alınan sönüm değerlerinin ısıtma işlem sıcaklıklarına göre değişimi	81

Şekil 4.10 Isıl işlem görmüş Gemi Sacı numunelerinden elde edilen sönüm değerlerinin tane boyutlarına göre değişimi.	81
Şekil 4.11 St37 çeliği numunelerinin a) Homojenleştirme sonrası, b) 915°C, c) 1000°C, d) 1050°C, e) 1100°C, f) 1200°C sıcaklıklarında tam tavlama sonrası oluşan içyapılar.	82
Şekil 4.12 St37 çeliğinde, ısıtıl işlem görmüş numunelerin ortalama tane boyutları değişimi.	84
Şekil 4.13 St37 çeliği numunelerinden farklı frekanslarda alınan sönüm değerlerinin ısıtıl işlem sıcaklıklarına göre değişimi.	85
Şekil 4.14 Isıl işlem görmüş St37 çeliği numunelerinden elde edilen sönüm değerlerinin tane boyutlarına göre değişimi.	85
Şekil 4.15 7-Mn-6 çelik numunelerinin a) Homojenleştirme sonrası, b) 915°C, c) 1000°C, d) 1050°C, e) 1100°C, f) 1200°C sıcaklıklarında tam tavlama sonrası oluşan içyapılar.	86
Şekil 4.16 Isıl işlem görmüş 7-Mn-6 çeliği numunelerinin ortalama tane boyutları değişimi.	87
Şekil 4.17 7-Mn-6 çeliği numunelerinden farklı frekanslarda alınan sönüm değerlerinin ısıtıl işlem sıcaklıklarına göre değişimi.	88
Şekil 4.18 Isıl işlem görmüş 7-Mn-6 çelik numunelerinden elde edilen sönüm değerlerinin tane boyutlarına göre değişimi.	89
Şekil 4.19 1 MHz frekanslı transduser ile alınan sönüm katsayılarının tane boyutu ile ilişkisi.	90
Şekil 4.20 5 MHz frekanslı transduser ile alınan sönüm katsayılarının tane boyutu ile ilişkisi.	90
Şekil 4.21 10 MHz frekanslı transduser ile alınan sönüm katsayılarının tane boyutu ile ilişkisi.	91
Şekil 4.22 15 MHz frekanslı transduser ile alınan sönüm katsayılarının tane boyutu ile ilişkisi.	91
Şekil 4.23 20 MHz frekanslı transduser ile alınan sönüm katsayılarının tane boyutu ile ilişkisi.	92
Şekil 4.24 Deneysel Tane Boyutunun Ölçülen Optik Tane Boyutuna göre değişimi. ...	94

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1 Bazı ortamlarda ultrases dalgalarının yayılma hızları.....	17
Çizelge 2.2 Bazı piezo-elektrik malzeme ve piezo-elektrik özelliği gösteren malzemelerin parametreleri.....	19
Çizelge 3.1 Kullanılan çeliklerin spektral analiz sonuçları.....	59
Çizelge 3.2 Homojenleştirme sonrasında numune gruplarına uygulanan ısıtıl işlem rejimleri.	61
Çizelge 4.1 Homojenleştirme ısıtıl işlemi öncesi (satıldığı durum) ve sonrası ortalama tane boyutları.	71
Çizelge 4.2 AISI 1020 çeliğine ait ısıtıl işlem bilgileri ve numune boyutları.....	73
Çizelge 4.3 AISI 1020 çelik numunelerinin ortalama tane boyutları ve numunelerden alınan farklı frekanslardaki ultrasonik sönüm değerleri.	75
Çizelge 4.4 Gemi Sacına ait ısıtıl işlem bilgileri ve numune boyutları.	79
Çizelge 4.5 Gemi sacı numunelerinin ortalama tane boyutları ve numunelerden alınan farklı frekanslardaki ultrasonik sönüm değerleri.....	80
Çizelge 4.6 St 37 çeliğine ait ısıtıl işlem bilgileri ve numune boyutları.....	83
Çizelge 4.7 St37 çelik numunelerinin ortalama tane boyutları ve numunelerden alınan farklı frekanslardaki ultrasonik sönüm değerleri.....	84
Çizelge 4.8 7-Mn-6 çeliğine ait ısıtıl işlem bilgileri ve numune boyutları.	87
Çizelge 4.9 7-Mn-6 çeliği numunelerinin ortalama tane boyutları ve numunelerden alınan farklı frekanslardaki ultrasonik sönüm değerleri.	88
Çizelge 4.10 Optik ve ultrasonik olarak hesaplanmış ortalama tane boyutları.....	93

1. GİRİŞ

Günümüzde, teknolojiye kullanılan malzemelerin sahip oldukları özelliklerinin kullanıldıkları yerlere göre uygunluklarının tespiti ve malzemelerin kullanım esnasında içyapısındaki değişimlerinin, yorulma oranlarının, oluşabilecek kırık, çatlak ve bozulma oranlarının tespiti için malzemelere birçok test yöntemi uygulanmaktadır. Çeşitli alanlarda çeşitli malzemelere uygulanan bu test yöntemleri genel olarak tahribatlı ve tahribatsız olarak ikiye ayrılmaktadır.

Tahribatlı test yöntemlerinde malzemelerin özellikleri belirlendikten sonra numuneler tahribat görecer kullanarak kullanım dışı kalırken, tahribatsız test yöntemlerinde ise inceleme altındaki numunelerin bütünlükleri bozulmadan malzemelerden bilgi alınabilmektedir. Malzemelerin kullanım esnasındaki değişen özelliklerinin tespitinde, parçaların kullanılmalarına devam etmeleri için tahribatsız test yöntemleri tercih edilmektedir. Bu yöntemlerin bazı durumlardaki yetersizliklerinden dolayı geliştirilmelerine ihtiyaç duyulmakta ve birçok akademik çalışmalara konu olmaktadır.

Ultrasonik test yöntemi de günümüzde geniş kullanım alanı bulmuş tahribatsız muayene yöntemlerinden biridir. Ultrasonik test yöntemi ile malzemenin kalınlığı, elastisite modülü, kayma modülü ve poisson oranı tespit edilirken, ultrasonik muayene ile de malzemelerde çatlak, inklüzyon, gözenek gibi içyapı kusurları tahribatsız olarak belirlenebilmektedir. Bu tespit uygulamalarında ultrases dalgalarının frekans, hız ve sönümü gibi değişik parametreleri incelenmektedir. Bu çalışmada sönüm parametresinin tane boyutlarıyla olan ilişkisi üzerine durulmuştur.

Ultrasonik dalgalar malzeme içerisinde ilerlerken çeşitli nedenlerle enerjilerini kaybederler. Bu olaya ultrasonik sönüm (attenuation) denir. Ultrasonik sönüme esas olarak saçılma (scattering), soğurulma (absorbsiyon) ve demet genişlemesi (spreading) neden olmaktadır. Metallerde yüksek frekansa sahip ultrases dalgalarında sönüm olayı, büyük ölçüde polikristal tanelerinin neden olduğu saçılmalardan kaynaklanmaktadır. Farklı yönelime sahip polikristal taneleri, akustik empedansları farklı iki komşu malzeme gibi davranarak aralarındaki tane sınırları, ultrasonik dalgalarda saçılmayı

(yansıyan ve geçen iki kısmı) oluşturur. Dolayısıyla bir malzemenin homojen olmaması, içinde ilerleyen ultrasonik dalgaların farklı doğrultularda saçılmasına neden olur. İnküzyonlar, gözenekler ve tane sınırları homojen olmayan ortamlar gibi davranarak, dalga boyları bu süreksizliklerin boyutlarıyla aynı mertebede olan ultrasonik dalgalara birer saçıcı unsur oluşturur. İlerleyen ultrases dalgalarının dalga boyları frekans ile ters orantılı olup frekans arttıkça, dalga boyları küçülür. Bu sebeple malzeme içinde ilerleyen dalgaların dalga boyları veya frekansları önemli bir parametredir. Saçılan dalgaların yansıyan kısımları alıcı probalar (transduser) ile algılanırken test cihazlarının ekranında çimlenme denilen belirtiler gözlenir (Ekinci *et al.* 2004) ve yapılan incelemeler ve değerlendirilmeler sonunda malzemelerin özellikleri ile ilgili sonuç ve yorumlara ulaşılır.

Soğrulma olayı ise daha ziyade plastiklerde görülmektedir ve titreşim enerjisinin ısı enerjisine dönüşmesinden kaynaklanır. Bu enerji dönüşümünün sebebi termo-elastik etkileşmeler, dislokasyon sönümlenmesi ve manyetik domain sönümlenmesidir. Esas olarak kaybolan bu enerjinin malzeme incelemesi için fazla önemi yoktur.

Demet saçılması dalgaların probdan uzaklaştıkça daha geniş bir alanı kapsamaları nedeni ile enerji yoğunluklarının azalmasıdır. Burada enerji yoğunluğu mesafenin karesi ile azalır.

Metallerin kalite kontrol aşamalarında test edilmesi gerekli olan en önemli özelliklerinden biri ortalama tane boyutudur. Ultrasonik yöntemle tane boyutu belirlenmesi, klasik tahribatlı metalografik yöntemle göre hem daha hızlı, hem de tahribatsız olması nedeniyle büyük üstünlüğe sahip olacaktır. Bu nedenle ultrasonik yöntemin geliştirilmesinin önemi büyüktür.

Bu çalışmada, malzeme tane boyutu değişiminin ultrasonik sönüm yöntemi ile incelenmesi esas alınmıştır. 4 farklı karbon oranına sahip düşük karbonlu çelik numuneler temin edilerek, 5 farklı sıcaklıkta ısıtılma işlemi uygulanmış, farklı ortalama tane boyutuna sahip numuneler elde edilmiştir. Hazırlanan bu numunelerde 5 farklı frekansa

sahip transduserlar ile sönüm ölçümleri alınarak tane boyutunun frekansa göre sönüme etkisi incelenmiştir.

1.1 Literatür Bilgileri

Ultrasonik çalışmalara temel olacak çalışmalar 19. yüzyılın sonlarına doğru yapılmaya başlanmıştır. 1847 yılında J. P. Joule tarafından Magnetostriktive olay keşfedilmiş ve sanayide uzun yıllar yüksek frekanslı titreşim elde etmede kullanılmıştır. Pierre Curie ve Paul Jacques Curie tarafından 1880 yılında piezo-elektrik etkinin keşfi ve 1881’de G. Lipmann tarafından teorik olarak ters piezo-elektrik olayın ispatlanması ile kuartz ve diğer materyallerde piezo-elektrik olay üzerine yoğun çalışmalar başlatılmıştır. Bu çalışmalar ile magnetostriktive olayda elde edilen kHz mertebesindeki titreşimlerden, piezo-elektrik olay ile elde edilen MHz mertebesindeki daha yüksek frekanslı titreşimlerin kullanımına geçiş sağlanmıştır. Piezo-elektrik olayın keşfi ile birlikte geliştirilen yeni teknolojik ürünler sanayinin çeşitli alanlarında kullanılmaya başlanmıştır. İlk büyük piezoelektrik uygulaması, 1. Dünya Savaşı sırasında denizaltıları tespit için su altında akustik dalgaları üretmek amacı ile oldu. Fransız fizikçi Paul Langevin tarafından yürütülen bu çalışmalar doğrultusunda ultrases dalgaları kullanılarak “Sonar” cihazı geliştirilmiş (1916) ve denize yüksek frekanslı ultrases atmaları gönderilmiştir. Ultrases dalgalarının sapmadan doğrusal olarak ilerlediği ve bir cisme çarptığında yankının geri döndüğü görülmüştür. Daha sonra bu buluş geliştirilerek savunma sanayinde ve balıkçılıkta kullanılmıştır.

1929 yılında Rus bilim adamı S. J. Sokolov, imalatı yapılan parçalar içinde bulunabilen malzeme hataları ve çatlak gibi kusurların tespit edilmesinde ultrases dalgalarının kullanılabileceğini göstermiştir (Sokolov 1929). Ultrasonik metot ile malzeme muayenesinin temeli olan geliştirdiği sistemde ultrasonik dalgalar probalar yardımı ile malzeme içinden geçiriliyordu. Teknolojik imkânsızlıklar Sokolovun yüksek frekanslarda çalışmasını engellemiş, fakat onun koyduğu ilkelere göre geliştirilen cihaza Sokolov tüpü adı verilmiştir. Bu cihaz, su altı görüntüleme için kullanılmıştır.

Mulhauser, 1931 yılında iki transduser (ultrases üretici ve alıcı) kullanarak katı malzemeler içindeki çatlak ve kusurları dedekte etmiş ve bu sistemin patentini almıştır. Firestone (1943), alıcı ve verici özelliği olan tek transduser geliştirerek bununla beraber puls-eko tekniğini de geliştirmiştir. Firestone tarafından geliştirilen puls-eko tekniği ile II. Dünya Savaşında (1939-1945) önemli bir rol oynayan radarlar (reflectoscope) üretilmiştir (Firestone, 1945). Savaşta kullanılan radarlar ve malzeme alanındaki gelişmelerle birlikte tıp alanında da ultrasonik çalışmalar başlamıştır.

Avusturyalı psikiyatrist Dr. Karl Dussik'in 1942'de geliştirmiş olduğu "hyperphonography" isimli görüntüleme yöntemi ile beyin dokusunu ultrasonik olarak incelemesi ultrasesin tıp alanındaki uygulamalarını başlatmıştır. Ultrases dalgalarının malzemeye zarar vermemesi gibi dokulara da zarar vermemesinin anlaşılması sonrasında tıbbi görüntüleme alanında çok fazla ultrasonik araştırmalar yapılmıştır ve hâlâ yapılmaktadır. Ayrıca ultrasesin günümüzde teşhis amaçlı uygulamaları yanı sıra tedavi amaçlı uygulamaları da mevcuttur.

1.1.1 Ultrasesin Malzeme Analizi Alanındaki Uygulamaları

Teknolojik malzemelerin özelliklerinin ultrasonik karakterizasyonu, 1940'larda incelenmeye başlanmıştır. Rayleigh (1894) tarafından açıklanan düşük frekans Rayleigh limitinde ($\lambda \gg D$) kürelerden yansıyan dalgaların denklemlerini; Mason ve McSkimin (1947), herhangi bir metalin taneciklerinin saçtığı dalgalara uygulamışlardır. Rayleigh, çalışmalarında homojen olmayan bir sıvı içindeki tanecikleri dikkate almıştır. Mason ve McSkimin çalışmalarında, poli-kristallerde ultrases dalgalarının yayılmasını inceleyerek düşük frekans Rayleigh limitinde frekansın dördüncü kuvveti ile saçılma sönümü derecelendirilmesini yapmıştır. Düşük frekans Rayleigh limitinde, dalgaların λ dalga boyunun, içyapıda etkileşime girdiği taneciklerin ortalama çaplarına (D) göre çok çok büyük olduğu aralıktır ($\lambda \gg D$). Dolayısıyla ortaya üç farklı bölge çıkmıştır. Bu bölgeler; ($\lambda \gg D$) tane boyutlarına göre yüksek dalga boylu dalgalar (düşük frekans Rayleigh limiti), tane boyutlarına yakın dalga boylu dalgalar ($\lambda \approx D$) ve tane boyutlarına göre düşük dalga boylu (yüksek frekanslı) dalgaların ($\lambda \ll D$) kullanıldığı bölgelerdir.

Bunu izleyen çalışmalar, poli-kristaller üzerine ($\lambda \approx D$) ve ($\lambda \ll D$) bölgelerinde uygulanan teorik çalışmalar olmuştur (Pekeris 1947, Roth 1948, Huntington 1950). Bhatia ve Moore (1959), Rayleigh limitinde genel bir ortorombik kristal için taneciklerin elastik sabitlerindeki değişimleriyle birlikte saçılan dalganın yapısını açıklamıştır. Rayleigh limiti dışındaki frekanslar için teorik çalışmalar daha sonraları yapılmıştır. Hirsekorn (1982, 1983), Stanke (1984) ve Weaver (1990), tanecikleri küre saçıcılar gibi bireysel saçıcılar olarak kabul etmiş, frekansın birer fonksiyonu olarak sönüm hesaplamalarının yapılmasını kolaylaştırmıştır. Yönelimleri düzgün dağılmış olan kübik simetrideki tanecikler tarafından saçılan dalgaların üç bölge için sönüm denklemlerini çıkartmışlardır (Denklem 1.1).

1. Rayleigh Saçılma Bölgesi ($\lambda \gg D$)

$$\alpha(\lambda, D) = C_r D^3 \lambda^4$$

2. Stokastik Saçılma Bölgesi ($\lambda \approx D$)

(1.1)

$$\alpha(\lambda, D) = C_s D \lambda^2$$

3. Difüzyon, veya geometrik Saçılma Bölgesi ($\lambda \ll D$)

$$\alpha(\lambda, D) = C_d / D$$

Bu denklemlerde kullanılan C_r , C_s , C_d katsayıları malzemeye ait sabitlerdir (Goebbels 1994). Bu sabitler, yarı-izotrop malzemelerdeki $C_r V^4 = S$ (V ; boyuna dalga hızı, S saçılma parametresi $[(\text{mm}/\text{ms})^{-4}]$) eşitliğinden çıkarılır. Aynı şekilde, $C_s V^2 = T$ ve $C_d = U$ eşitliklerinden çıkarılır ki burada T ve U saçılma parametreleridir. Küresel saçıcılar için “ D ” çaptır. Düzensiz taneler için ilk zamanlarda tanelerin en büyük boyutu alınmıştır. Fakat daha sonraki çalışmalar göstermiştir ki tanelerin dağılımından dolayı bu değer tane çaplarının ortalaması olmalıdır (Roney 1950, Papadakis 1964, Papadakis 1965, Merkulova 1970, Nicoletti 1991).

Ultras ses dalgasının madde içinde sadece bir tanecikle etkileştiği kabul edilerek oluşturulan teoriler; odaklanabilen transduserlar, zayıf saçıcılar olarak kabul edilen ultrasonik saçılma katsayısı düşük maddeler söz konusu olduğunda kullanılabilir. Bağımsız saçıcı yaklaşımını kullanan bu tekli saçılma teorilerinde Margetan (1991) ve Rose (1992), gelen ultras ses dalgasının ortamdan çıkmadan ortalama olarak bir tek saçıcı

ile etkileştiğini kabul etmişlerdir. Tekli saçılma teorileri; tanecik boyutu, ısıt iyileştirme, tanecik yapısı ve taneciklerin gürültü (noise) güç spektrumu hakkında hem nicel hem de nitel olarak bilgi elde etmekte başarılı olmuşlardır (Margaten et al. 1992a-b, Russell ve Neal 1994a-b).

Ultrasonik parametreler (Ultras ses dalga hızı, sönümü, frekans ve zamana bağımlılığı vb.), ısıt işlem görek içyapıları değışmiş birçok yapıda incelenmiş ve çeşitli içyapı özellikleri ile karakterize edilmiştir. Literatürde bu konuda ferritik çeliklerde (Grayeli *et al.* 1985, Papadakis 1970), süperalaşımlarda (Jayakumar *et al.* 1991), alüminyum alaşımlarında (Rosen *et al.* 1985) kullanılarak yapılmış birçok çalışma yer almaktadır. Yapılan karakterizasyon çalışmalarında; ultrasonik olarak akma gerilimi (Klinmann *et al.* 1981), kırılma tokluğu (Vary 1988), tane boyutu (Stigh 1987), hacim oranı (Kutty *et al.* 1987) incelenmiştir.

Kumar vd. (2002), 9Cr-1Mo ferritik çeliklerinde ultrasonik parametreler ile sertlik değerlerini, tane boyutlarını ilişkilendirmiş ve faz dağılımını ultrasonik olarak incelemişlerdir. Martenizit faz oranının artmasıyla ultras ses hızının düştüğünü görmüşlerdir. Dolayısıyla malzemenin sertlik değerleri dolayısıyla martenizit fazı oranını ultrasonik olarak hız ölçümleri ile ilişkilendirmişlerdir. Ayrıca su verilen numunelerde yani martenizit fazın yüksek oranlarında sönümün düşük çıktığını görmüşlerdir. Kumar vd. (2003), bir başka çalışmalarında ise Titanyum ve Bakır alaşımlarında ve 316 paslanmaz çeliklerinde yapılan hız ölçümlerini incelemişler, ve malzemelerin poisson katsayıları ile olan ilişkisini belirlemişlerdir. Hız arttıkça poisson oranının azaldığı tespit edilmiştir.

Hsu vd. (2004) farklı sıcaklıklarda temperlenmiş martenitik paslanmaz çeliklerin mekanik özelliklerini ultrasonik parametreler ile (hız, sönüm) karakterize etmişlerdir. 1 ve 5 MHz frekanslı boyuna dalga gönderen temaslı probler ve geri yansıma tekniğı kullanarak aldığı ölçümlerde hız değerlerinin yalnızca esneklik katsayısı ile doğru orantılı olduğunu, sönüm değerlerinin ise mukavemet ve sertlik ile doğru orantılı olduğunu tokluk ve yönelimin ters orantılı olduğunu deneysel olarak göstermişlerdir. Frekans yükseldikçe verilerin dağılımının arttığını görmüşlerdir.

Gür vd. (2005), 1040 ve 4140 ıslah çelikleri ile yaptıkları çalışmada fazyapısı ile ultrasonik özellikler arasındaki ilişkiyi incelemişler, ısıl işlem uygulayarak elde ettikleri farklı faz yapısındaki numunelerde, 20 MHz boyuna dalga ile geri yansıma metoduna göre ultrasonik hız ölçümü almışlardır. Tane boyutunun ultrasonik hızı etkilememesi için ısıl işlem çalışmasında aynı tane boyutunda fakat farklı içyapıda numuneler elde etmişlerdir. Martenzit, beynit, ince perlit, kaba perlit ve temperlenmiş martenzit yapılarında ölçtükleri hızlar aşağıda verilmiştir.

Martenzit: 5904 m/s

Beynit: 5934 m/s

İnce perlit: 5948 m/s

Kaba perlit: 5952 m/s

Temperlenmiş martenzit: 5953 m/s

1.1.2 Akustik Mikroskop

Malzeme içine gönderilen ultrases dalgalarını kullanarak akustik mikroskop oluşturma teorisini ve uygulamasını Korpel vd. (1971) yapmıştır. Lemons ve Quate (1974), numune yüzeyinin taranarak tüm yüzeyin 2 boyut görüntüsünün alınmasını sağlayan taramalı akustik mikroskobu (Scanning Acoustic Microscope, SAM) geliştirmişlerdir. Transmisyon tekniğini kullanan bu ilk akustik mikroskop modeli sinyallerin numune içinden geçerken uğradıkları sönümün incelenmesiyle çalışmaktaydı. Daha sonra frekans ile beraber çözünürlüğün arttırılması (Atalar *et al.* 1979, Nikoonahad 1984) ve tarama sisteminin geliştirilmesi (Quate *et al.* 1979, Kino 1980) ile akustik mikroskop geliştirilmiştir. Maev vd. (1988, 1997, 1998, 2004, 2006), transmisyon tekniği ile alışan Akustik Mikroskobu kullanarak çeşitli malzemelerde uygulamalar yapmış ve z doğrultusunda ilerleyen çıkış sinyalinin işlenmesi için $A(z)$ metodunu ve hız değerlerini incelediği $V(z)$ metodunu geliştirmiştir.

Numune yüzeyinden geri yansıyan ultrases dalgalarının kullanılması ile numunelerin daha hızlı ve daha net görüntülerinin alınması sağlanmıştır (Hoppe *et al.* 1985). Zinin vd. (1997), taramalı akustik mikroskobu kullanarak üç boyutlu saçıcı merkezlerinin

görüntülenmesi ile malzeme analizinin teorik çalışmasını yapmış ve bununla ilgili deneysel çalışmayı bileşik haldeki numunelerde Popovics (2001) gerçekleştirmiştir. 2004'te Liu vd., 55-75 MHz frekans aralığında çalışan akustik mikroskop geliştirerek doku örneklerinde uygulamalar yapmışlardır. Yüksek duyarlıklı lazer tabanlı akustik mikroskobu Murray vd. tarafından 2004'te geliştirilmiştir. Rabe vd. (2002), Akustik Atomik Kuvvet Mikroskobunu geliştirmiş ve Cantrell vd. (2008), yüzey inceleme üzerine modellemesini yapmıştır. Jhang (2009) ise lineer olmayan akustik ortamlarda frekans analizinde harmonik frekans, rezonans frekansı ve frekans kiplenimi kavramları üzerinde durarak modellenen Akustik Atomik Kuvvet Mikroskobu üzerinde inceleme yapmıştır.

1.1.3 Tanecik Boyutu

Bir poli-kristal malzeme, düzgün kristal yapıya sahip farklı yönelimli taneciklerin oluşturduğu bir yapıdır. Bu taneciklerin yönelimlerinin farklılığından dolayı elastik özellikleri anizotropiktir. Poli-kristal bir yapıya gönderilen elastik dalgalar, tanecik sınırlarından saçılarak sönmeye uğrarlar. Bu sönmü ve hızındaki değişiklik taneciklerin boyutu, şekli, yönelim dağılımları ve kristal anizotropisine bağlıdır. Tanecikler eşit boyutlara sahip ve farklı yönelimli ise saçılan dalga yönelime bağlı değildir. Farklı yönelimli, eşit boyutlu taneciklerin oluşturduğu polikristaller düşünülerek bunların içlerinde elastik dalgaların yayılımı hakkında yapılan çalışmalar ultrases ile tanecik boyutu belirleme çalışmaları için çok önemli olmuştur (Hirsekorn 1982, Stanke ve Kino 1983,1984, Beltzer and Brauner 1987, Turner 1999). Stanke ve Kino, tanecik boyutu dağılımı belirleme çalışmaları yapmıştır. Çalışmalarında Hirsekorn'un çalışmalarından faydalanılarak küresel taneciklerinde çoklu saçılma teorilerini kullanmışlardır (Ahmed and Taylor 2004).

Geri-yansıma (Pulse-echo) tekniği ile tanecik boyutu belirleme çalışmaları Beecham (1966) ile başlayarak birçok malzemede kullanılmıştır (Fay *et al.* 1976, Goebbels and Höller 1976). Bu çalışmalarda bazı bilim adamları (Goebbels 1980, Goebbels and Höller 1980, Goebbels *et al.* 1984, Saniie and Bilgutay 1986, Saniie *et al.* 1988) teorik olarak geri-yansıma dalgalarının tanecik boyutu hesabında kullanılmasını açıklanırken

bu teorilerin deneysel olarak uygulamaları diğer araştırmacılar (Klinmann *et al.* 1980, Klinmann and Stephenson 1981, Hecht *et al.* 1981, Saniie and Bilgutay 1985, Nicoletti *et al.* 1990) tarafından gerçekleştirmiştir.

Daha sonraki yıllarda, özellikle metal alaşımlarda ısıt iyileştirme ile tanecik boyutunun değişimleri geri-yansıma tekniği ile araştırılması (Yoon and Ramabadran 1992, Bridge and Merikh 1996) ve seramik numunelerde malzeme karakterizasyonu ile ilgili olarak tanecik boyutu, sertlik gibi fiziksel özelliklerin tespiti yapılmıştır (Sturges *et al.* 1991, Bashyam 1991, Bashyam and Rose 1992). Madsen vd. (1999) tanecik boyutu belirlenmesinde kullanılan ana tekniklerin karşılaştırmasını yaparak, bunların uygulama zorlukları ve belirlenebilen en küçük tanecik boyutunu vererek, metotlar arasında bir değerlendirme yapmıştır. Kruger vd. (1998) ve Bonnin vd. (2000), ultrases dalgalarını kullanarak sırasıyla demir ve kağıt numunelerde malzeme karakterizasyonu çalışmalarını yapmışlardır.

Ahn ve Lee (2000)'nin yaptıkları çalışmada saf demirde, hypo-ötektoid ($\%C < 0,8$) çeliklerde ve hyper-ötektoid ($\%C > 0,8$) çeliklerde tane boyutu dağılımının, karbon içeriğinin ve normalizasyon sıcaklığının ultrasonik sönüme etkisi incelenmiştir. Daldırma metodu kullanarak, düzlem dalga tipi 5, 10 ve 15 MHz frekanslı transduserler ile sönüm ölçümleri almışlardır. Numunelerde karbon içeriğinin artmasıyla sönümün azaldığını, çünkü karbon elementinin ortalama tane boyutunu düşürdüğünü belirtmişlerdir. Ayrıca numunelerde bulunan iri tanelerin stokastik bölgede bulunmasının sonuçları etkilediğini tespit etmişlerdir.

Ahn vd. (1999) yaptıkları başka bir çalışmada ise düşük karbon çeliklerinde Akustik Rezonans metodu ile Lorentz tipi EMAT (Elektromanyetik transduser) kullanarak ultrasonik hız ve sönüm ölçümlerini almışlardır. Bu metotta rezonans frekansında hız değerleri numune kalınlığından direk olarak ölçülürken sönüm değerleri ise dış uyartım durunca rezonans titreşiminin dik ilerleyen sinyallerinden elde edilir. Sönüm değerlerinde, 5 MHz titreşim frekanslarında en uyumlu sonuçları almışlardır. Ayrıca akma mukavemetinin de karakterize edilebileceğini belirtmişlerdir. EMAT problemlerin laser problemler gibi avantajı numuneye temassız olarak ölçüm alınabilmesidir. Elektrik

enerjisinin titreşim enerjisine çevrilirken diğer kullanılan problar kadar verimli olmadıkları belirtilmiştir. Kullanılan EMAT Transduserlerin frekansları 1, 3, 5 MHz dir. 5 MHz değerinde en iyi sonuç alındığı belirtilmiştir.

Sundin ve Artymowicz (2002) yaptıkları çalışmada, düşük karbon çeliklerinde ortalama tane boyutunu belirlemek için ultrasonik lazer tekniğini uygulamıştır. Bilinen tane boyutları ile elde edilen sönüm değerlerini birbirlerine ilişkilendiren kalibrasyon eğrileri çizerek doğrudan ortalama tane boyutlarının belirlenebildiğini belirtmiştir. Bu teknik, lazer kullanılarak ortamda belli bir noktada oluşturulan titreşim dalgalarının alıcı prob ile algılanması ve algılanan sinyallerin değerlendirilmesi sonucu yapılmaktadır. Literatürde lazer tekniği ile yapılan çalışmalar; ferrit-östenit faz dönüşümleri incelenmesi (Dubois *et al.* 1998), martenizit faz dönüşümleri (Scrubby *et al.* 1993), alüminyum ve paslanmaz çelik mikroyapı geliştirilmesi (Spicer 1997,1998), bakır ve çeliklerde rekristalizasyon (Scrubby *et al.* 1993, Scrubby *et al.* 1995), grafit çökmesi (Kuger *et al.* 1998), çelik ve alüminyum plakaların kalınlık tespiti (Edwards *et al.* 1992) şeklinde sıralanabilir. Lazer tekniği ile ultrasonik olarak östenit tane boyutu ve kalınlık ölçümü yapılmış bir başka çalışmayı da Levesque vd. (2006) yapmıştır. Çalışmalarında dikişsiz borularda et kalınlıkları ile içyapıda bulunan östenit tane boyutları üzerinde durmuşlardır.

Toz metalurjisi ve döküm ile oluşturulmuş bakır ve bakır-alüminyum numunelerinde, tane boyutu-ultrasonik sönüm ilişkisine frekansın etkisini Zhang vd. (2004) incelemiştir. Palanisamy vd. (2005) ise çalışmalarında alüminyum alaşımı döküm kalıplarında yüzey pürüzlülüğünün ve tane boyutlarının ultrasonik muayeneye etkisine bakmışlardır. Yumuşak dökme demirlerde ise matris yapının ultrasonik sönüme etkisi 2007 yılında Liu vd. tarafından incelenmiştir. 2009 yılında iki veya daha fazla metalden oluşan yapılarda (intermetaller) ultrases dalgalarının iç yapı ile etkileşimlerini Singh ve Pandey incelemiştir.

Zeng vd. (2010), saf Niyobyum numunelerde frekansın fonksiyonu olarak sönüm değerlerini ölçmüşlerdir. 30-70 μm aralığında tane boyutlarına sahip numunelerde sönümün frekansa üstel bağımlılığını 1,6 olarak bulmuşlardır. Bu değer teorik olarak

Stokastik saçılma bölgesinde 2'dir. Bu değer, deneysel değere yakın çıkmıştır. Stokastik bölgeye yakın çıkmasının nedeninin az da olsa içyapıda bulunan iri taneler olduğunu belirtmişlerdir. Çalışmalarında, numuneler içerisinde ultrases dalgalarını etkileyen tane boyutlarını, tane yönelimini ve kristalografik yapıyı ultrasonik daldırma yöntemi ve pulse-echo tekniği ile incelemişlerdir.

Yang vd. 2011'de yaptıkları teorik çalışmada, tane boyutlarının yönelim ve şekillerinin ultrasonik saçılmaya etkisini incelemişler ve 2012'de de dubleks mikroyapılarda, titanyum alaşımlarda uygulamalarını yapmışlardır. Aynı zamanda 2012'de yapmış oldukları diğer bir çalışmada, Zeng vd. (2010)'nin Niyobyum numuneler kullanarak yapmış oldukları çalışmalarının numune şekillerini incelemişlerdir (Yang *et al.* 2012 b). AISI 301 paslanmaz çeliklerinde de, Aghaie-Khafri vd.'nin (2012) daldırma metoduyla karakterizasyon çalışmaları olmuştur. Çalışmalarında, akma gerilimini tane boyutuyla ilişkilendiren Hall-petch eşitliğini kullanarak ultrasonik sönümü akma gerilimiyle doğrudan ilişkilendiren bir bağıntı elde etmişlerdir.

2. GENEL BİLGİLER

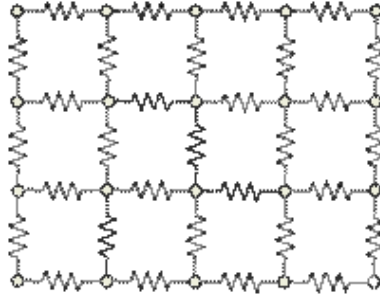
İnsan kulağının algılayabildiği ses dalgaları 20 Hz – 20 kHz frekans aralığındadır. 20 kHz'in üstündeki frekanslardaki sesleri, insan kulağı algılayamaz. Bu seslere ultrases denir. 20 Hz sınırının altındaki ses dalgalarına ise infrases denir. İnsan kulağının duyarlı olmadığı ultrases dalgalarına bazı hayvanların duyarlı olduğu tespit edilmiştir. Bütün müzik aletlerinin çıkardıkları sesler işitilebilir seslerdir. Müzik aletlerinin meydana getirdikleri dalga vuruları yaklaşık olarak periyodiktir. Öte yandan gürültü, periyodik olmayan dalga vurularının sebep olduğu hoş olmayan sestir. İnfrases dalgalar büyük kaynaklar tarafından meydana getirilebilirler (deprem dalgaları gibi).

Bu bölüm “Ultrases” ve “Metal Malzemeler” olmak üzere iki kısımdan meydana gelmektedir. “Ultrases” başlığı altında ses ve ultrases dalgalarının ortamda yayılırken göstermiş oldukları davranışlar ve uymuş olduğu prensipler, “Metaller” kısmında ise metal malzemeler hakkında genel bilgiler verilmektedir.

2.1 Ultrases

2.1.1 Sesin Özellikleri ve Mekanik Dalgaların Yayılması

Ses, denge durumunda bulunan bir ortamda taneciklerin mekanik titreşimleridir. Ses dalgaları ise titreşim dalgalarıdır. Bu titreşimler esnek bir maddenin parçacıklarının, moleküllerinin veya atomlarının durgun bir halden bir dış kuvvetin etkisiyle hareket haline geçirilmesi sonucu oluşmaktadır. Bütün maddeler, birbirlerine atomlar arası kuvvetler ile bağlanmış atomlardan (veya moleküllerden) oluşmaktadır. Bu atomik kuvvetlerin etkisi Şekil 2.1'deki gibi yay modellemesi ile açıklanabilir. Atomlar arası bağlardan dolayı, bir atomun titreşimi yanındaki atomun da denge durumunu bozarak titreşmesine neden olacaktır (İnt.Kyn.1).



Şekil 2.1 Maddeler içindeki atomlar arası yay modellemesi.

Bir titreşim dalgasının frekansı (f), yayıldığı ortamın atomlarının titreşim frekansı ile aynıdır ve birimi Hertz (Hz)'dir. Bir titreşimin oluşması için geçen zamana ise dalganın periyodu (T) denir. Titreşim periyodu boyunca dalga, belli bir miktar yol alır. Bu mesafe dalgaboyu (λ) olarak adlandırılır. Ortamda yayılan dalgaların birim zaman içinde aldıkları yola ise dalganın hızı (V) denir. Hız, dalga boyu ve periyod arasındaki ilişki, Denklem 2.1'de verilmiştir.

$$V = \frac{\lambda}{T} \quad (2.1)$$

Mekanik bir dalga ortamdaki parçacıkların, denge halinde olan ortam parçacıklarının belli bir t zamanında denge konumundan olan yer değişimi,

$$a = a_0 \sin \left[2\pi f \left(t - \frac{x}{V} \right) \right] \quad (2.2)$$

bağıntısı ile verilir. Burada parçacıkların t anında denge konumundan olan uzaklığı "a", parçacık titreşiminin genliği " a_0 ", parçacıkların titreşim frekansı "f", parçacığın dalganın ilerleme yönündeki konumu "x" ve dalganın ilerleme yönündeki hızı ise "V" ile verilmiştir.

Ses dalgaları; katı, sıvı ve gaz ortamlarında ilerleyebilirler, fakat vakumda yayılamazlar. Sesin yayılabilirliği ortamların sıkışabilirliği ile ters orantılıdır. Bu yüzden ses hızı gazlarda en yavaştır. Sıvılarda, gazlara göre bir yoğunluk artışı ve bununla orantılı olarak sıkışabilirlikte bir azalma söz konusudur. Katılarda ise dalgaların ilerlemesi en hızlıdır. Ayrıca sesin hızı, sıvılarda ve gazlarda sıcaklıkla orantılı olarak artmaktadır.

Havada: 331 m/s,	Suda (50 ⁰ C) : 1540 m/s,
Civada: 1450 m/s,	Suda (25°C): 1497 m/s,
Yağda: 1450 m/s,	Suda (15°C): 1410 m/s

Sıvı ve gazlar sıkıştırmaya ve genişlemeye karşı katılardan daha fazla bir direnç gösterirler (Ekinci *et al.* 2004, 1994). Bir malzemede ultrasonik dalgaların yayılmasına karşı gösterilen dirence akustik empedans (Z) denir. Akustik empedans, malzemedeki ultrasonik dalga hızı ile malzemenin yoğunluğunun (ρ) çarpımına eşittir (Ekinci *et al.* 2004, Taşan ve Toprak 2001).

$$Z = \rho V \quad (2.3)$$

Akustik basınç ise, bir ultrasonik dalga tarafından malzemeye uygulanan değişken gerilmelerin genliğini ifade etmek için kullanılan terimdir (Ekinci *et al.* 2004).

$$P = Z \cdot a \quad (2.4)$$

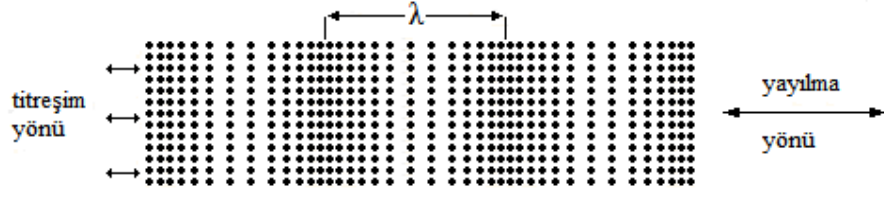
Burada P; akustik basıncı, Z; akustik empedansı, a ise titreşim genliğini belirtir.

2.1.2 Ultrasonik Dalga Türleri

Dalga hareketi ve titreşim hareketinin yönüne göre ultrases dalgaları 4 farklı şekilde sınıflandırılırlar.

2.1.2.1 Boyuna Ultrases Dalgaları

Boyuna dalgalara basınç dalgaları da denir. Yayıldığı ortamın parçacıklarını sıkışmaya ve gevşemeye zorlayarak hareket eder ve yayılma yönü titreşim yönü ile aynıdır. Şekil 2.2’de şematik olarak boyuna bir dalganın titreşim ve yayılma yönü belirtilerek gösterilmiştir.



Şekil 2.2 Boyuna dalgalar (Ekinci *et al.* 1994).

Boyuna dalga, üretimlerinin ve algılanmalarının kolay olmasından dolayı ultrasonik testte en çok kullanılan dalga türüdür. Boyuna dalgalar katı, sıvı ve gaz ortamlarda yayılabilirler (Ekinci *et al.* 2004).

Elastisite teorisine göre her tür esnek dalganın yayılma hızı (Ekinci *et al.* 2004, Brown 1996)

$$V = \sqrt{(E/\rho) \cdot f(v)} \quad (2.5)$$

olarak verilir. Bu bağıntıda V, dalga hızı; E, Elastisite modülü; ρ , ortam yoğunluğu; v , Poisson oranı olarak verilmiştir. Denklemden görüldüğü gibi dalga hızı Poisson oranının bir fonksiyonudur. Poisson oranı, uygulanan gerilme yönündeki deformasyonun, gerilmeye dik eksenlerdeki deformasyona oranını verir. Elastisite modülü ise elastik bölgede malzemenin katılığının (rijitliğinin) bir ölçüsüdür.

Buna göre boyuna dalganın hızı

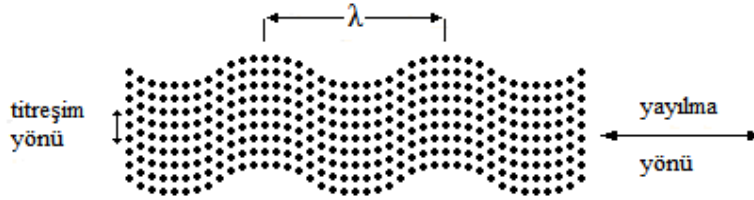
$$V_B = \sqrt{\frac{E(1-v)}{\rho(1+v)(1-2v)}} \quad (2.6)$$

olarak verilir. Bu bağıntı yardımıyla yoğunluğu bilinen bir malzemede ultrasonik hız ölçümü ile elastisite modülü belirlenebilir. Boyuna dalgaların hızları hesaplanırken kullanılan elastisite modülüne “Young Katsayısı” denir.

Boyuna dalgalar, sınır yüzeylerdeki empedans farklılığından daha az etkilendiklerinden, kaba taneli yapılar ve dentritler tarafından daha az saçılırlar. Boyuna dalgaların dalga boyu, aynı frekanstaki enine dalgaların dalga boyundan 1,8 kat daha uzun olduğundan, sönümleri daha azdır (Ekinci *et al.* 1991).

2.1.2.2 Enine Ultrases Dalgaları

Titreşim yönü yayılma yönüne dik olduğundan dolayı enine dalgalara kesme dalgaları da denir. Şekil 2.3’de enine dalga, titreşim yönü ve yayılma yönü ile birlikte gösterilmektedir.



Şekil 2.3 Enine dalgalar (Ekinci *et al.* 1994).

Enine dalgalar yayıldıkları ortam parçacıklarını dik çekmeye zorlarlar ve sadece katılarda yayılırlar. Sıvı ve gazlarda atom veya moleküller arası mesafe büyük olduğundan, bunlar arasındaki çekme kuvveti, birinin diğerini hareket ettirmesi için yeterli gelmemekte ve dalga zayıflamaktadır. Enine dalga hızı boyuna dalga hızının yaklaşık yarısıdır. Çizelge 2.1’de bazı ortamlarda boyuna ve enine ultrases dalgalarının yayılma hızları verilmiştir. Enine dalganın hızı,

$$V_E = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (2.7)$$

olarak verilir (Ekinci *et al.* 2004). Burada “G” kayma modülüdür ve malzemenin katılığının başka bir ölçüsüdür.

Çizelge 2.1 Bazı ortamlarda ultrases dalgalarının yayılma hızları.

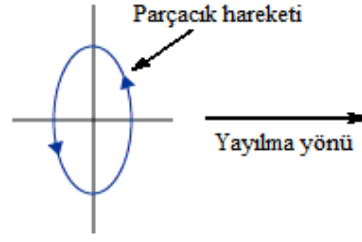
Ortam	Boyuna dalgaların yayılma hızı V_b (km/s)	Enine dalgaların yayılma hızı V_e (km/s)
Çelik	5,93	3,23
Dökme demir	3,5-5,6	2,2-3,2
Alüminyum	6,32	3,08
Porselen	5,6-6,2	3,5-3,7
Naylon, Perlon	1,8-2,2	-
Motor yağı	1,25-1,74	-

2.1.2.3 Yüzey Dalgaları

Yüzey dalgaları ilk defa Lord Rayleigh tarafından açıklanmıştır (Rayleigh 1894). Bu yüzden bunlara Rayleigh dalgaları da denir. Bu dalga türü sadece malzeme yüzeyinde yayılır. Yüzey dalgalarında parçacık titreşimi eliptik bir yörünge takip eder (Şekil 2.4). Yüzey veya yüzeye yakın hataların tespitinde ve karmaşık şekilli parçaların yüzey testinde kullanılırlar. Yayılma hızları (V_y) titreşim modunun elipsoide dönüşümünden dolayı enine dalgalarinkinden daha azdır (Ekinci *et al.* 2004, Taşan ve Toprak 2001) ve hızlar arasındaki ilişki

$$V_y = 0,92 V_e \quad (2.8)$$

denklemini ile verilir.



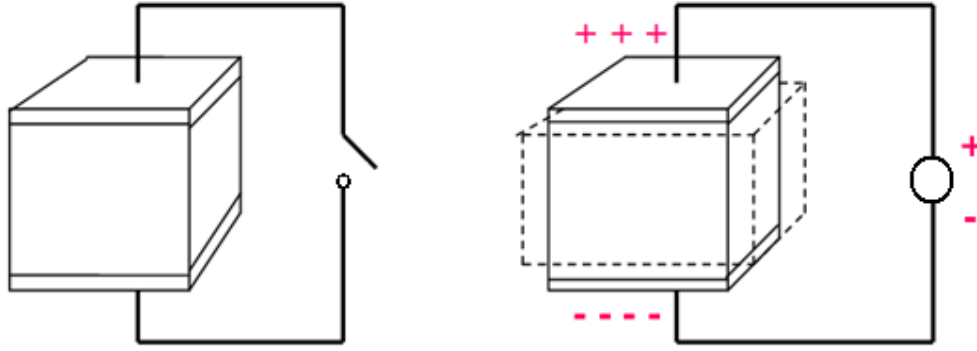
Şekil 2.4 Yüzey dalgaları.

2.1.2.4 Plaka (Lamb) Dalgaları

Bir yüzey dalgası, dalga boyunun üç katından daha az plaka kalınlığına sahip bir plakanın içine gönderilirse plaka (Lamb) dalgası meydana gelir. Plaka dalgalarının hızı sadece malzeme yoğunluğuna bağlı değil, aynı zamanda plaka dalgasının tipine, plaka kalınlığına ve frekansına bağlıdır (Ekinci *et al.* 2004).

2.1.3 Ultrasonik Dalgaların Üretilmeleri

Bir formdaki enerjiyi bir başka forma çevirebilen aygıtlara transduser denir. Ultrasonik transduser ise elektrik enerjisini ultrasonik enerjiye ve ultrasonik enerjiyi de elektrik enerjisine dönüştürür. En çok kullanılan ultrasonik transduserler, Piezo-elektrik olay prensibi ile çalışır. Ultrasonik basınç uygulandığında atomların yük merkezleri hareket eder ve bir potansiyel fark oluşur. Piezo-elektrik olayda mekanik basınç altında kalan bir piezo-elektrik malzeme içinde bir elektrik potansiyeli oluşurken, ters piezo-elektrik olayda ise, elektrik potansiyeli uygulanan bir piezo-elektrik malzemede elastik deformasyon, yani mekanik titreşimler meydana gelir (Şekil 2.5). Bu şekilde piezo-elektrik malzemeler, ultrasonik dalgaları hem üretmede ve hem de algılamada kullanılır (TMMOB 1997).



Şekil 2.5 Uçlarına gerilim uygulanan bir Piezo-elektrik malzemenin boyutlarındaki değişim.

Bazı malzemeler, piezo-elektrik malzemelere benzer özellikler gösterirler. Bu tür malzemelere ferro-elektrik malzemeler denir. Şekil değişimi, Piezo-elektrik malzemelerdeki gibi elektrik potansiyeli ile orantılı değildir. Ferro-elektrik malzemeler rastgele yönelmiş yük bölgelerinden oluşur. Ferro-elektrik plakanın yüzeyleri arasında potansiyel fark uygulandığında bölgeler elektrik alanına paralel yönelirler ve bir deformasyon oluşur. Ferro-elektrik özellik (hem pozitif hem negatif gerilim altında genleşme) gösteren malzemeyi Curie noktasına kadar ısıtma (ferro elektrik özellik kaybolur) ve öngerilim noktasının altına soğutma ile piezo-elektrik özelliğe dönüştürülür. Bundan sonra malzeme piezo-elektrik malzeme gibi davranır (Ekinci 2004, 1991).

Kuvars, lityum sülfat, kadminyum sülfür ve çinko oksit piezo-elektrik kristal transduser malzemelerindendir. Baryum titanat, kurşun zirkonat titanat ve kurşun metaniobat başlıca ferro-elektrik malzemelerdir.

Çizelge 2.2 Bazı piezo-elektrik malzeme ve piezo-elektrik özelliği gösteren malzemelerin parametreleri (Krautkramer 2000).

	Baryum titanat	Kuvars	Lityum sülfat
	(BaTiO₃)	(SiO₂)	(LiSO₄)
Yoğunluk (gr/cm ³)	5,4	2,65	2,06
Akustik hız (m/s)	5100	5740	5460
Akustik empedans (10 ⁶ NS/m ³)	27	15,2	11,2
Piezo-elektrik modülü (10 ⁻¹² m/Volt)	125-190	2,3	15
Normal Transduser	İyi	İyi	Zayıf
Açısal Transduser	İyi	orta	Orta
Daldırma Transduser	orta	iyi	Çok iyi

Çizelge 2.2’de ultrasonik dalga üretmek için kullanılan malzemeler ve özellikleri verilmiştir. Piezo-elektrik modülü, Volt başına kalınlıktaki değişmeyi gösterir. Boyuttaki bu değişme değeri, üretilen ultrases dalgalarının genliğine eşittir. Piezo-elektrik transduserlerden başka az da olsa endüstride kullanılan başka tipte ultrasonik transduserler de vardır.

- Piezoelektrik transduserler (10 kHz – 20 GHz)
- Magnetostriktiv transduserler (100 kHz civarı)
- Mekaniksel transduserler (50 kHz)
- Elektromagnetik transduserler (50 kHz)
- Elektrostatik transduserler (100 MHz üzerinde)

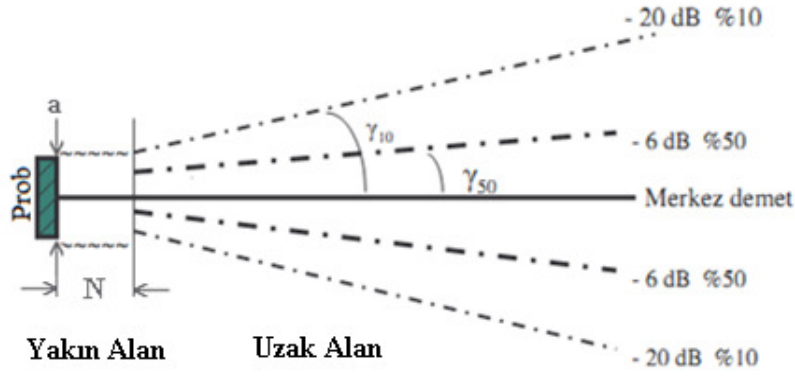
Verilen bu transduser çeşitlerinin yanlarında üretilen dalgaların frekans aralıkları verilmektedir. Dolayısıyla en geniş frekans aralığı bulunan Piezoelektrik transduserler uygulama alanlarında en fazla kullanılanlarıdır.

2.1.4 Ultrasonik Demet ve Özellikleri

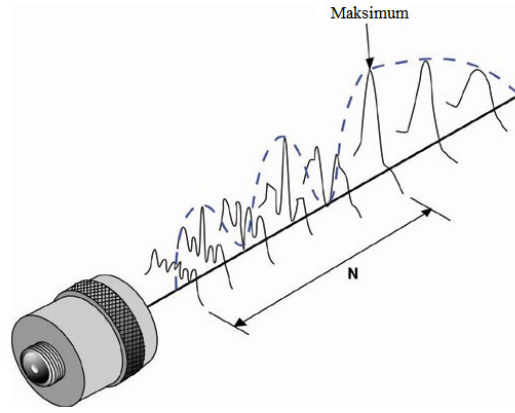
Ultrasonik dalgaların madde ortamında yayılması bir demet şeklinde olmaktadır. Ses demetinin transduserden ayrıldıktan sonra ilerlediği alan, yakın alan (Fresnel bölgesi) ve uzak alan (Fraunhofer bölgesi) olmak üzere iki bölgeden oluşur (Şekil 2.6). Bu iki bölgeyi birbirinden ayıran sınır “N”, transduser çapı “a”, frekansı “f” ve dalga hızı “V” olmak üzere;

$$N = \frac{a^2 f}{V} \quad (2.9)$$

denklemi ile verilmiştir (İnt.Kyn. 2). Bu sınır doğal odak noktası olarak ele alınmaktadır (Şekil 2.7).



Şekil 2.6 Ultrasonik demetin transduserden ayrıldıktan sonra ilerlediği Fresnel ve Fraunhofer alanları şematik gösterimi (Ekinçi 1994).



Şekil 2.7 Transduserden ayrılan demetin uzak ve yakın alanda şiddetindeki değişim.

Ultrases ışın şiddeti yakın alan bölgesinde uniform bir dağılım gösterirken, uzak alan bölgesinde ise ışınlar yatay dağılıma sahiptir. Uzak alanda ultrasonik ışınlar ıraksamaya ve saçılmaya başlar. Oluşan ıraksama;

$$\sin \gamma = \frac{0,61\lambda}{r} \quad (2.10)$$

denkleminde bulunur. Bu denklemde γ dağılıma açısı, r ise transduserin yarıçapıdır.

Ses demeti uzak alanda dağılıma açısı ile genişleyerek yayılır (Şekil 2.6). Uzak alanda ses basıncı akustik eksen (merkez demet) üzerinde maksimumdur (Şekil 2.7). Akustik demetin şekli ve boyutları; transduserin çapına, hıza ve frekansa bağlıdır (Denklem 2.9 ve Denklem 2.10).

Transduserin hemen önünde Fresnel alanı bulunur. Daha sonra ise demet γ açısı ile genişlemektedir. Ultrasonik demetin şiddeti de merkez demet üzerinde maksimumdur. Merkez demet ile γ_{50} açısı yapan doğrultularda ultrasonik demetin şiddeti 6 dB azalır. Yankı yüksekliği bu doğrultularda %50 azalır ve bu demete %50 sınır demeti de denir. Benzer şekilde %10 veya -20 dB sınır demeti de (γ_{10}), merkez demetin genliğinden onda birine indiği demet anlamına gelir.

Ultrasonik dalgalar akustik empedansları (Denklem 2.3) farklı iki ortamın ara yüzeyine dik geldiklerinde, dalgaların bir kısmı yansır, bir kısmı da geçer. Yansıyan veya geçen enerji miktarı iki ortamın akustik empedansları farkına bağlıdır. Fark büyükse enerjinin büyük bir kısmı yansıtılır (Ekinci 2004, Taşan and Toprak 2001). Gelen dalganın yansıyan ve geçen kısımları,

$$\% \text{Yansıyan} = \left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right)^2 \cdot 100 \quad \% \text{Kırınan} = \left(\frac{4Z_1Z_2}{Z_2 + Z_1} \right) \cdot 100 \quad (2.11)$$

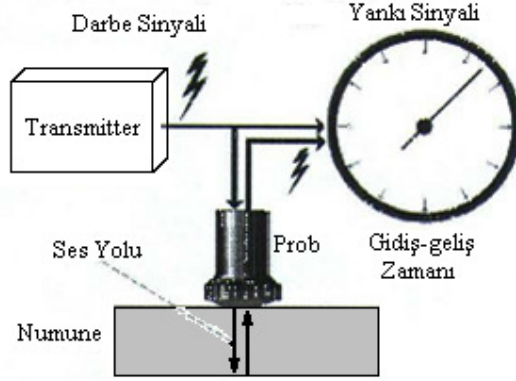
denklemleriyle verilir.

2.1.5 Ultrasonik Muayene Tekniği

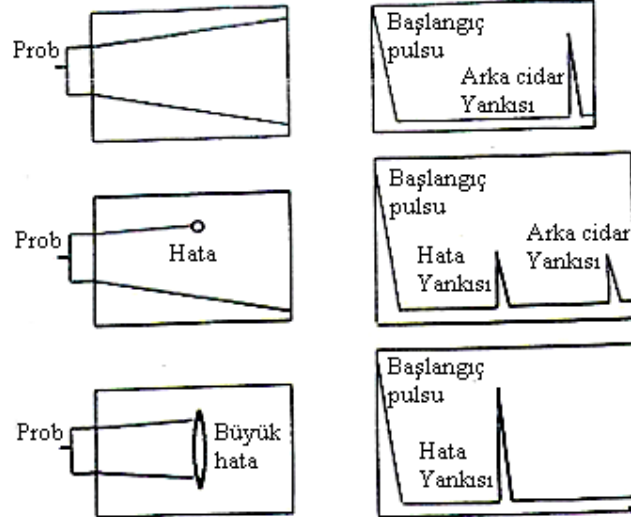
Ultrasonik muayene tekniği, ultrases dalgalarının malzeme içinde bulunan kırık veya çatlak analizlerinde kullanıldığı tahribatsız muayene tekniğidir. Ultrasonik muayenede çeşitli metodlar kullanılmaktadır. Yansıyan dalgaların kullanıldığı yöntem Darbeyankı (Pulse-Eko) metodu, iki yüzey arasında geçiş yapan dalgaların kullanıldığı yöntem Geçirim (Trough Transmission) yöntemi denir. Malzemelerin ultrasonik dalgalarla rezonans haline uyarılarak test edildiği yöntem ise rezonans yöntemi denir (Taşan and Toprak 2001). Bu metodlar en yaygın olarak kullanılanlardır.

Darbe yankı metodu, transduser tarafından gönderilen ses dalgalarının malzeme içinde bir süreksizliğe çarptıktan sonra tekrar transduser üzerine yansması ve algılanması esasına dayanır.

Şekil 2.8’de darbe-yankı metodu ile muayene mekanizması görülmektedir. Ultrasonik dalganın gidiş-geliş süresi aygıt tarafından ölçülmektedir. Numune kalınlığı (ses yolu), kumpasla hassas bir şekilde ölçülüp aygıt girildiğinde aygıt ses hızını hesaplar ve cihaz ekranına yansıtır. Şekil 2.9’da ise hatalı ve hatasız malzemede darbe-yankı metoduyla oluşan yankıların ekran görüntüleri verilmiştir.



Şekil 2.8 Darbe Yankı metodunun diyagramı (Krautkramer 2000).

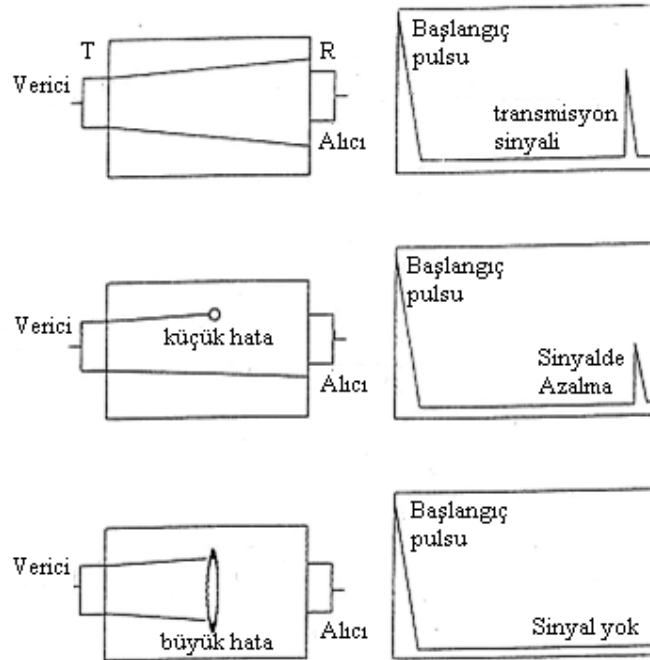


Şekil 2.9 Hatalı ve hatasız malzemelerin darbe yankı metoduyla muayenesinde oluşan ekran görüntüleri (Ekinci, 1994).

Şekil 2.9’da transduser (prob) hem alıcı, hem verici görevi görür. Öncelikle transduserdan çıkan dalga numune ile etkileşir ve başlangıç darbesi oluşur. Ultrasonik dalga numunenin arka cidarına çarptığında ise arka cidar yankısı oluşur ve cihaz

ekranında bir pik olarak kendini gösterir. Eğer numune içinde bir süreksizlik var ise kendini cihaz ekranında bir pik olarak gösterir. Eğer süreksizlik dalğanın ilerleyişini durduracak kadar büyük ise arka cidar yankısı görülmez.

Şekil 2.10'da transmisyon metoduyla hatalı ve hatasız malzemelerin muayenesinde oluşan ekran görüntüleri verilmiştir. Şekil 2.10'da görüldüğü gibi bir alıcı ve bir verici olmak üzere iki transduser bulunur. Numune içinde bir süreksizlik olmaması durumunda cihaz ekranında başlangıç darbesi ve transmisyon sinyali görülür. Eğer numune içinde herhangi bir süreksizlik var ise ultrasonik dalga zayıflar, dolayısıyla transmisyon sinyali azalır. Eğer hata büyük ise ultrasonik dalğanın geçişini engeller ve cihaz ekranında transmisyon sinyali görülmez.



Şekil 2.10 Transmisyon metodu (Ekinci 1994).

Ultrasonik test teknikleri ya temas ya da daldırma şeklinde yapılır. Temas tipi testte transduser numune ile doğrudan temas halindedir. Daldırma testinde, sıvı sızdırmaz bir transduser kullanılır ve transduser ile malzeme arasında sıvı bulunur. Doğrudan temas teknikleri, normal demet tekniği, açılı demet tekniği, yüzey dalgası tekniği ve Buffer-Rod (Tandem) tekniği şeklinde sınıflandırılır.

2.1.6 Ultrasonik Dalgaların Sönümü

Ultrasonik dalgaların çeşitli etkenlerle şiddet ve enerjilerini kaybetmesine ultrasonik sönüm denir. Ultrasonik demetin zayıflamasına esas olarak; saçılma, soğurulma, demet genişlemesi ve temas kayıpları neden olmaktadır. Metal ve seramiklerde sönümün büyük kısmı saçılmadan, sıvı ve plastiklerde ise soğurulmadan ileri gelmektedir. Soğurulma ses enerjisinin ısı enerjisine dönüşmesi olayıdır. Soğurulmaya; dalgaların sıkışması sırasındaki ısınmadan ve genişlemesi sırasındaki soğumadan kaynaklanan kayıplar, ferromanyetik malzemelerde magnetoelastik kayıplar, boşlukların neden olduğu ısı kayıpları neden olur. Ultrasonik dalgaların saçılmasına ise ilerlediği malzemenin tam olarak homojen olmaması neden olmaktadır. Akustik empedansı farklı iki ortam arasındaki sınır ultrasonik dalgalar için bir saçıcı unsuru oluşturur. İnküzyonlar, gözenekler ve tane sınırları da malzeme içinde birer süreksizliktir. Farklı yönelime sahip her tane, farklı akustik empedansa sahiptir ve sonuçta aralarındaki sınırlar saçılmaya sebep olur. Saçılan dalgaların yansıyan kısımları alıcı transduserler tarafından algılanarak test cihazı ekranında çimlenme denen belirtiler şeklinde gözlenir (Ekinci 1994, 1991).

Düzlemsel dalgalarda akustik basınç, uzaklık ile eksponansiyel olarak azalmaktadır.

$$P = P_0 e^{-\alpha x} \quad (2.12)$$

Burada α ; sönüm katsayısı, P_0 ; başlangıçtaki akustik basınç, P ; x mesafesindeki akustik basıncı göstermektedir.

Sönüm katsayısı (α), soğurulma (α_a) ve saçılma (α_s) katsayılarının toplamıdır (2.13).

$$\alpha = \alpha_a + \alpha_s \quad (2.13)$$

Sönüm katsayısı malzeme özelliklerine ve frekansa bağlıdır. Frekans yükseldikçe sönüm artar. Düşük frekanslarda zayıflama genelde soğurulmadan kaynaklanır, frekans yükseldikçe (dalga boyu tane boyutu mertebesine ulaştıkça) saçılma artar.

2.1.6.1 Ultrasonik Dalgaların Saçılması

Ultrasonik dalgaların saçılması; malzemenin tane boyutuna (D), ultrasonik dalgaının frekansına veya dalga boyuna bağlıdır. Malzemenin ortalama tane boyutu ve sesin dalga boyu arasındaki ilişkiye göre çeşitli saçılma mekanizmaları vardır.

a) $D/\lambda \ll 1$ olduğu durumda bir saçılma gözlenmez. Buna etkisiz saçılma denir ve Şekil 2.11(a)'da şematik olarak gösterilmiştir.

b) Şekil 2.11(b)'de şematik olarak gösterilen Rayleigh saçılması $0,02 < D/\lambda < 0,2$ şartında gerçekleşir. Ultrasonik testte en çok karşılaşılan mekanizmadır. Rayleigh saçılmasının görüldüğü bölgede saçılma katsayısı

$$\alpha_s = c_1 D^3 f^4 \quad (2.14)$$

dır. Burada c_1 malzemeye bağlı bir sabittir.

c) $D/\lambda \sim 1$ şartında oluşan Stokastik saçılma şematik olarak Şekil 11(c)'de gösterilmektedir. Bu bölgede tane sınırlarında yansıma, kırılma ve dalga dönüşümü oluşur. Bu saçılma daha ziyade kaba taneli yapılarda meydana gelir. Stokastik bölgede saçılma katsayısı

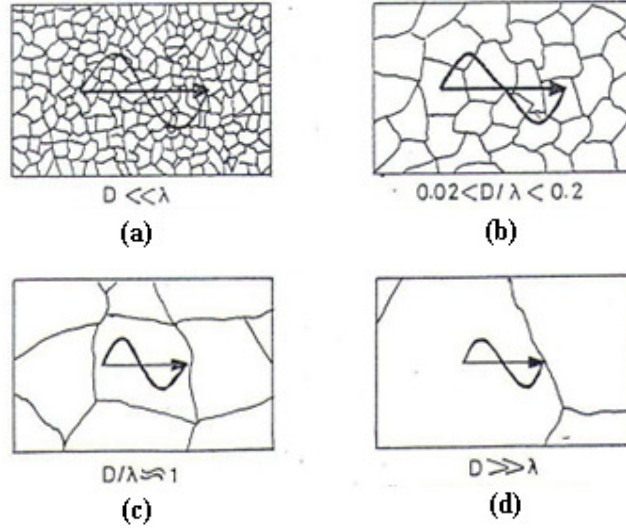
$$\alpha_s = c_2 D f^2 \quad (2.15)$$

dır. Burada c_2 malzemeye bağlı bir sabittir.

d) Şekil 2.11(d)'de şematik olarak gösterilen difüzyif saçılma ise $D/\lambda \gg 1$ şartında oluşur. Bu bölgede saçılma katsayısı frekansa bağlı değildir. Difüzyon bölgesinde saçılma katsayısı

$$\alpha_s = c_3 / D \quad (2.16)$$

dır. Burada c_3 malzemeye bağlı bir sabittir. Difüzyon bölgesinde saçılma, tane boyutu ile ters orantılıdır.



Şekil 2.11 Saçılma mekanizmaları a)Etkisiz Saçılma b)Rayleigh Saçılma c)Stokastik Saçılma, d)Difüzyif Saçılma (Ekinci 1991).

Bridge ve Merrih (1999), 316 östenitik paslanmaz çeliklerinde, ortalama tane boyutu ve dalga boyuna bağlı olarak saçılma katsayısının bulunmasında;

$$\begin{aligned}
 \alpha_s &= 0.58 D^3/\lambda^4 & (D << \lambda/2\pi, D: 10-60 \mu\text{m}) \\
 \alpha_s &= 3.6 \cdot 10^{-3} D/\lambda^2 & (D \sim \lambda/2\pi, D: 60-150 \mu\text{m}) \\
 \alpha_s &= 1.67 \cdot 10^{-4} /D & (D > \lambda/4, D > 150 \mu\text{m})
 \end{aligned} \tag{2.17}$$

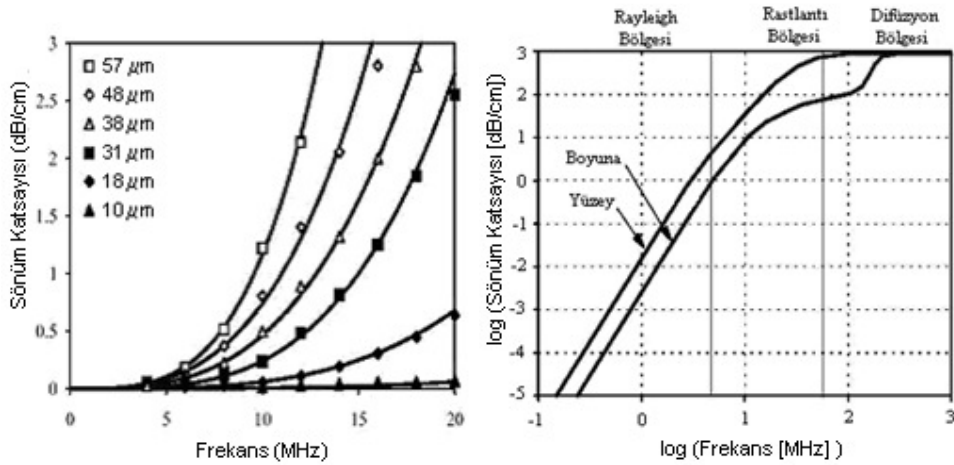
şeklinde Rayleigh, Stokastik ve Difüzyon bölgelerini saptamışlardır (Bridge and Merrih 1999). Aldıkları ultrasonik ölçümlerde enine ultrasonik dalgaları kullanmışlardır.

Papadakis (1964), 416 paslanmaz çeliği (%12 Cr), 440 paslanmaz çeliği (%17 Cr) ve Nikel numuneler üzerinde ultrasonik zayıflamayı belirlemiştir. Ultrasonik ölçümler puls-eko metoduna göre enine ve boyuna dalga ile yapılmıştır. Sonuçlar sönümün frekans ve tane boyutuna bağımlılığının 3 bölgede farklı olduğunu göstermiştir.

$$\begin{aligned}
& \lambda > 2\pi D & \text{için} & \alpha \sim D^3 f^4 \\
& \lambda < 2\pi D & \text{için veya } \lambda \cong D & \text{için } \alpha \sim T f^2 \\
& \lambda < < D & \text{için} & \alpha \sim 1/D
\end{aligned}
\tag{2.18}$$

Burada dalga boyu, λ ; dalga sönümü, α ; ortalama tane çapı, D ; dalga frekansı, f ile gösterilmektedir. T ise tanelerin genişlik ve şekline bağlı bir sabittir (Papadakis 1964).

Nagy'nin paslanmaz çeliklerde yaptığı ultrasonik çalışmada (1999), farklı frekanslardaki dalgaların, numunelerin tanecik boyutlarına göre göstermiş oldukları sönüm katsayıları değişimi dB/cm olarak Şekil 2.12'de verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi saçılma bölgelerini boyuna ve yüzey dalgalarına göre incelemiş ve sönüm katsayısı-frekans logaritmik grafiğini farklı bölgelere ayırmıştır. Bu grafiğe göre Rayleigh bölgesinde değişim düzgün iken, Raslantı bölgesinde ve Difüzyon bölgesinde değişimler orantılı değişmemektedir.



Şekil 2.12 Paslanmaz çeliklerin farklı tane boyutlarında sönüm – frekans ilişkisi (Nagy 1999).

Saçılma, test esnasında sinyal/gürültü oranını azaltmakta ve bu da süreksizliklerin belirtilerinin değerlendirilmesinde hatalara neden olmaktadır. “Gürültü” terimi ile yanıltıcı sinyaller kastedilmektedir. Bunlara çimlenme de denir. Arka yüzey sinyalleri ile aralarındaki güç farkı [dB] cinsinden karakterize edilir. Kaba taneli malzemelerde, ölçümlerin en iyi yapılabileceği frekans ve dalga boyu belirlenmeli, ses zayıflamasını azaltmak için düşük frekanslar kullanılmalıdır. Ancak bu algılama duyarlılığını

yükseltmek için büyük kristalli transduserler kullanmak gerekir. Genelde metallerde 1-5 MHz frekanslar kullanılır (Ekinci 1991).

2.1.7 Ultrasesin Etkileri

Artık günümüzde her alanda ultrases dalgalarının kullanımı için incelemeler yapılmaktadır ve gün geçtikçe ultrases dalgalarının etkileri kullanılarak birçok iş hızlanmakta ve ultrases dalgalarının zararsız yönü ile kullanımı artmaktadır. Ultrases dalgalarının etkileri; fiziksel, kimyasal ve biyolojik olarak sınıflandırılabilir.

Fiziksel etkileri aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- a) Kabarcık (Kavitasyon) Oluşumu: Yeterince büyük şiddetli ultrases dalgaları sıvılarda kabarcıklanma yaratır. Bu yöntem ile sıvı içerisinde bulunan katı cisimciklerin, bakterilerin, polimer zincirlerinin parçalanması sağlanır.
- b) Isı Etkisi: Farklı ortamlarda ve farklı ultrases dalgaları ile yapılan deneyler, ses titreşim enerjisinin ısı enerjisine dönüştüğünü ve ortamın ısındığını göstermiştir.
- c) Sis Oluşumu: Bir sıvı içerisinde ilerleyen şiddetli bir ultrases dalgası hava-sıvı sınırında yansıdığı zaman sıvı molekülleri püskürtür ve sıvı yüzeyinde bir sis tabakası gözlenir.
- d) Gazdan Arıtma: Bazı durumlarda katı ve sıvı içinde çözünmüş bulunan gazların arıtılması gerekebilir. Bu amaç ile gazdan arıtılmak istenen madde de ultrases'e tabi tutulur.

Kimyasal etkileri ise reaksiyonları hızlandırmada, oksitlendirmede, bileşim bozulmasında, kristallenmede, kaynama sıcaklığının değişmesinde, molekül zincirlerinin parçalanması gibi kimyasal tepkimelerde ve proseslerde görülmüştür. Kimyasal olaylarda ultrases dalgalarının etkilerini incelemek üzere sonokimya adında kimya dalı oluşturulmuştur.

Biyolojik etkileri ise aşağıda verilmiştir.

- a) Isı Etkisi: Ultrases'e maruz kalmış bir organın sıcaklığının arttığı gözlemlenir.

b) Mikro Masaj Etkisi: Ultrases bir organda yayılırken hücre grupları periyodik basınç değişimine maruz kalır. Bu olaya sesin ultra masaj etkisi denir.

c) Elektriksel Etkisi: Bazı protein veya selüloz molekülleri gibi iri biyoloji moleküller piezoelektrik olayı gösterirler. Ultrasesin oluşturduğu basınç değişimi iri biyolojik parçacıkların elektriksel kutuplanmasına yol açar.

2.1.8 Ultrasesin Kullanımı

2.1.8.1 Endüstride Kullanımı

Endüstrinin birçok kolunda ultrases dalgası kullanımı mümkün hale gelmiştir. Aşağıda maddeler halinde ultrases dalgalarının kullanıldığı yerler verilmiştir.

- Havada yayılabilirliği nedeniyle; kemirici hayvanların ve haşerelerin uzaklaştırılmasında kullanılmaktadır.
- Hava alanları ve limanların çevresinde oluşan sis ve dumanların ultrasonik dalgalarla dağıtılıp, uçak ve gemilerin geliş ve gidişlerindeki emniyeti sağlama ve geniş sahalara kurulmuş büyük sanayi tesislerini ve çevresini, kurulacak ultrasonik sistemlerle temizleme gibi avantajlarıyla da çevre güvenliği açısından ehemmiyet arz etmektedir.
- Suda yayılabilirliği nedeniyle; çeşitli sıvıların zehirli gazlardan arıtılmasında, derinlik ölçümlerinde, derişik karışımların hazırlanmasında, aletlerin sterilizasyonunda kullanılmaktadır. Ultrases, deterjan ve kirlerin daha çabuk kaynaşmasını sağladığı için temizleme işlemlerinde de kullanılmaktadır. Sonar ve radar olarak hedef tayinlerinde kullanılmaktadır.
- Katılarda yayılabilirliği nedeniyle; katısal ürünlerdeki çatlakların tespit edilmesinde, üretim esnasında kalite kontrolünde, sürtünme ısısı sağlanarak metal ve plastik kaynaklarında, mekaniksel zorlanma sağlanarak çözünme testlerinde kullanılmaktadır.
- Çok ince tanecikli fotoğraf emülsiyonları hazırlamada kullanılmaktadır.
- Tekstil, metal kaplama ve saatçilik gibi aşırı temizlik isteyen sanayi kollarında temizlik işinde kullanılmaktadır.

- Meşrubat sanayinde şarabı eskitmek, birayı yabancı mayalardan arıtmak, şuruplarda enzimleri glikoz gibi diğer ürünlere dönüştürmek, sütü sterilize etmek için kullanılmaktadır.
- Bazı kimyevî reaksiyonların hızının artırılmasında ve uzun zincirli kimyevî yapıya sahip polimerlerin parçalanmasında da kullanılmaktadır.

Yüksek frekanslı ultrasonik dalgalar, yoğunluk farkı ve diğer bazı sebepler yüzünden birbiri içine normal şartlarda homojen olarak karışmayan sıvıların, homojen olarak karışmasını sağlarlar. Sıvı haldeki demir-kurşun (Fe-Pb), alüminyum-kadmiyum (Al-Cd)'un donma anında yoğunluk farkı ve diğer faktörlerden dolayı homojen halde karışıp alaşım oluşturmaları çok zordur. Fakat soğuma anında ultrasonik dalgalar gönderilirse düzgün ve kaliteli bir alaşım elde edilebilmektedir.

1950 yılında Amerikan patentiyle üretilen bir cihaz, körlere kılavuzluk yapmaktadır. Bir baston misali ellerinde taşıdıkları bu cihaz, sürekli olarak ultrasonik dalgalar yaymakta, kulaklarına yerleştirilen mikrofona benzer başka bir cihaz da engellerden geri dönen sesleri görme engellinin hissetmesini temin etmektedir. Bu sayede görme engelliler, tıpkı yarasalar gibi, hiçbir yere çarpmadan güven içinde yürüyebilmektedirler.

2.1.8.2 Ultrasesin Medikal Alanda Kullanımı

Medikal alanda kullanımı tanısal ve tedavisel olarak ikiye ayrılır:

a) Diagnostik (Tanısal) olarak: Ultrases'in tıpta tanısal alanda kullanılmaya başlaması 1940'lerden itibaren olmuştur. Tanı amacıyla ultrases'i ilk kullanan kişi Avusturyalı araştırmacı Dr. Karl Dussik'tir. Yumuşak dokuları da görüntüleyebilmesi, iyonize edici etkisinin olmayışı ve röntgen ışınlarından çok daha zararsız olması gibi özellikleri ile ultrases; tanı tekniği açısından, diğer tekniklere göre büyük avantajlara sahiptir. Özellikle son 20 yıl içerisinde çok geliştirilmiş ve bilgisayarlarla donatılarak uygulamaya sokulmuştur.

b) Terapotik (Tedavisel) olarak: Günümüzde cerrahi uygulamalarında, fizyoterapide, onkolojide hipertermi etkisi ile kanserli hücrelerin yok edilmesinde, kemiklerin kaynamasında, dişçilikte oyuk açımında, diş temizlemede, gözde katarakt tedavisinde, idrar torbası hastalıklarında, safra kesesi ve taşı hastalıklarında, karaciğer hastalıklarında, böbrek taşlarının parçalanmasında, kan akımının ölçülmesinde ve bazı deri hastalıklarının tedavisinde kullanılmaktadır.

2.2 Metaller

2.2.1 Malzemeler ve Sınıflandırılmaları

Günümüz endüstrisinde kullanılan farklı özelliklere sahip malzeme türleri vardır. Bu malzemelerin sahip oldukları yapı ve özelliklerine göre kullanım amaçları da değişmektedir. Bu sebeple malzemeler atomlarına ve atomlar arası bağ türlerine göre sınıflandırmaya tabi tutulurlar. Buna göre malzemeler,

- i) Plastikler
- ii) Seramikler
- iii) Metaller
- iv) Kompozit Malzemeler

olarak dört temel sınıfa ayrılırlar. Plastikler, metal olmayan elementlerin kovalent bağ ile oluşturdukları malzemelerdir. Seramikler ise, metal ve metal olmayan elementlerin oluşturdukları iyonik bağli bileşiklerdir. Metallerde ise metal atomları düzenli bir biçimde dizilerek kristal yapıyı oluştururlar. Bu nedenle metallerin yoğunlukları diğer malzemelere göre belirgin şekilde yüksektir. Serbest elektron içerdiklerinden dolayı ısı ve elektriksel olarak iletkenlikleri fazladır. Saydam olmayıp opaktır ve ışığı iyi yansıtırlar. Çoğunlukla sünek ve plastik şekil vermeye elverişlidirler. Ayrıca alaşımlandırma ve ısıl işlemler ile özellikleri artırılabilirler. Kompozit malzemeler ise metallerin, seramiklerin ve plastiklerin bir arada kullanılarak oluşturulan malzemelerdir.

Dünyada üretilen ve endüstride kullanılan metallerin yaklaşık olarak %90'ını demir ve çelikler oluşturmaktadır (Yalçın ve Gürü 2002). Demir ve çeliğin endüstride yaygın olarak kullanılmasının başlıca nedenleri, doğada diğer metallere göre daha fazla bulunması, üretiminde diğer metallerin üretimlerine göre daha az enerji gerektirmesi ve özelliklerinin istekler doğrultusunda ve geniş sınırlar içerisinde iyileştirilebilmesidir. Doğada demir türevi metallerin dışında kalan metallerde vardır. Bunlar; Alüminyum, Bakır, Kurşun, Çinko, Kalay, Krom, Nikel, Magnezyum, Mangan, Wolfram, Kobalt, Vanadyum, Altın, Gümüş, Platin, Bizmut, Titanyum, Kadmiyum, Zirkonyum ve

türevleridir. Bunlar tek başına kullanılabildikleri gibi değişik özelliklerde malzemeler elde edebilmek amacıyla alaşım maddesi olarak da kullanılırlar. Dolayısıyla metaller;

- Demir Esaslı Metaller
- Demir Dışı Metaller

olmak üzere iki gruba ayrılır.

2.2.2 Demir Esaslı Metaller

Demir, özgül ağırlığı 7,8 gr/cm³ ve ergime sıcaklığı 1535 °C olan sert gri renkli bir metaldir. Kimyasal simgesi Fe, atom ağırlığı 55,845 ve atom numarası 26 olan demir, metaller arasında en yaygın olarak kullanılanıdır. Mıknatıslanma, ısıyı ve elektriği iyi iletme özelliklerine sahiptir.

Genellikle tabiatta bileşikler halinde bulunur. Üretimi ise demir minerali içeren cevherlerden yapılmaktadır. Demir-Çelik üretiminde en çok kullanılan mineraller; Magnetit (Fe₃O₄) ve Hematit (Fe₂O₃)'tir. Ayrıca Limonit ve Siderit'te bulunmakla beraber bunların demir yüzdesi düşük olduğundan kullanımları yeterince ekonomik değildir.

Yüksek fırınlarda, kokun (karbon) demir oksidi (genellikle Fe₂O₃) Denklem 19'da verilen tepkime ile indirgenmesi sonucu, % 4 karbon içeren ham demir (pik demir) elde edilir.



Elde edilen ham demir içinde daima bir miktar karbon bulunur (ağırlıkça % 3-5). Çelik üretimi sırasında ham demir içinde bulunan karbonun bir kısmının uzaklaştırılması gerekir. Ancak temelde çelik de bir demir-karbon alaşımıdır. Ham demir, genellikle sıvı halde iken çelik yapma fırınına taşınarak burada istenen özelliklere göre dekarburizasyon, deoksidasyon ve gerekli alaşımlama işlemleri yapılır (Smith 2001).

Demir esaslı metaller, demir-karbon alaşımları ve alaşımlı çelikler olmak üzere iki gruba ayrılırlar. Demir-karbon alaşımlarında sadece demir ve karbon bulunur. Alaşımlı çeliklerde ise demir ve karbonun yanında ayrıca Mn, Cr, Ni, Si, Mo gibi diğer alaşım elemanları vardır.

Demir-Karbon alaşımlarında temel eleman olan demir, saf halde çok yumuşak ve düşük mukavemetlidir. İçine katılan karbon oranı artıkça sertlik ve mukavemet artar, ancak süneklilik ve tokluk azalır. Sertlik ve mukavemetlerinin yanında elastisite modülünün yüksek oluşu diğer metallere göre ayrı bir üstünlük sağlar. Bu nedenle demir-karbon alaşımları, yapı ve makine malzemesi olarak kullanılmaya en uygun metallerdir.

Demir-karbon alaşımları, içerdikleri karbon oranına göre üç ana sınıfa ayrılırlar.

- a) Demirler
- b) Çelikler
- c) Dökme demirler

Demirler, saf denecek kadar az karbon içerirler (max % 0,1). Karbon oranı % 0,1- % 2 aralığında olan demir-karbon alaşımlarına çelik, % 2 - % 6,7 aralığına sahip karbon içeren alaşımlara ise dökme demirler denir.

2.2.3 Çelikler ve Sınıflandırılması

Çelikler, bileşimlerinde %2'den daha az karbon bulunduran demir-karbon alaşımlarıdır. Demir önce yüksek fırınlarda demir filizlerinden ham demir olarak elde edilir. Daha sonra çeşitli yöntemlerle (Üfleme yöntemiyle Thomas ve Siemens Martin çelikleri üretimi gibi veya Kupol fırınlarında dökme demir üretimi gibi) karbon oranı ayarlanarak çelik ya da dökme demir üretilir. Yüksek fırınlardan alınan ham demir içindeki karbon oranının azaltılmasıyla elde edilen çelik, günümüzde en çok kullanılan metal çeşididir. Çeliğin içeriğinde karbon dışında başka alaşım elementleri de bulunur. Karbon ve alaşım elementlerinin oranlarına göre farklı özelliklere sahip birçok çelik çeşitleri

mevcuttur. Çeliğe değişik oranlarda alaşım elementleri katılabileceği gibi, çeşitli işlemler (ıslah etme, temperleme, tavlama vs.) ile de içyapı kontrol edilerek kullanım amaçlarına göre değişik özelliklerde çelikler elde edilir.

Çelikler genel olarak; bileşimlerine göre, üretim yöntemlerine göre, son üretim yöntemine göre, ürün şekline göre, kullanım yerleri, üretim programları ve deoksidasyon durumlarına göre sınıflandırılır (İnt.Kyn. 3).

2.2.4 Karbon ve Alaşım Bileşimlerine Göre Çelikler

Çeliklerin istenen özelliklere sahip olabilmesi için kimyasal içeriklerinde bulunan karbon ve alaşım elementleri belirli oranlarda olması sağlanır. Bu sebeple kimyasal içerik bakımından sınıflandırılmaya tabi tutulur.

2.2.4.1 Çeliklerin Karbon Oranına Göre Sınıflandırılması

Saf demir, yumuşak bir metaldir. Belirli miktarlarda karbon, saf demire eklenecek olursa karbonlu çelikler elde edilir. Her ne kadar kesin sınırlar yoksa da yaklaşık olarak karbonlu çelikler aşağıda belirtildiği gibi sınıflandırılabilir.

I. Düşük Karbonlu Çelikler; Bu tür çelikler, % 0,2 oranına kadar karbon içerirler. Yumuşak çeliklerdir ve soğuk şekillendirmeye elverişlidirler. Çok yaygın olarak kullanılan alaşımsız çeliklerdir. Çok iyi kaynak edilebilirler ve su verme yöntemiyle fazla sertleştirilemezler.

II. Orta Karbonlu Çelikler; Bu çelikler, % 0,2 ile % 0,55 oranları arasında karbon içerirler. Isıl işlem için çok uygun çeliklerdir. Bu çeliklerin yapı ve özellikleri ısıl işlemle büyük ölçüde değiştirilebilir. Bu çelikler, karbon oranlarına göre; genel dövme çelikleri (%0,2 - 0,35) mil çelikleri (%0,35-0,45) ve aşınmaya dayanıklı çelikler (%0,45-0,55) olmak üzere üç gruba ayrılabilir.

III. Yüksek Karbonlu Çelikler; % 0,55 ile % 0,8 arasında karbon içerirler. Yüksek mukavemet ve aşınma direnci gerektiren yerlerde kullanılırlar. Kullanım alanına örnek olarak, pres kalıp blokları gösterilebilir.

IV. Yüksek Karbonlu Takım Çelikleri; Bu çelikler % 0,8 ile % 2 oranları arasında karbon içerirler. Yüksek aşınma direnci ve yüksek mukavemet gerektiren yerlerde kullanılırlar. Kullanım yerlerine örnek olarak torna kalem ve matkap uçları verilebilir.

2.2.4.2 Çeliklerin Alaşım Bileşimlerine Göre Sınıflandırılması

Alaşım elementleri, ferritin katı eriyik mukavemetlenmesini sağlamak, Fe_3C 'dan daha fazla alaşım karbür çökmesi sağlamak, çeliğin korozyon direncini sağlamak ve çeliklerin sertleşebilirliğini arttırmak amacıyla istenilen özellikler göz önünde bulundurularak gerekli oranlarda çelik içerisine ilave edilir. Alaşım miktarlarına göre çelikler sınıflandırılırlar;

I. Alaşımsız çelikler; İçerisinde üretim işlemleri sonrası karbon ve cevherden gelen elementler dışında başka element içermeyen çeliklerdir. Karbon çelikleri de denir.

II. Düşük Alaşımlı Çelikler; Düşük alaşımlı çelikler de alaşım elementi miktarı %5'ten azdır. Bu çelikler yüksek mukavemetli yapı çeliği ve makine parçaları üretiminde elverişlidir. Şekil verildikten sonra su verme ile sertlikleri artırılabilir (Onaran 1993, Serfiçeli 2000).

III. Yüksek Alaşımlı Çelikler; Yüksek alaşımlı çelikler, %5'in üzerinde alaşım elementi içermektedirler. Bu çelikler kendi arasında takım ve kalıp çelikleri, asite dayanıklı çelikler, yüksek sıcaklığa dayanıklı çelikler ve hız çelikleri olmak üzere dört gruba ayrılırlar.

2.2.5 Tane Kavramı ve Tane Boyutunun Malzemeye Etkisi

Metallerin içyapıları, farklı kristal yönlenmeye sahip birçok taneden meydana gelir. Taneler, içerisinde atom dizilişleri özdeş olan ve bu dizilişin kesilmesiyle sınırlanan içyapıdaki bölgelerdir. Metaller sıvı halden katı hale geçerken çok sayıda kristal tanesi oluşur ve katılaşma sırasında bu kristal taneleri kristal örgü boyunca büyür. Katılaşma tamamlandığında tanelerin birleştiği yerlerde atom boyutları mertebelerindeki kalınlıklarda düzensiz yerleşmeler oluşur. Dizilişin kesildiği bu sınırlara tane sınırları denir. Her tane içinde kafes yapısı aynıdır, fakat diğer tanelere göre kafes yönelimleri farklıdır. Tane sınırları, bireysel taneleri birbirinden ayıran yüzeyler şeklindedir. Tane sınırının bazı bölgelerinde birbirlerine çok yakın olan atomlar bir basma bölgesi oluştururken, diğer bölgedeki atomlar çok uzak kalarak, bir çekme bölgesine neden olurlar. Bu yüzden tane sınırları, malzemelerde yüzey hataları olarak kabul edilir.

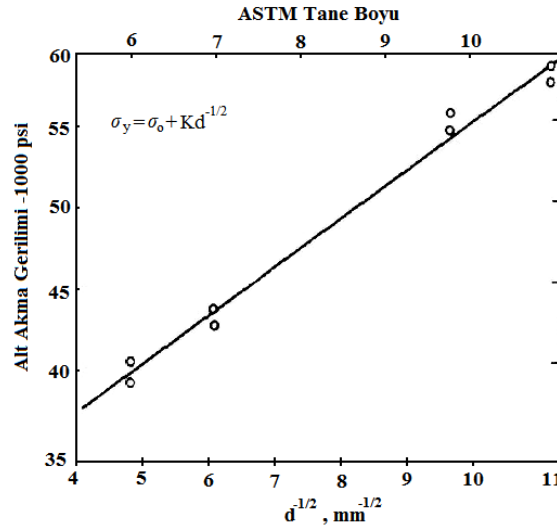
Metalin özellikleri, tane boyutu mukavemetlenmesi ile kontrol edilebilir. Malzeme içinde bulunan dislokasyonların ilerlemesi tane sınırlarında kesilir, dolayısıyla dislokasyonlar için tane sınırları engel oluştururlar, dislokasyonları durdururlar. Tane boyutu küçültülerek tane sayısı ve böylece de tane sınırları miktarı artırılabilir. Herhangi bir dislokasyon, küçük taneli bir ortamda bir tane sınırı ile karşılaşmadan önce, sadece kısa bir mesafe hareket eder ve böylece metalin dayanımını artırır. Hall Petch eşitliği (Denklem 20), tane boyutu ile metalin akma dayanımı arasındaki ilişkiyi ifade etmektedir (Klinmann *et al* 1980).

$$\sigma_y = \sigma_0 + Kd^{-1/2} \quad (2.20)$$

Burada σ_y , malzemenin kalıcı şekil değiştirdiği akma dayanımı veya gerilmesi; d tanelerin ortalama çapı; σ_0 , iç sürtünme gerilmesi ve K tane sınırı direnci ile ilgili sabittir. Bu eşitliğe göre tanelerin ortalama büyüklüğü azaldıkça, tane boyutundan gelen akma dayanımı artacaktır.

Tane büyüklükleri birbirinden farklı olan iki çelik, kimyasal içerikleri aynı olsa dahi, mekanik özelliklerinde büyük farklılık gösterir. Aynı karbon oranına sahip ısıtılma işlem

türüne göre ince taneli düşük karbonlu çelikler, kaba taneli çeliklerden daha yüksek dayanıma sahiptirler. İri taneli yapının şekil değiştirmeden kopmaya eğilimi vardır. İnce taneli yapı kopmadan önce şekil değiştirir. Şekli değişen tanede soğuk sertleşme (pekleşme) olur ve ince taneli bir yapıda belirli ölçülerde kopmayı engelleyebilir. Şekil 2.13, tavllanmış yumuşak çeliğin akma dayanımının ASTM tane boyutu 6'da 40 psi'den ASTM tane boyutu 11'de 58 psi'ye nasıl yükseldiğini göstermektedir (Kara 2005).



Şekil 2.13 Ferrit tane boyutunun tavllanmış yumuşak çeliğin dayanımı üzerine etkisi (Kara 2005).

2.2.5.1 Tane Büyümesi

Yüksek sıcaklıklarda uygulanan tavlama işlemi sonucunda, yeniden kristalleşme işlemi ile iri taneli bir yapı meydana gelir. Piyasada satılan metallerin tane sınırları arasında bazı metalik veya metal olmayan yabancı atıklar bulunabilir. Yüksek sıcaklıklardaki ısıtma işlemlerde bu yabancı kalıntılar çözünerek esas metalin kristal kafes yapısı içerisine girer. Bu şekilde sınır tabakaları ortadan kalktığından aynı özellikteki taneler yan yana gelir ve küçük taneler zamanla büyük tanelere dahil olur (Krautkramer 2000). Yani iri tane, malzemeyi çok yüksek sıcaklıkta ısıtma (aşırı ısıtma) veya yüksek sıcaklıkta uzun süre bekletme (aşırı bekletme) sonucu oluşur.

Yapı içerisinde yüksek sıcaklıklarda bile çözünmeyen maddeler (yabancı kristaller) tane sınırlarına yerleşmişse tane büyümesi önlenir. Yüksek sıcaklıklarda kullanılan ısıya dayanıklı malzemeler ve kaynak konstrüksiyonlarında kullanılan ince taneli çelikler bu tip bir yapıya sahip olmalıdırlar. Tane büyümesini azaltıcı etki yapan alaşım elementlerinin en önemlileri V, Al, Mo, Ti ve Nb' dur (Krautkramer 2000).

Tane büyümesinin sınırlandırılmasında en önemli element Vanadyum'dur. Vanadyumun çelik içinde çok düşük oranlarda (%0,1) kullanımı bile sertleştirme işlemi sırasında tane büyümesini durdurmak için yeterlidir. Bunun nedeni Vanadyumun sertleştirme sıcaklıklarında homojen dağılmış karbürler ve nitrürler şeklinde bulunmasıdır. Bu tür karbürleri veya nitrürleri katı eriyik içine alabilmek için yüksek sıcaklığa çıkarmak gerekir. Bu nedenle alışlagelmiş sertleşme sıcaklıklarında Vanadyum bileşikleri tane büyümesi için engel teşkil eder. Eğer sıcaklık normal değerden daha yüksek değere çıkartılırsa Vanadyum bileşikleri çözündürülebilir. Ancak bu durumda çeliğin tane boyutunun büyümesi söz konusu olabilir. Böyle bir durumda çeliğin darbe mukavemeti başta olmak üzere mekanik özelliklerinde düşme görülür.

Ti ve Nb da Vanadyuma benzer etkiler gösteren iki elementtir. Yüksek hız çeliklerinde ve diğer alaşımlı takım çeliklerinde W, Mo çift karbürleri de VC ve VN' ye benzer şekilde tane büyümesini engeller.

Yüzey sertleştirmede kullanılan ince taneli çeliklerin üretiminde istenilen sertleştirme etkisi ergimiş metale Al ilavesi ile sağlanır. Bunun için uygulanan pratik yöntem, önce oksijen miktarını belli bir seviyeye indirmek ve sonra çeliğe azot miktarına bağlı olarak Al ilave etmektir. Çelik soğuk iken Al-N partiküllerinin dağılımı sağlanır ve çeliğin normal sertleştirme sıcaklığında tane büyümesi bu partiküller tarafından engellenir (İnt.Kyn. 4).

2.2.6 Çeliklerde Uygulanan Isıl İşlemler

Isıl işlem, bir malzemenin özelliklerini veya içyapısını değiştirmek amacıyla, o malzemeye belirli bir sıcaklık-zaman programı dâhilinde uygulanan ısıtma ve soğutma

işlemleri sırasıdır (Yüksel 2001). Bir diğer tanıma göre ise; ısıtma işlemi, metal veya alaşımlarına istenilen özellikleri kazandırmak maksadı ile katı halde uygulanan bir veya daha çok sayıda kontrollü ısıtma ve soğutma işlemleridir.

Çeliklerin büyük çoğunluğu, içerdiği elementlere bağlı olarak ısıtma işlemlerine karşı duyarlıdır. Kimyasal bileşimin yanı sıra uygulanan ısıtma işlemleri sonucunda istenen sertlik, mekanik ve fiziksel özellik değerlerine ulaşılabilir. Özelliklerin değişimi, tamamıyla içyapısında görülen faz dönüşümleriyle ve ortalama tane boyutundaki değişim ile mümkündür. Dolayısıyla ısıtma işlemi ile özelliklerin değişimini incelemekten önce demirin saf halde iken allotropik yapısına incelemek gerekir.

2.2.6.1 Demirin Allotropisi

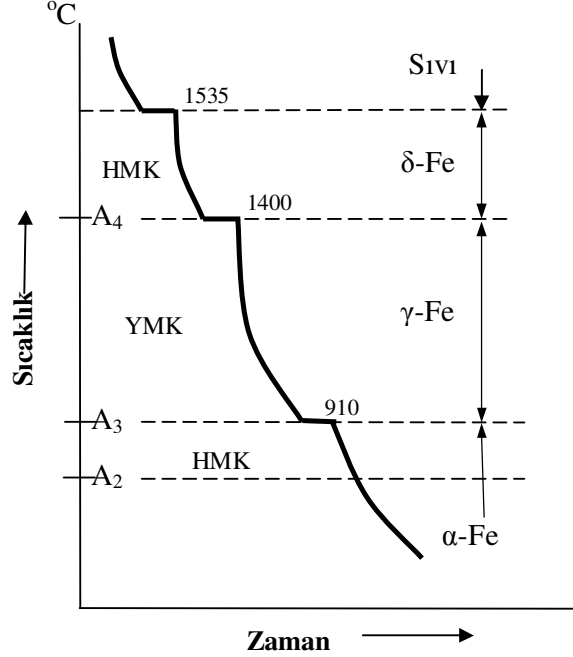
Bir metalin farklı sıcaklıklarda farklı kristal kafes yapısına sahip olma özelliğine allotropi denir. Demir, Kalay, Kobalt ve Mangan gibi metaller allotropik metallerdir. Allotropik metaller ısıtma işlemleriyle farklı özellikler kazandırılabilir.

Saf demirin soğutma diyagramında üç ayrı allotropik durum (polimorf) vardır (Şekil 2.14). Ergimiş demir sıvı halden 1535°C’de katılaşırken ilk olarak hacim merkezli kübik (HMK) kafes yapılı δ -demir oluşur. 1400°C’de bu yapı yüzey merkezli kübik (YMK) kafes yapılı γ -demire, 910 °C’de de hacim merkezli kübik (HMK) kafes yapılı α -demire dönüşür. HMK kristal kafese sahip demire ferrit, YMK kristal kafese sahip demire ise östenit denir.

Ferrit (α) : Karbonun α demiri içinde erimesi sonucu oluşan katı çözeltiye ferrit denir. Oda sıcaklığında en fazla %0,008 oranında karbon çözündürebildiği için saf demir olarak kabul edilir. Ancak 723°C sıcaklıkta %0,025’e kadar karbon çözündürebilir. Demir fazları içerisinde en yumuşak durumda olan ferritin çekme dayanımı 270 MPa, kopma uzaması %40 civarındadır.

Östenit (γ): Karbon atomunun YMK yapıdaki γ -demiri içerisinde çözünmesi sonucunda oluşan katı çözeltidir.

δ katı çözültisi: Karbonun δ -demiri içinde erimesi sonucu elde edilir. Bu eriyik içinde 1493°C 'de karbon en fazla % 0,08 oranında eriyebilir.



Şekil 2.14 Demirin polimorf dönüşüm grafiği (İnt.Kyn. 5).

Demir-karbon alaşımlarında ise demirin dönüşüm gösterdiği sıcaklıklar, karbon içeriğine bağlı olarak değişmektedir. Dolayısıyla çelik malzemeler ve dökme demirlerde ısıtılmanın malzemeye etkisi incelenirken karbon oranı en önemli parametredir. Karbon oranının bu malzemelerdeki dönüşümlere etkisini incelemek üzere Demir-Karbon denge diyagramları çizilmiştir.

2.2.6.2 Demir-Karbon (Fe-C) Denge Diyagramı

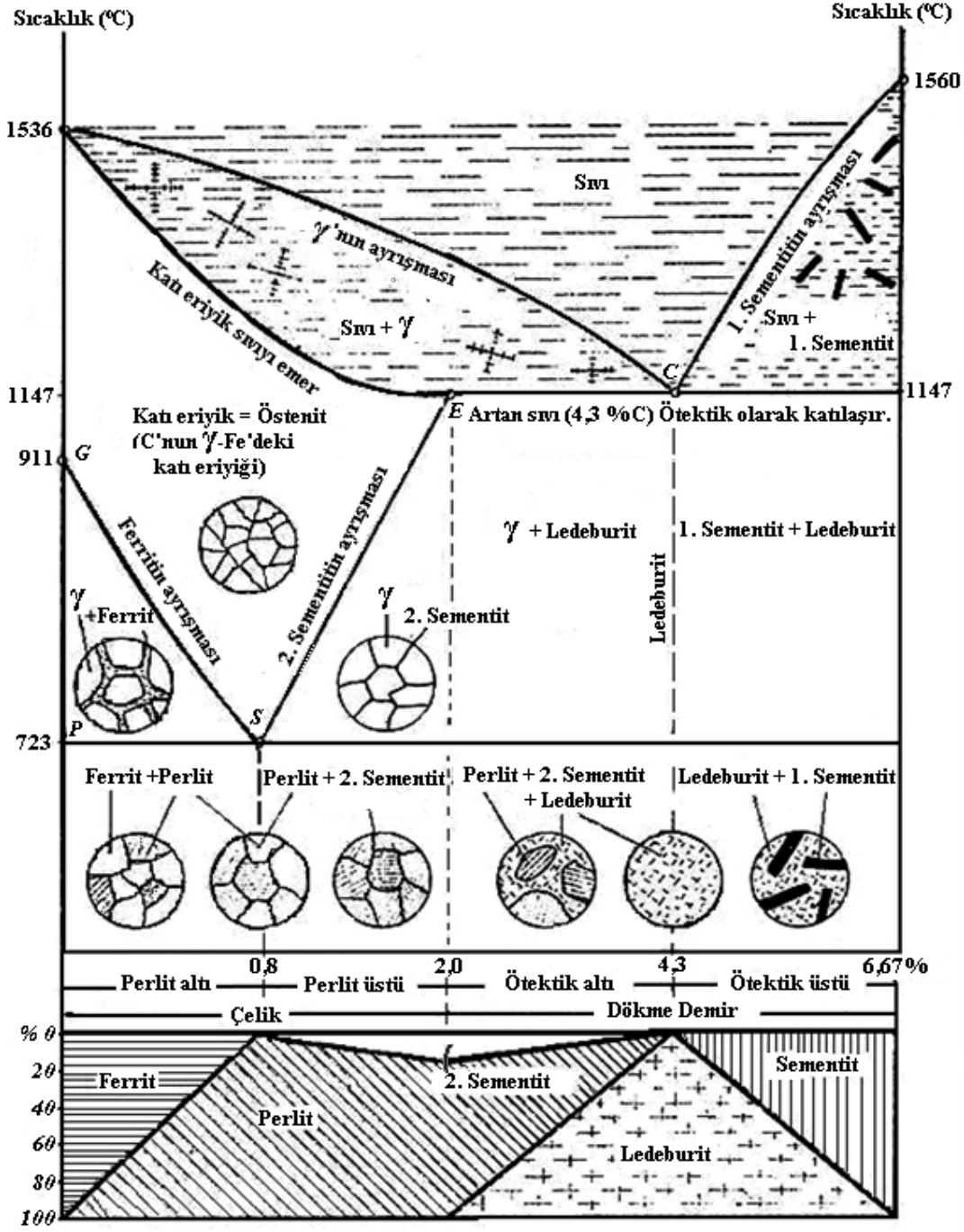
Şekil 2.15, Demir ile karbonun hangi sıcaklıklarda ne tür bir yapıda olduklarını gösteren diyagramdır. Çok yavaş soğutulmuş demir-karbon alaşımlarında çeşitli bileşim ve sıcaklıklarda meydana gelen fazlar bu diyagramda gösterilmiştir. Demirin polimorf dönüşümü grafiğinde yer alan fazlardan başka Demir-Karbon denge diyagramında rastlanan diğer fazlar Sementit, Perlit ve Ledeburit'tir.

Sementit (Fe_3C): Ağırlık olarak %6,67'si karbon olan demir-karbon bileşiğidir. Sementit sert, yüksek basma dayanımı ve düşük çekme dayanımı özelliğine sahip, 215°C sıcaklıkta mıknatıslanma özelliğini kaybeden bir yapıya sahiptir.

Perlit: Demir karbon alaşımının östenit bölgesinden yavaş soğutulması sonucunda meydana gelen %87 ferrit ve %13 sementit karışımına perlit denir. Perlit, %0,8 karbon ihtiva eder. Bu orandan daha az karbon ihtiva eden karışımlara “perlit altı” (ötektoid altı), daha çok ve %2,06'ya kadar karbon içerenlere de “perlit üstü” (ötektoid üstü) karışımlar denir. Perlit, oda sıcaklığına kadar soğutulduğunda lamelli yapısı bozulmadan kalır.

Ledeburit: Ötektoid sıcaklığın (723°C) üzerindeki sıcaklıklarda sementit ile östenitin yapmış olduğu ötektik karışıma “ledeburit”, ötektoid sıcaklığın altındaki sıcaklıklarda sementit ile perlitin yapmış olduğu ötektik karışıma ise “dönüşmüş ledeburit” denir.

Adı geçen bu fazlar daha açık bir şekilde içyapılarıyla beraber Şekil 2.15'te gösterilmiştir. Karbon oranı % 0-2 aralığında olan çelik malzemelerde, 723°C'nin altında olan bölgede 3 farklı yapı gözlenmektedir. % 0,8 karbon oranına sahip Perlitik çeliklerde içyapı tamamen perlit faza sahiptir. Ötektoid altı çeliklerde yapı ferrit + perlit, ötektoid üstü çeliklerde ise perlit + sementittir. Ötektoid sıcaklığının (723°C) üstüne çıkıldığında ötektoid altı çeliklerde içyapıda perlit fazı östenite (γ -demir) dönüşür ve yapı östenit + ferrit olur. Ötektoid üstü çeliklerde ise ötektoid sıcaklığının üstünde östenit + sementit yapısı gözlenir.



Şekil 2.15 Fe-C denge diyagramında görülen fazlar ve içyapılarının şematik olarak gösterimi (Weissbach, 1998).

Ac₃ sıcaklığının (GSE çizgisi) üstünde katı eriyik çelikler (%0,2 < C < %2) östenit yapıda bulunurlar.

Söz konusu fazlardan başka faz diyagramında görülmeyen kararsız bazı fazlar da vardır. Beynit fazı, daha geniş bir alt soğutmada, östenit'in dönüşümü ile elde edilen ferrit ve sementitin lamelli olmayan karışımıdır. Martenzit, hızlı soğutma sonucu elde edilen gevrek bir yapıdır. Oluşumunun ardından temperleme için tekrar ısıtıldığında, temperlenen martenzit, ferrit ve sementit karışımı oluşturmaya yöneltilmiştir (Akseland 1998).

Isıl işlemler çok çeşitli olup hem hammaddeye, hem de bitmiş ürünlere uygulanabilir. Genel olarak çelik hammaddelere uygulanan ısıl işlemler; ıslah, normalizasyon, yumuşatma tavlama, küreselleştirme tavlama, izotermik tavlama ve soğuk kesilebilirlik tavlama olarak değerlendirilebilir (İnt.Kyn. 6).

Çeliklere uygulanan ısıl işlemleri iki ana grup altında sıralanabilir.

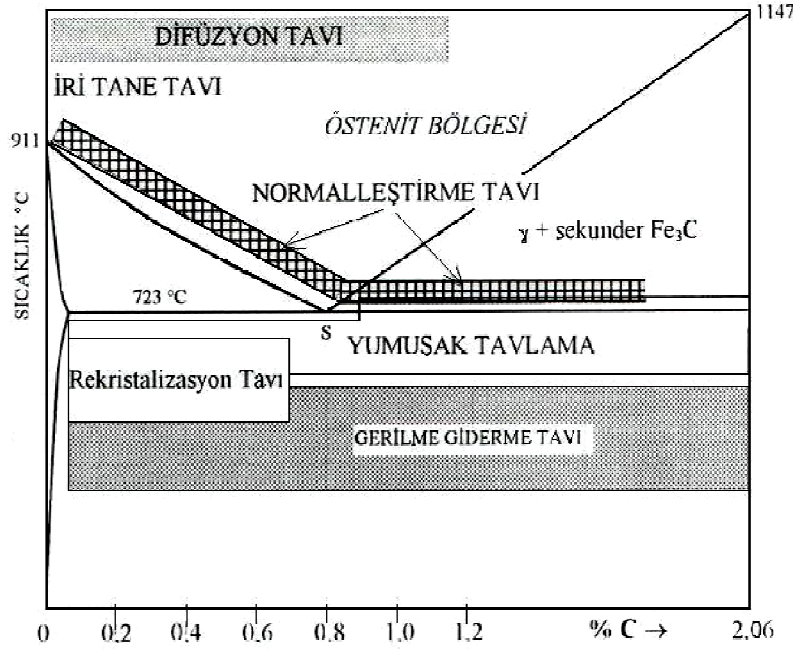
I. Çelik Tav İşlemleri

- Gerilim Giderme Tavlı
- Rekristalizasyon Tavlı
- Yumuşak Tavlama
- Normalleştirme Tavlı
- Tane İrileştirme Tavlama
- Difüzyon Tavlı

II. Sertleştirme İşlemleri

- Alaşım Sertleştirme
- Soğuk Sertleştirme
- Tane İnceltme
- Ayrışım Sertleştirme
- Dönüşüm Sertleştirme
- Yüzey ve Kabuk Sertleştirme

Çeliklere uygulanan ısıl işlemlerin demir-karbon denge diyagramı üzerindeki bölgeleri Şekil 2.16’da gösterilmiştir.



Şekil 2.16 Demir-Karbon denge diyagramında çelik ve tav sıcaklıkları bölgeleri (Yüksel 2001).

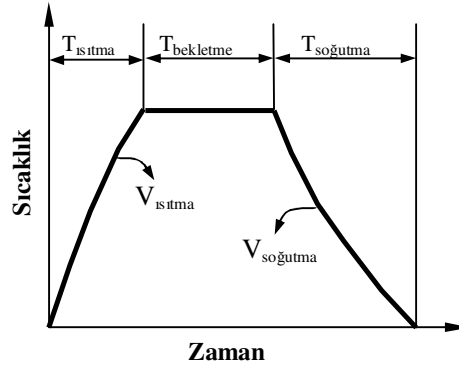
Isıl işlemlerle ilgili bu temel bilgiler ışığında çelik ısıl işlemlerinin iki temel türde olduğu görülmektedir.

1) Ötektoid sıcaklığı (A_1) altında yapılan ısıl işlemler: Bu ısıl işlemler gerilim giderme, küreselleştirme, temperleme, yeniden kristalleştirme işlemleridir.

2) Ötektoid sıcaklığının üstünde yapılan ısıl işlemler: Tavlama, normalleştirme, su verme ve homojenleştirme bu tür işlemlerdendir. Bu ısıl işlemlerde çelik ötektoid sıcaklığının üstünde ısıtılarak tamamen veya kısmen östenit’e dönüştürüldükten sonra çeşitli hızlarda soğutularak az veya çok dengeden sapan faz ve yapılar elde edilir. Birinci tür ısıl işlemlerde önemli olan soğutma hızıdır (Ulu 2004).

2.2.6.3 Isıl İşlemlerin Genel Grafiği

Isıl işlem, metal malzemelerde katı halde sıcaklık değişimleri ile bir ya da birbirine bağlı birkaç işlemle, amaca uygun özellik değişimleridir. Isıl işlemde, parçaların belirli bir sıcaklığa ısıtılması "ısıtma", bu sıcaklıkta uygun süre tutulması "bekleme" ve belirli bir programa uygun olarak sıcaklığın oda sıcaklığına düşürülmesi "soğutma" ile üç kademede özellik değişimleri sağlanır. Bu süreç Şekil 2.17'de belirtilmiştir (Said 2003).



Şekil 2.17 Isıl işlemlerin genel grafiği (Said 2003).

Çeliklerin ısıtım işlemlerinin belirlenmesinde önemli olan temel parametreleri şu şekilde sıralamak mümkündür (Ulu 2004).

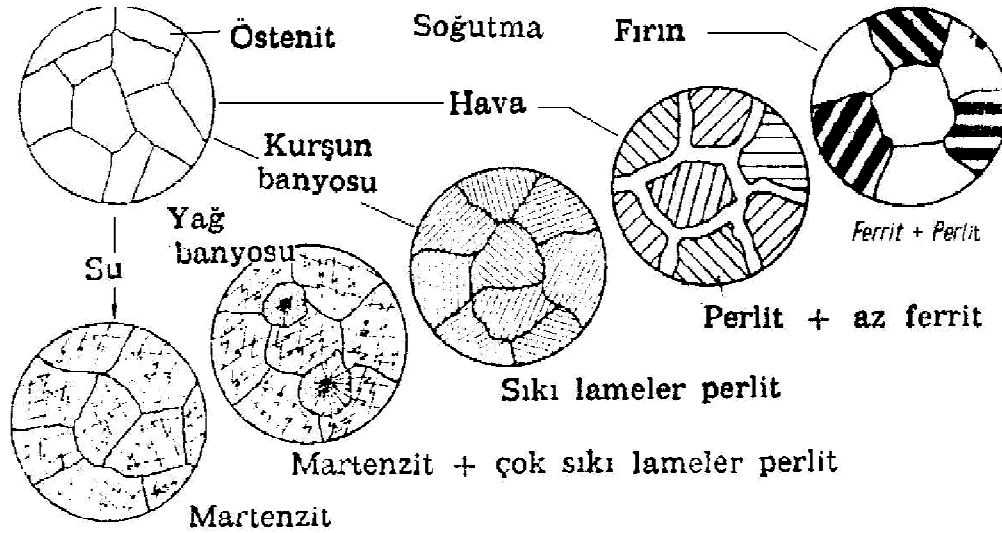
- Çelikteki karbon oranı (%C)
- Diğer alaşım elementlerinin yüzdesi
- Isıl işlemsiz mekanik özellikler
- Isıl işlem sonrası elde edilmesi tasarlanan mekanik özellikler
- Çeliğin kullanım ortamı
- Kullanım alanındaki maruz kalacağı zorlamalar (Yükün periyodu, burma, çarpma v.s. gibi).

Çelikler için temelde ısıtım işleme östenitleştirme ile başlanır. Östenitleştirme işlemi için çelik, alt kritik sıcaklık sınırı olan A_1 sıcaklığının üzerinde bir sıcaklığa ısıtılır. Çeliğin

belirlenen sıcaklığa kadar ısıtılmasında seçilen ısıtma hızı, iç gerilim bulunan malzeme durumu ve çelik malzemenin kesitine bağlı olarak farklılık göstermektedir (Ulu 2004).

Çeliklere uygulanan tüm temel ısıl işlemler, östenit fazının dönüşümü ile ilgilidir. Dönüşüm işlemleri sonucu oluşan içyapı türü ve bileşimi çeliğin mekanik ve fiziksel özelliklerini etkiler.

Isıl işleme tabi tutulmuş olan bir malzemenin çeşitli soğutma hızları ve ortamlarına göre iç yapısındaki değişimleri Şekil 2.18’de gösterilmiştir.



Şekil 2.18 Östenitin soğuma hızına bağlı olarak yaptığı dönüşümler (Weissbach 1998).

2.2.6.4 Isıl İşlemin Malzeme Özellikleri Üzerine Etkisi

Yöntem ayırımı yapılmaksızın genel olarak, metal ve alaşımlarda ısıl işlemle özellikler değiştirilebilir (İnt.Kyn. 7). Herhangi bir yöntemle sertleştirilmiş yapı yumuşatılabilir. Malzemede talaşlı ve talaşsız işlenebilirlik artırılır. Malzemenin içyapısında, daha homojen ve ince yapıli taneler elde edilebilir.

Soğuk şekillendirme ile şekillendirme doğrultusunda uzamış kristaller, daha küçük ve küresel forma dönüştürülebilir. Malzeme yumuşatılarak tekrar soğuk şekillenebilirlik özelliği kazandırılır. Kritik şekil değiştirme derecesinin altında soğuk şekillendirilmiş malzemelerde, uzamış taneler küresel biçime kavuşturulabilir ve şekillendirme öncesi özellikler, toparlanma ile yeniden kazandırılabilir.

Talaşlı imalatı kolaylaştırmak amacıyla, tane kabalaşması sağlanabilir. Düşük karbonlu çeliklerde, östenitik alandan uygun soğutma yapılarak, ferrite nazaran perlit oranı artırılarak, yani perlitleştirme yaptırılarak talaşlı şekillenebilirlik iyileştirilebilir.

Katı halde dönüşüm meydana getirebilen alaşımlarda, yavaş soğumada meydana gelebilecek yapıların hızlı soğutma yapılarak engellenmesi ve tamamen farklı yeni yapıların oluşturulmasıyla (örneğin, çeliklerde martensitik ya da beyritik yapı teşekkülü), yüzeyde ya da tüm malzeme kesitinde önemli ölçüde sertlik artışı sağlanabilir.

2.2.7 Isıl İşlem Çeşitleri

2.2.7.1 Tavlama

Tavlama, malzemenin solidus eğrisi altındaki belirli bir sıcaklığa kadar ısıtılmasına, bu sıcaklıkta bekletilmesine ve sonradan da kontrollü olarak yavaş yavaş soğutulmasına denir. Tavlamanın amacına göre sıcaklıklar ve süreler tespit edilir. Ötektoid altı çeliklerde homojen östenit oluşturmak için çelik A_3 sıcaklığının yaklaşık 30 °C üzerine ısıtılarak tavllanır. Sonra çelik fırında soğutulur. Fırın ve çeliğin birlikte soğuması sağlanarak yavaş soğuma hızı oluşturulur. Ötektoid üstü çelikler ilk A_1 sıcaklığının yaklaşık 30 °C üzerine ısıtılarak tavllanır. Çelik tamamen östenit oluşturmak için A_{cm} 'nin üstüne ısıtılmaz. Aksi takdirde yavaş soğutma sonucu sementit, östenit tane sınırları üzerinde kesintisiz film şeklinde oluşarak kırılmalığa neden olur. A_1 'in hemen üstünde östenitleme, sementitin yuvarlaklaşmasını sağlar. Östenitlemeden sonra çelik, kesintisiz sementit ve kaba perlit oluşturmak için fırında soğutulur.

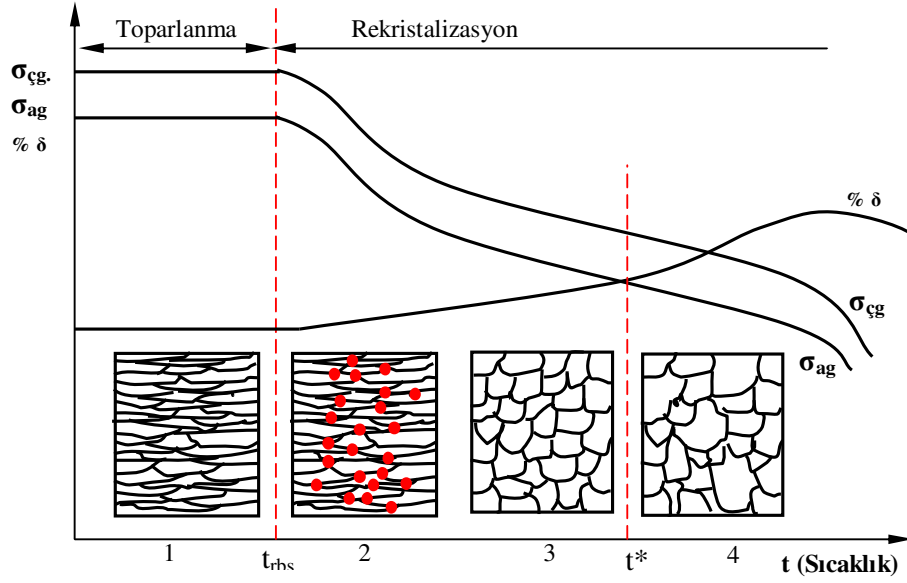
Tavlamada atmosfer fırınları, tuz banyoları veya kurşun potalar kullanılabilir. Takım çeliklerinin tavlama sırasında koruyucu atmosferli fırınlar kullanılır. Tavlama sıcaklığında bekletme süresinden sonra malzeme, fırın içerisinde saatte 8-20°C' lik soğuma hızıyla 550°C' ye veya daha alt sıcaklıklara soğutulur. 550°C' nin altında çeliklerin çoğu için soğuma hızı artık kritik olmadığından parçalar dışarı alınarak havada soğutulabilir (Çiğdemoğlu 1972).

2.2.7.2 Rekristalizasyon

Malzemenin soğuk şekil değiştirme sonucunda bozulan taneleri yenilemek ve şekil değişim etkilerini ortadan kaldırmak için, malzeme belirli bir sıcaklıkta tavllanır. Tavlama sıcaklığı şekil değişim derecesine ve tavlama süresine bağlıdır. Bu tavlama işlemine “rekristalizasyon” denir (İnt.Kyn. 8)

Soğuk şekil verme sonucu sertleşen malzemenin özelliklerini (Yüksek dayanım, düşük sertlik, tokluk v.s.) başlangıç durumuna getirmeyi amaçlar. Birçok uygulamada örneğin derin çekme işleminde ara tav olarak da yapılır. Böylece daha sonraki şekil verme kademeleri için gerekli süneklik malzemeye tekrar kazandırılır. Bu ısıl işlem, şekil değiştirme oranlarına bağlı olarak 550°C'nin üzerinde, genellikle 600-700°C de gerçekleştirilir (Ulu 2004).

Bu işlem sonucunda içyapı yeniden kristalleşerek eş eksenli taneler meydana gelir. Oluşan eş eksenli taneler daha önce deformasyon yönünde uzamış tanelerin yerini alır. Bu esnada dislokasyon yoğunluğunun azalmasıyla da malzeme başlangıçtaki sünekliğine kavuşur. Rekristalizasyon işleminin şematik olarak işlem basamakları Şekil 2.19'da grafik halinde verilmiştir. Bu grafikte t_{rbs} rekristalizasyon başlama sıcaklığı ve t^* tanelerin büyümeye başladığı sıcaklık değerleridir.

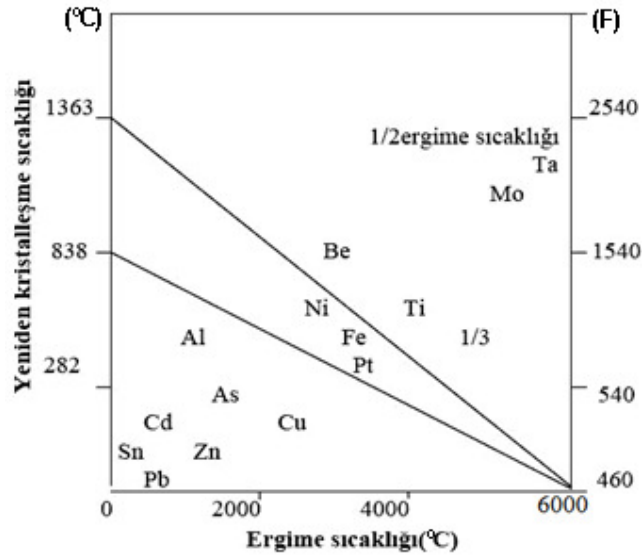


Şekil 2.19 Rekristalizasyon işleminin şematik gösterimi (Said 2003).

Bazı metaller için, rekristalizasyon sıcaklığını tayin etmek için kullanılan diyagram, Şekil 2.19’da verilmiştir. Rekristalizasyon sıcaklığının hesaplanması;

$$T_{rk} \approx \alpha \cdot T_{er} \quad (2.21)$$

denklemini kullanılarak hesaplanır. Burada; T_{rk} , Rekristalizasyon sıcaklığı; T_{er} , Metalin eğrime sıcaklığı; α , Saf metaller için (0,1-0,2), Alaşımlar için ise (0,4-0,6) olarak alınmıştır.



Şekil 2.20 Bazı metaller için yeniden kristalleşme ve ergime sıcaklıkları (İnt.Kyn. 8).

2.2.7.3 Tam Tavlama

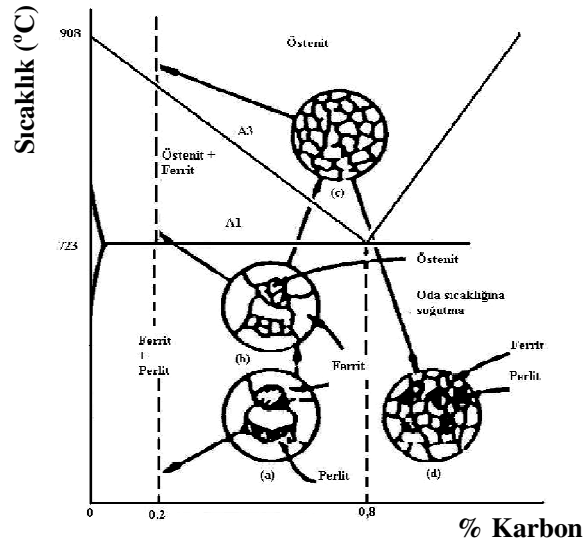
Bu tür tavlama, çeliğin uygun sıcaklığa ısıtılması ve faz dönüşümleri için yavaş soğutulması işlemlerini içerir. Soğutma işlemi oda sıcaklığına kadar devam eder (soğutma genellikle fırın içerisinde gerçekleşir). Tam tavlama ısıl işlemi için gerekli grafik Şekil 2.21’de gösterilmiştir.

Tam tavlama, taneleri küçültmek, sertliği düşürmek, işlenebilirliği arttırmak, elektrik ve manyetik özellikleri geliştirmek için yapılır. Bu tezin amaçları doğrultusunda tane boyutu ayarlaması yapmak için tam tavlama işlemi kullanılmıştır.

Ötektoid altı çelikler tam tavlama için A_3 (üst kritik) sıcaklığının 10–20 °C üzerinde ısıtılır. Faz dönüşümü tamamlandıktan sonra fırında yavaş soğutulur. Soğuma hızı, çelikler için 30–100 °C/saat, sade karbonlu çelikler için 200 °C/saat alınır (Ulu 2004).

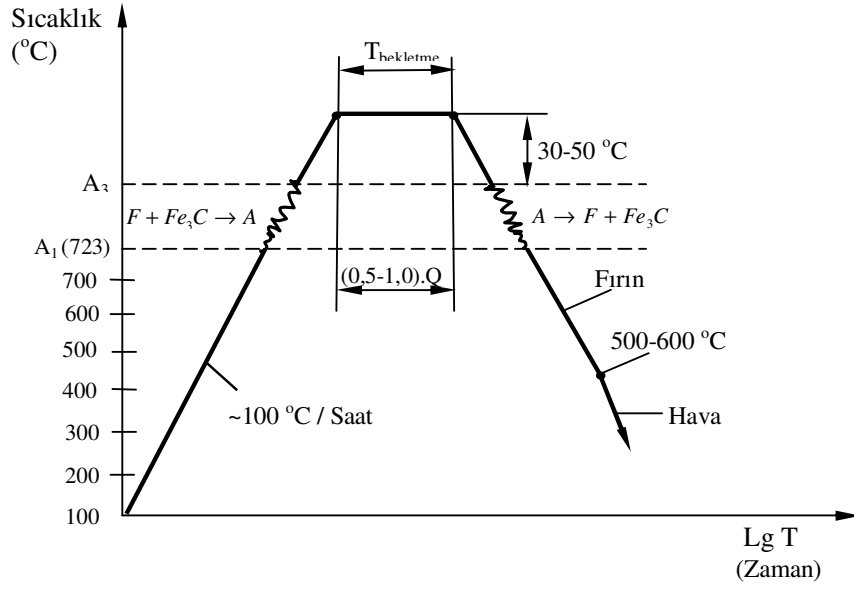
Çeliğin A_1 (alt-kritik) sıcaklığına kadar ısıtılmasıyla tanelerinde değişiklik görülmez. Bu durumdaki içyapı, Şekil 2.21’de (a) ile gösterilen içyapıdır. A_1 sıcaklığının hemen üzerinde perlit küçük taneli östenit’e dönüşür. Ferrit ise değişmez. Bu durum ise Şekil 2.21’de (b) içyapısı ile gösterilir. Çelik bu sıcaklıktan soğutulursa taneler yine küçülmez,

ısıtma işleminin A_3 (üst-kritik) sıcaklığına kadar devam edilmesiyle kaba ferrit taneleri küçük östenit tanelerine dönüşür. A_3 sıcaklığının $10-20^\circ\text{C}$ kadar üzerinde ise içyapı tamamen küçük taneli östenit olur. Bu durum ise Şekil 2.21’de (c) içyapısı ile gösterilir. Fırın içerisinde oda sıcaklığına kadar yavaş soğutmayla küçük östenit taneleri küçük ferrit ve perlit bölgecikleri oluşturur. Şekil 2.21’de (d) içyapısıyla oda sıcaklığına soğumuş çeliğin iç yapısı verilmiştir.



Şekil 2.21 % 0,2 C içeren çelikte tam tavlama sonucu oluşan içyapı değişiklikleri (Ulu 2004).

Ötektoid altı çelikler için tam tavlama işleminin genel grafiği Şekil 2.22’de gösterilmiştir.

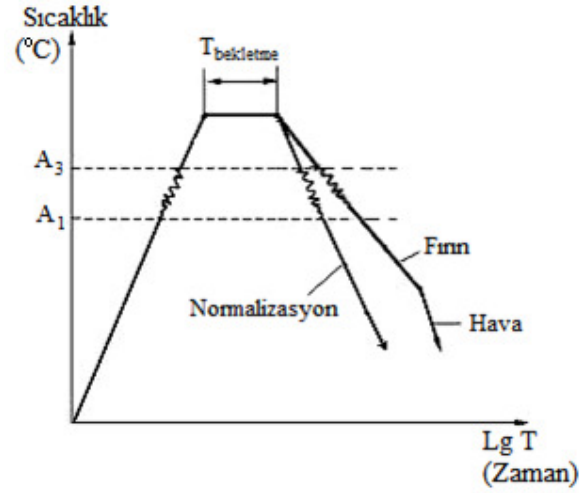


Şekil 2.22 Ötektoid altı çelikler (< %C 0,8) için tam tavlama işleminin genel grafiği (Said 2003).

Ötektoid üstü çeliklere tam tavlama ısısal işlemi genellikle uygulanmaz. Bu tip çeliklerde, yavaş soğutma neticesi, tane sınırlarında sementit ağı oluşur. Sementit sert ve kırılıgandır. Sementit'i kesici takımlar kesemeyip, kopartır. Dolayısıyla mekanik işlemede arzu edilmeyen bir yüzey kalitesi oluşur. Bunun için ötektoid üstü çeliklere tam tavlama yerine küreselleştirme işlemi yaygın olarak uygulanır.

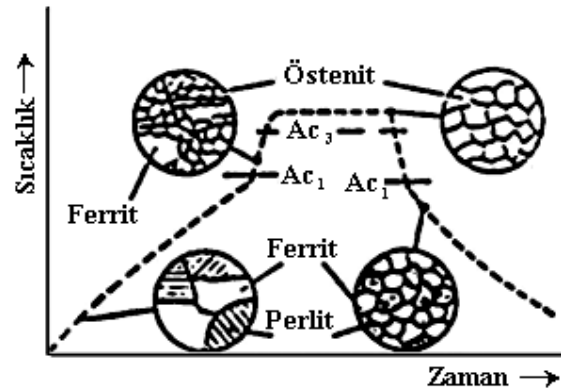
2.2.7.4 Normalleştirme Tavlaması (Normalizasyon)

Normalizasyon tavlaması; haddelenmiş, dövülmüş, çekilmiş, iri taneli ve eş yönlenmiş yapıların düzelmesi, malzemenin istenen eski özelliklerine (çekme dayanımı, süneklik v.b.) tekrar dönmesi işlemidir. Şekil 2.23'de normalizasyon işleminin sıcaklık değişim grafiği şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.23 Normalizasyon işleminin sıcaklık değişim grafiği (Said 2003).

Normalizasyon işlemi esnasında meydana gelen içyapı değişimleri şöyledir; ötektoid altı çelikler A_3 üzerinde östenitten meydana gelirler. Östenitik yapı aniden oluşmaz. A_1 üzerinde perlit kaybolur. Perlit içersindeki lameller $\alpha \rightarrow \gamma$ dönüşümüne uğrarlar, östenit karbon çözümlendirebildiği için, tabakalar arasında sementit lamellerini çabuk eriten çok küçük östenit taneleri teşekkül eder. Oluşan östenit kristalleri, tane büyümesine uğrar. Yapıdaki ferrit miktarı da zamanla azalır ve neticede A_3 sıcaklığının üzerinde yapı sadece ince taneli östenitten meydana gelir. Taneler zamanla irileşmeye başlar. Normalizasyonda bu sıcaklıktan A_1 sıcaklığının altına hızlıca soğutulur. İnce taneli östenit, soğutma sonucu tekrar ince taneli olan Ferrit + Perlit haline dönüşür (Ulu 2004). Bu durumun grafiği Şekil 2.24’de gösterilmiştir.



Şekil 2.24 Normalizasyon tavlama sıcaklığı ve zamana bağlı olarak içyapının dönüşmesi (Ulu 2004).

Ötektik üstü çelikler (%0,8-%2 C) östenit haline dönüşmezler. Acı üzerine çıkıldığında sadece perlit kısmı aynı şekilde ince taneli östenit'e dönüşür. Sementit ağı önceleri parçalanmaz, ancak A_{cm} sıcaklığı geçilince yavaş yavaş östenit içinde çözülmeye başlar. Yüksek tavlama sıcaklığı nedeni ile tane irileşmesinin meydana gelmesi önlenemez. Bu nedenle ötektoid üstü çelikler için tavlama sıcaklığı A_{c1} üzerindedir. Tane sınırındaki sementit küresel kristaller halinde toparlanır. Döküm parçaları çok yavaş soğuduğundan, Ferrit' in lamel şeklinde östenit' in içerisinde teşekkül ettiği iri taneli yapı oluşur. Bu ferrit lamelleri östenit kristallerinin yönüne göre çok özel bir durum alırlar. Widmannstaetten (kaba tane) yapısı denilen bu yapı normalizasyon sonucu tamamen kaybolur ve malzeme daha iyi mekanik özelliklere kavuşur (Ulu 2004).

2.2.7.5 Yumuşatma Tavlaması

Yumuşatma tavlaması genellikle 723°C civarında birkaç saat bekletme ile uygulanır. Sonra 600°C'ye kadar yavaş soğuma yapıldıktan sonra oda sıcaklığına kadar serbestçe soğutulur. Yumuşatma tavlamanın uygulamasının en temel amacı çeliğe düşük dayanım ve sertlik yani yüksek derecede uzama gösterebilecek hale getirmek amacıyla uygulanır.

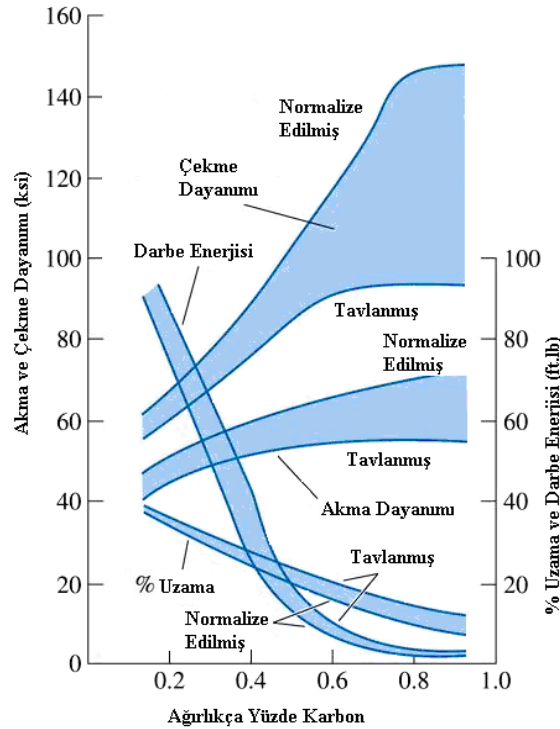
Çeliklerden beklenen her zaman sertlik ve dayanım değildir. Sert malzemelerin birçok avantajının yanında işlenme zorluğu gibi dezavantajı da vardır. Bu durum özellikle yüksek karbonlu çeliklerin kullanımında sorun teşkil edebilir. Bu nedenle yapıdaki sementit ayrıştırılmalıdır. Çünkü yüksek dayanım ve düşük uzamaya neden olmaktadır. Elde edilecek yumuşama, birçok işlem için en iyi başlangıç halidir. Özellikle yüksek karbonlu çelikler için talaş kaldırma böylece kolaylaştırılmış olur (Serfiçeli 2000).

2.2.7.6 Gerilim Giderme Tavlaması

Çeliklerde soğuk işlemin etkisini tamamen veya kısmen ortadan kaldırmak için kullanılan düşük sıcaklık ısıtma işlemidir. %0,25 oranından daha az karbona sahip çeliklerde, ferrit soğuk deformasyonla pekleşir. Pekleşme etkisini gidermek için kullanılan yeniden kristalleşme ısıtma işlemi, gerilim giderme tavlaması olarak adlandırılır. Sıcak dövülmüş ve dökülmüş malzemelere talaş kaldırma işlemi uygulanmadan önce,

dar tolerans aralıklı parçalara yüzey temizlemeden önce ve kaynak yapılmış parçalara uygulanır. Düzensiz soğuma neticesinde meydana gelen iç gerilimlerin giderilmesi gerekir. Plastik şekil değişme sonunda da iç gerilimler meydana gelebilir (Weissbach 1998). Bu gerilimleri gidermek için uygulanan ısıtıl işlem türüdür.

Gerilim giderme tavlaması ile malzeme içyapısı değişime uğramaz. Yüksek sıcaklıklarda çeliğin akma sınırı düşer. İç gerilimlerin miktarı fazla ise, malzeme kendini bırakır. Çekme gerilimi bulunan lifler uzar; basma gerilmesi altındaki lifler ise kısalmır. Bu esnada gerilimler giderek azalarak sonunda sadece artık bir gerilme kalır. Artık gerilimin büyüklüğü çeliğin tavlama sıcaklığındaki akma sınırı kadar olur (Weissbach 1998).



Şekil 2.25 Sade karbonlu çeliklerin özellikleri üzerine karbon miktarı ve ısıtıl işlem çeşitlerinin etkisi (İnt.Kyn. 9)

Sade karbonlu çeliklerde malzeme özellikleri üzerine karbon miktarının ve ısıtıl işlem çeşitlerinin etkisi Şekil 2.25’de gösterilmiştir. Şekil 2.25’de karbon miktarının artması ile çekme ve akma dayanımları artarken, yüzde uzama ve darbe enerjisi değerleri giderek azalmaktadır. Ayrıca çekme ve akma gerilimleri için normalizasyon tavlaması,

dayanımı arttırırken, yüzde uzama ve darbe enerjisi için bu durum tam tersi olarak etkili olmaktadır.

Çeliklerin çok yönlülüğünün ortaya çıkma sebebi, içyapılarının geniş oranda değişebilir olması ve aynı doğrultuda mekanik özelliklerinin de geniş ölçüde değişmesidir. Genel olarak çeliklerin yüksek dayanıma ve düşük kırılma tokluğuna sahip olması karbonun içyapıda çok ince olarak dağılmasındandır (İnt.Kyn. 10).

3. MATERYAL METOD

3.1 Kullanılan Çelikler ve Numunelerin Hazırlanması

Tez çalışmasında, çeliklerde ortalama tane boyutlarının ultrasonik sonuçlara etkisini incelemek üzere düşük karbonlu çelikler (%C<0,2) kullanılmıştır. Çelik seçiminde, numuneden alınan ultrasonik sonuçlara etki eden parametrenin ağırlıklı olarak ortalama tane boyutu olması amaçlanmıştır. Bu sebeple alaşımsız çelikler tercih edilmiştir. Alaşımlı çelikler, içerisinde bulunan alaşım elementlerinin malzemenin elastisite modülüne etkisi olması nedeniyle tercih edilmemiştir. Kullanılan numuneler; AISI 1020, Gemi Sacı, St37 ve 7-Mn-6 çelikleridir.

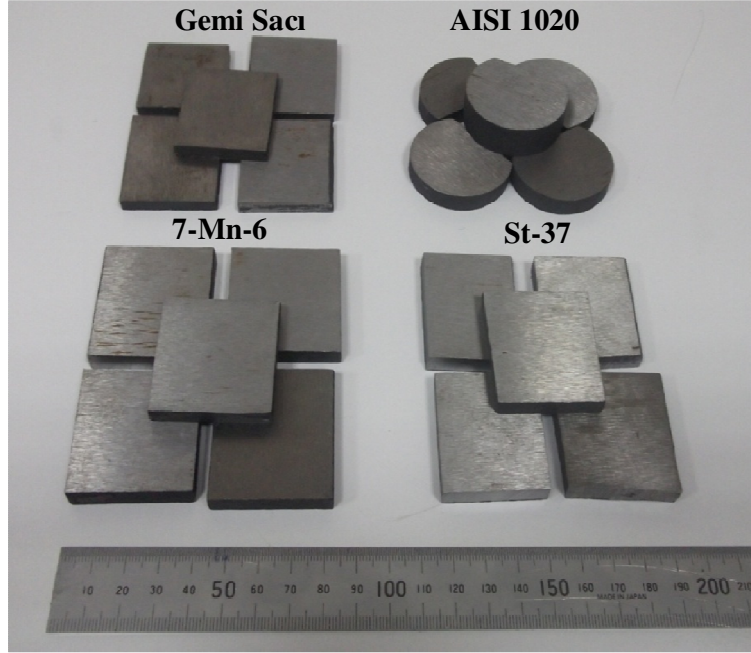
Bu çeliklerin kimyasal element analizi sonuçları Çizelge 3.1’de verilmiştir. Kimyasal element analizi, Kara Kuvvetleri Komutanlığı 8. Ana Bakım Merkezi’nde yapılmıştır.

Çizelge 3.1 Kullanılan çeliklerin spektral analiz sonuçları.

Çelik	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Co	Cu	Ti	W
AISI 1020	97,6	0,22	0,19	0,41	0,02	0,03	0,05	0,03	0,12	0,02	0,00	0,24	0,00	0,48
Gemi Sacı	98,7	0,14	0,22	0,45	0,03	0,01	0,02	0,02	0,01	0	0,01	0	0,00	0,07
St 37	98,7	0,14	0,16	0,51	0,02	0,01	0,01	0,03	0,04	0	0,02	0,01	0,00	0,05
7-Mn-6	97,2	0,11	0,29	1,79	0,02	0,02	0,05	0,07	0,04	0,02	0,03	0,05	0,01	0,02

AISI 1020 çeliği genellikle makine, civata ve somun yapımında, taşıt ve motor yapımında aks, aks kovana, krank mili ve dingil gibi çok fazla zorlanan parçalar, krank mili ve diğer tahrik aksamı, türbin parçaları yapımında kullanılırlar. Gemi sacı, gemi inşaa sanayinde kullanılırken, St37 çeliği inşaat ve sanayi sektöründe, kutu profil, çubuk yapımı ve sıcak haddelenmiş sanayi profilleri yapımında kullanılmaktadır.

Bu tez çalışmasında, AISI 1020 çeliği 40mm çapında silindir, diğer çelikler ise kesitleri 5,5 ve 8,25 mm plaka olarak üretici firmadan tedarik edilmiştir. Ardından Şekil 3.1’de gösterilen numuneler mekanik işlem ile ısıtılma deneyleri ve ultrasonik ölçümler için kesilmiştir. Numune sayıları, her bir çelik için yapılacak ısıtılma işlemlere göre 5 grupta da birer örneği olacak şekilde belirlenmiş olup toplam 25 adettir.



Şekil 3.1 Deneyisel çalışmada kullanılan düşük karbonlu çelik numuneleri.

3.2 Uygulanan Isıl İşlemler

Numunelere uygulanacak ısıtıl işlem rejimleri belirlenirken, ortalama tane boyutlarında belirgin farklılıklar ortaya çıkaracak ısıtıl işlem sıcaklık ve sürelerinin seçilmesine dikkat edilmiştir. Isıtıl işlemler iki aşamada gerçekleştirilmiştir.

İlk aşama olan homojenleştirme işlemi, çeliklerden kesilen tüm numunelere uygulanmıştır. Homojenleştirme ısıtıl işlemi, içyapıda homojen dağılmış ferrit ve perlit yapılarını oluşturmak ve numunelerde olası bant (hadde) izlerini gidermek amacıyla uygulanmıştır. Çeliklerin üretim esnasında oluşan bant izlerinden dolayı alınan sönüm ölçümlerinde yöne bağımlılık söz konusudur. İzotropik numuneler elde etmek için tüm numuneler önce homojenleştirme işlemine tabi tutulmuştur. Bu işlemde numuneler 1200°C sıcaklığa kadar 15°C/dk hız ile ısıtılarak bu sıcaklıkta 12 saat bekletilmiştir. Soğutma işlemi fırın içerisinde gerçekleştirilmiştir.

Homojenleştirme işleminden sonra numuneler, farklı tane boyutları elde etmek amacıyla gruplara ayrılarak, 5 farklı sıcaklıkta tam tavlama işlemi uygulanmıştır.

Homojenleştirme sonrasında numune gruplarına uygulanan ısıtım rejimleri, Çizelge 3.2’de verilmiştir. Tüm numune gruplarında bekleme sıcaklıkları, östenitleşme sıcaklığının üzerindedir. Bundan dolayı ısıtım işlem öncesi tüm içyapılardaki tane ve faz yapıları, östenit faza dönüşmüştür. Tane boyutları arasında farkın gözlenebilmesi amacıyla tavlama sıcaklıkları arttırıldığı gibi bu sıcaklıklarda bekletme süreleri de giderek arttırılmıştır. Isıtım işlemler için Şekil 3.2’de gösterilen ve Metalografi Laboratuvarında bulunan tüp fırın kullanılmıştır.

Çizelge 3.2 Homojenleştirme sonrasında numune gruplarına uygulanan ısıtım rejimleri.

Grup	Tavlama Sıcaklığı (°C)	Bekletme Süresi	Soğutma Ortamı	Isıtım İşlem Çeşidi
1. Grup	915	25 dk.	Fırında Soğutma	Tam Tavlama
2. Grup	1000	2 saat	Fırında Soğutma	Tam Tavlama
3. Grup	1050	4 saat	Fırında Soğutma	Tam Tavlama
4. Grup	1100	8 saat	Fırında Soğutma	Tam Tavlama
5. Grup	1200	12 saat	Fırında Soğutma	Tam Tavlama

Uygulanan bu ısıtım işlemlerden sonra, tane boyutu analizleri için numuneler metalografik işlemlere tabi tutulmuştur.



Şekil 3.2 Atmosfer destekli tüp fırın.

3.3 Metalografi

Isıl işlemler sonrası numunelere metalografik işlemler uygulanması için numunelerden kesit parçalar alınmıştır. Bu parçalar, 120' den 1200 gride kadar olan kademelerde SiC zımpara ile zımparalanmıştır. Bu işlemin sonrasında numuneler çuhada parlatılmıştır. Parlatma işleminde alümina süspansiyon kullanılmıştır. Zımparalama ve parlatma işlemleri devir hızı ayarlanabilen hareketli iki disk üzerinde gerçekleştirilmiş olup kullanılan sistem Şekil 3.3'te gösterilmektedir.



Şekil 3.3 Metalografik numune zımparalama ve parlatma cihazı.

Parlatılan numune yüzeyleri, % 2'lik Nital dağlayıcıda 1 dakika süreyle dağlanmıştır. Bu işlem sonrası içyapı görüntülerinin alınmasında Metal Eğitimi Bölümü Metalografi Laboratuvarında bulunan ve Şekil 3.4'te gösterilen Olympus marka Bx-60 Model alttan ve üstten aydınlatmalı 3,3 megapikselli kamera ve bilgisayar destekli optik mikroskop kullanılmıştır. Bu mikroskoptaki çekimler X50, X100, X200, X500, X1000 büyütmelerde yapılabilmektedir.

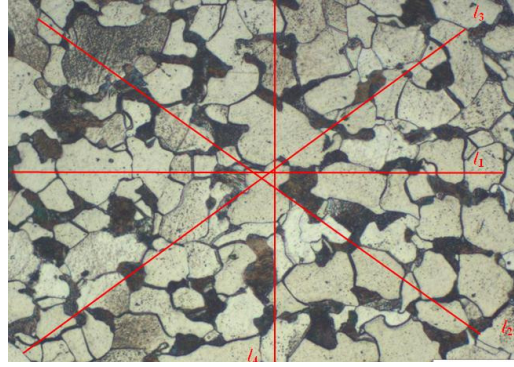


Şekil 3.4 Metalografik incelemelerin yapıldığı optik mikroskop

Bu cihaz kullanılarak tüm numunelerin içyapı görüntüleri alınmış ve ortalama tane boyutları bu görüntülerden hesaplanmıştır.

3.4 Ortalama Tane Boyutlarının Hesaplanması

Ortalama tane boyutunu sayısal olarak tayin etmek için Şekil 3.5'te gösterildiği gibi X100 büyütme ile çekilmiş olan içyapı görüntülerinden faydalanılmış ve İntercept (Kesme) Yöntemi kullanılarak Denklem 3.1 uyarınca ASTM E112'ye göre hesaplar yapılmıştır.



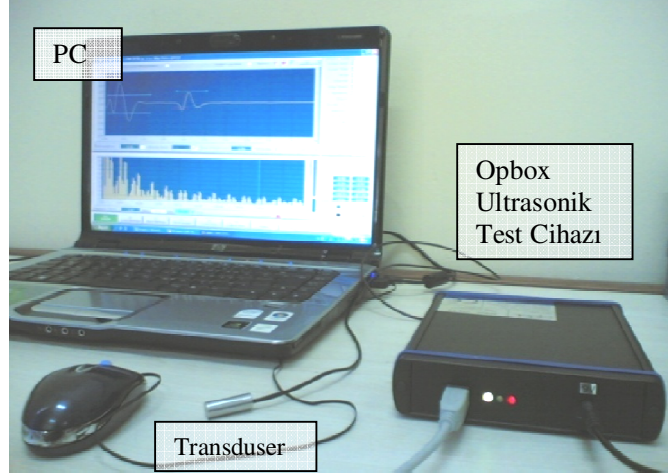
Şekil 3.5 AISI 1020 çeliğinin örnek içyapı görüntüsü ve taneleri kesen çizgiler.

$$d_{ort} = \frac{\ell_1 + \ell_2 + \ell_3 + \ell_4}{N_1 + N_2 + N_3 + N_4} \cdot \frac{1}{R} = \frac{\sum \ell_i}{\sum N_i} \cdot \frac{1}{R} \quad (3.1)$$

Denklemde ℓ_i çizgi boyu, N_i çizginin kestiği tane sayısı, R ise büyütme oranıdır.

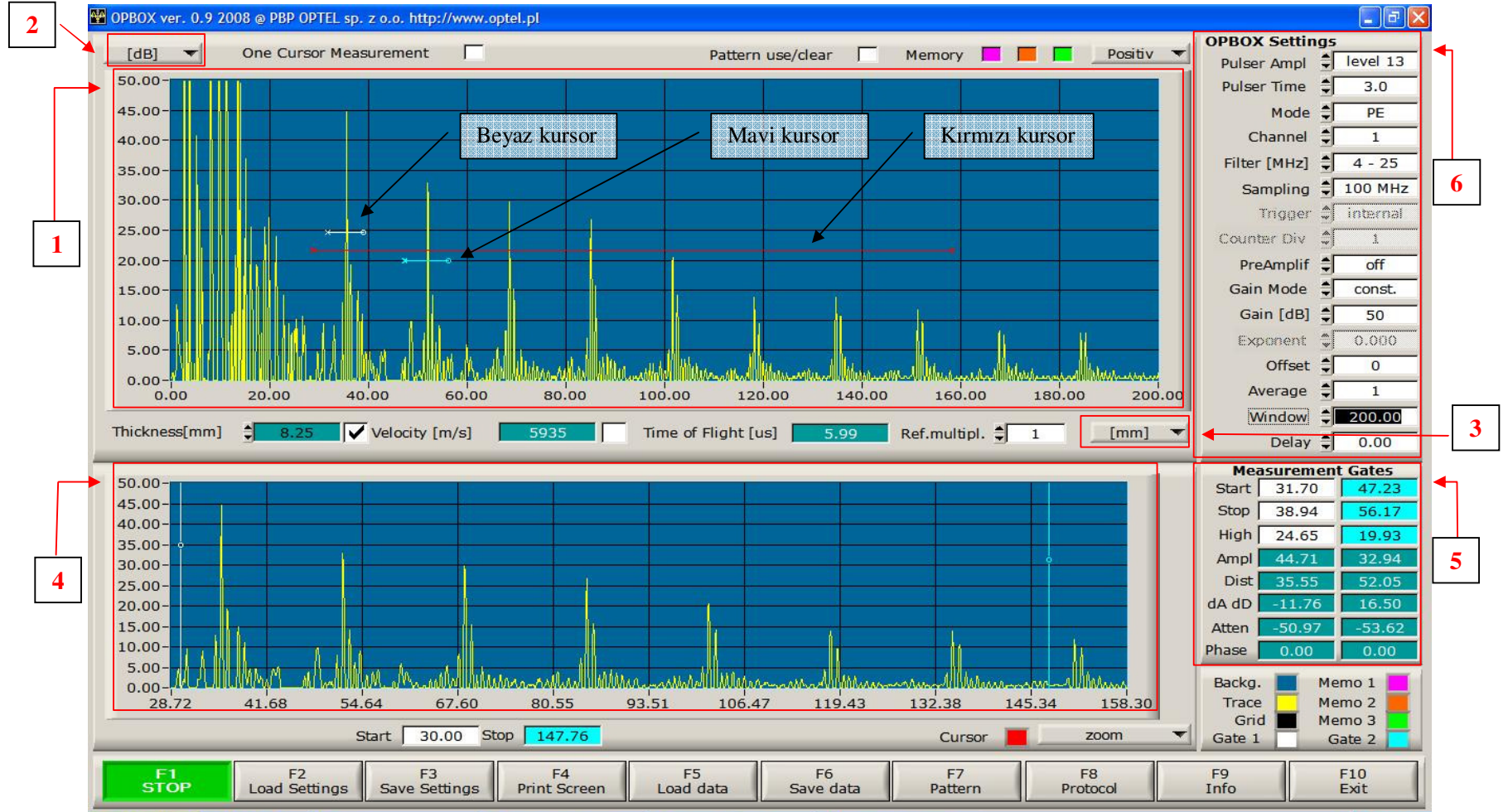
3.5 Deney Düzenegi ve Ultrasonik Ölçümler

Ultrasonik ölçümlerin alınması için Optel firmasına ait Opbox-Usb 2.0 isimli ultrasonik test cihazı kullanılmıştır. Cihaz, içerisinde pulser & receiver bulunduran, tek ve çift transduser ile kullanılabilen dolayısıyla puls-eko ve geçirim teknikleri ile ölçüm alınabilen bir ultrasonik test cihazıdır. Fizik Bölümü Tahribatsız Muayene Laboratuvarı'nda bulunan cihazın görüntüsü Şekil 3.6'da verilmektedir.



Şekil 3.6 Optel Ltd Şti. firmasına ait Opbox-Usb 2.0 ultrasonik test cihazı ve yazılımı.

Transduserden gelen sinyalleri bağıl büyüklük oranında büyültüp, grafik halinde bilgisayar ortamına aktarmaktadır (Şekil 3.7). Yazılım programı, üretici firma tarafından yazılmış olup ultrasonik malzeme muayenesi için dizayn edilmiştir. Numune yüzeyindeki farklı noktalarda ölçümler alınırken, arka yüzeyden yansıyan dalgalar cihaz tarafından algılanarak, sönüm yapan sinyaller halinde yazılım programının ekranında görüntülenmektedir. Bu şekilde A-Scan tarama görüntüleri elde edilmektedir.

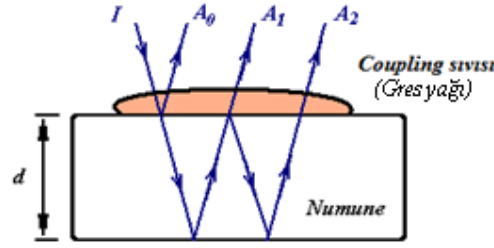


Şekil 3.7 Ölçümler sırasında kullanılan yazılımın ekran görüntüsü.

Şekil 3.7’de verilen yazılım ekranında 1 nolu alanda görülen grafik, algılanan sinyalleri online olarak vermektedir. Bu sinyallerin büyüklükleri (grafik’in y-ekseni) desibel [dB], Volt [V] ve yüzde oran [%] skalasında görüntülenebilmektedir. Bu tercih, şekilde 1 nolu grafik’in sol üstünde bulunan 2 nolu alanda yapılmaktadır. Yapılan ölçümlerde, sinyaller [dB] skalasında alınmıştır. 1 nolu grafik’in yatay eksenine ise zaman [μ s] ve uzunluk [mm] skalalarında görüntülenebilmektedir. Yatay skala değişimi, Şekil 3.7’de 3 nolu alan ile belirtilen buton yardımıyla yapılmaktadır. Ölçümlerimizde, zaman birimi [μ s], uzunluk [mm] birimine çevrilirken ultrases dalgalarının malzeme içinde sahip oldukları hız değeri ile zaman değerleri çarpılır. 1 nolu grafik’in altında “thickness” (kalınlık), “velocity” (hız) değerleri ve işaretlenecek kutucukları mevcuttur. İşaretli olan parametre kullanıcı tarafından girildiği takdirde program diğer parametreyi hesaplayıp göstermektedir ve 1 nolu grafik’in yatay ekseninin değerlerini oluşturmaktadır. Bu değerlerle birlikte dalgaların numune içinde uçuş zamanı “Time of Flight” [μ s] biriminde verilmektedir. Bu değer hesaplanırken, 1 nolu grafikte bulunan beyaz ve mavi yatay kursor çizgiler kullanılarak, dalgaların malzeme içinde yansıyıp geri dönen ardışık arka yüzey yankıları Şekil 3.7’de olduğu gibi belirlenmiş olmalıdır. Bu şekilde ultrases dalgaları numune içine gönderildikten bir süre sonra, pulsun konumu ve bu konumdaki sönüme uğramış bağıl büyüklüğü ölçülür.

Şekil 3.7’de 1 nolu alanda kırmızı kursor ile işaretlenen ve çizgi boyu kadar olan uzunluk, şekilde 4 nolu alanda gösterilen grafikte genişletilmiş olarak verilmektedir. 1 nolu alandaki beyaz ve mavi kursorları kesen piklerin parametreleri (büyüklüğü, konumu, bağıl sönüm değerleri) 5 nolu alanda “Measurement Gates” isimli bölgede verilmektedir. Bu bölgedeki “Ampl” ifadesi kursor çizgileri üzerinde bulunan en yüksek sinyal büyüklüğünü verir. “Dist” ifadesi ise en yüksek sinyal büyüklüğünün x-eksenindeki değerini verir.

Kumpas ile kalınlıkları ölçülen numunelere ait ölçümlerde, “thickness” değerleri belirtilerek, beyaz ve mavi kursorlar ile ardışık pikler seçildiğinde Measurement Gates bölümünde okunan sinyallerin “Dist” değerleri arasındaki farkın numune kalınlığının iki katı olduğu ortaya çıkar. Bu, kursorları kesen piklerin puls-eko tekniğindeki gibi arka yüzeyden gelen ardışık iki sinyal olduğunu gösterir.



Şekil 3.8 Ultrases dalgasının numune içinde izlediği yol.

Şekil 3.8’de puls-eko tekniğinde ultrases dalgasının numune içinde izlediği yol ve sistem tarafından algılanan arka yüzey dalgaları şematik olarak gösterilmiştir. Algılanan arka yüzey dalgalarının şiddetlerinin bağıl değerleri A_0 , A_1 , $A_2...$ ile ifade edilmiştir. Ultrasonik sönüm miktarlarının ölçümünde, arka yüzeyden gelen yansımalarının A-scan görüntülerindeki bu bağıl değerler baz alınmıştır. Şekil 3.7’de 5 nolu alanda görülen “Ampl” değerleri bu bağıl değerleri vermektedir. Bu değerler her numune için kaydedilerek ayrı ayrı tablolar oluşturulmuş ve Bölüm 4’te verilmiştir. Sigma-plot programı yardımıyla bağıl değerlerin grafikleri çizdirilmiştir. Program yardımıyla sinyallerin bağıl değerlerinden geçen en yakın üstel sönüm eğrileri fit edilmiş ve eğrilerin denklemleri grafiklerden okunarak denklemlerdeki üstel katsayılar, numunelerin optik olarak belirlenen ortalama tane boyutları ile karakterize edilmiştir. Deneysel Bulgular kısmında, tüm numuneler için bulunan (α) sönüm katsayıları bu yöntem ile hesaplanmıştır.

3.5.1 Kullanılan Transduserler

Ortam içinde ilerleyen dalgaların dalga boyları; dalganın ortam içindeki hızına ve frekansına bağlıdır (Denklem 2.1). Ultrases dalgalarının çelikler içindeki hızları birbirine çok yakın değerlere (yaklaşık 5950 m/s) sahip olduğundan dolayı tane ile etkileşime giren dalgaların dalga boyu, kullanılan transduserlerin frekans değişimiyle kontrol edilmiş ve verici-alıcı özelliğe sahip (Puls-eko tekniğine uygun) transduserler ile ölçümler alınmıştır.

Çeliklerin tane boyutlarının değişimi, ultrasonik ölçümlerde ultrases dalgalarının sönümüyle incelenirken dalga boyuna, dolayısıyla frekansa olan bağımlılığını

incelemek üzere 5 farklı frekansa sahip, boyuna dalga üreten ve Şekil 3.9’da gösterilen transduserlar kullanılmıştır. Bu transduserların frekansları 1, 5, 10, 15 ve 20 MHz’dir. Bu şekilde, farklı frekansta ultrases dalgalarına tane boyutlarının göstermiş olduğu etki de incelenmiştir. Dolayısıyla Rayleigh Saçılma Bölgesine giren frekans değeri deneysel olarak ortaya çıkarılmıştır.



Şekil 3.9 Ultrasonik boyuna dalga gönderen temaslı transduserler.

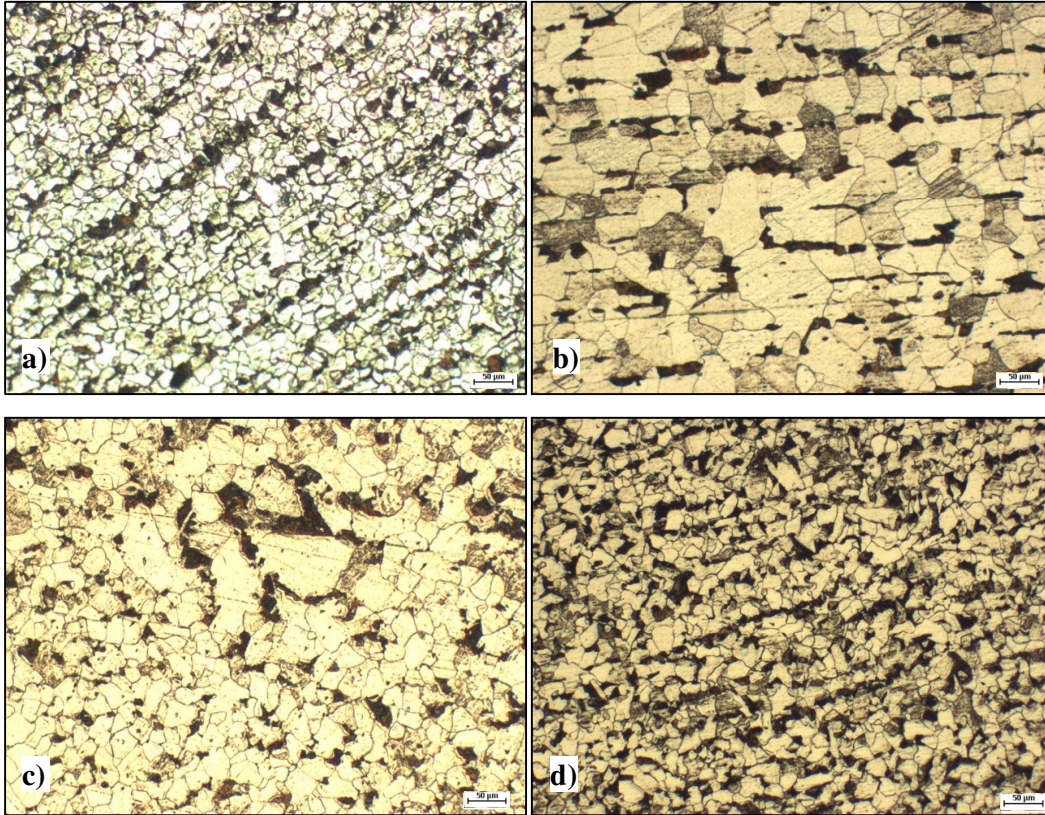
Transduserler ile numune temaslı olarak ölçüm alınmaktadır. Ölçümler sırasında numune ile transduser arasında kuplaj sıvısı olarak gress yağı kullanılmıştır (Şekil 3.8). Ultrases dalgaları gaz ortamda yayılırken çok çabuk sönüme uğrarlar. Kuplaj sıvısı, transduserden malzeme içine gönderilen dalgaların malzemeye geçmeden önce hava ile temasını önlemek için kullanılır. Bu şekilde gönderilen dalgaların başka sebeple önemli derecede sönüme uğraması engellenmiş olur. Daldırma tekniğinde kullanılan ve su tankında bulunan sıvı ile aynı görevi görmektedir.

Deney düzeneği kullanılarak, her bir çelik numunesinden alınan ultrasonik dalgaların arka yüzey sinyalleri bağıl büyüklükleri ve hesaplanan sönüm değerleri “Deneysel Bulgular” kısmında ayrıntılı olarak verilmiştir.

4. DENEYSEL BULGULAR

Bu bölümde, çelik numunelerin ısıtılma işlemi görmemiş durumlarındaki içyapı resimleri verilmiş, numunelere ait metalografik incelemeler yapılmıştır. Tanelerin içyapıdaki dağılımları incelenmiştir. Daha sonra tüm numunelere aynı fırında uygulanan homojenizasyon ısıtılma işlemi uygulanmış ve tekrar metalografik incelemelere tabi tutulmuştur. Çeliklere çeşitli sıcaklıklarda tam tavlama ısıtılma işlemleri uygulanarak elde edilen içyapı görüntüleri ve metalografik incelemeler ayrı ayrı başlıklar altında verilmiş ve yine aynı başlıklar altında numunelerden alınan ultrasonik sönüm ölçümleri ayrı ayrı incelenmiştir.

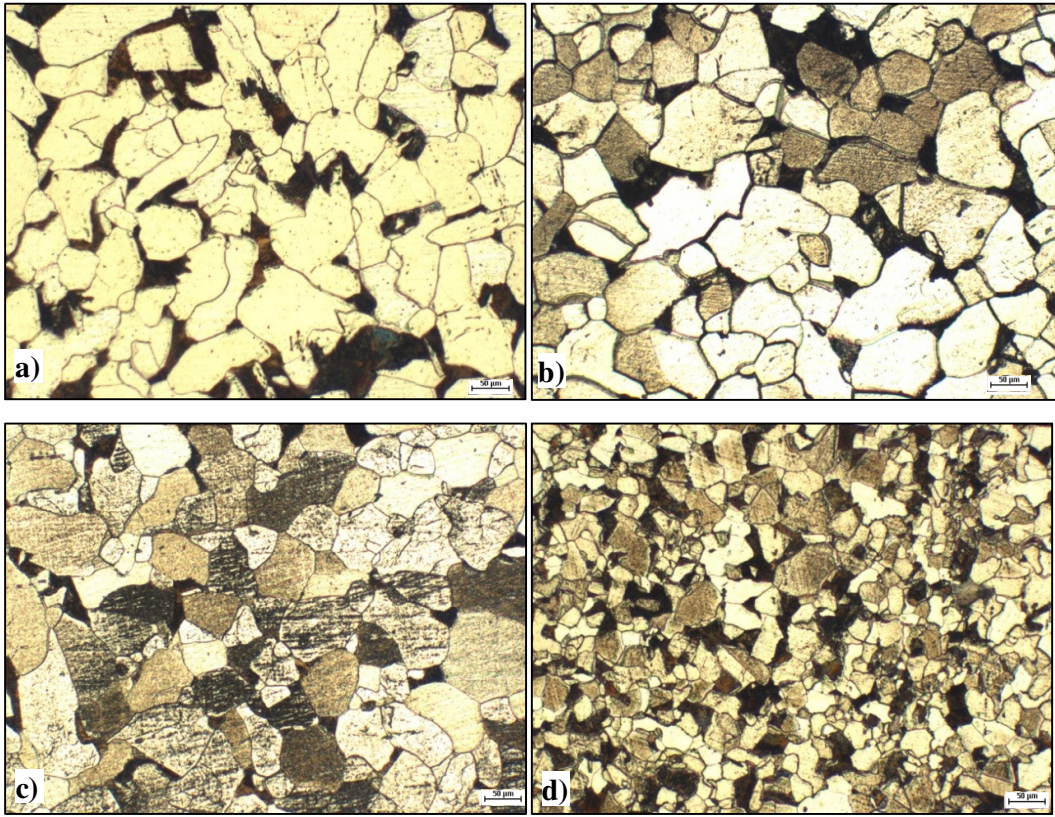
Şekil 4.1’de, deneysel çalışmalarda kullanılan çeliklerin ısıtılma işlem öncesi kesitlerinden alınmış örnek içyapı görüntüleri verilmektedir.



Şekil 4.1 Isıtılma işlem uygulanmamış çeliklerin kesitten alınmış içyapıları; a) AISI1020, b) Gemi Sacı, c) St37, d) 7-Mn-6.

Çeliklerin satın alındıkları haldeki incelenen içyapı görüntülerinde bant (hadde) izlerinin varlığına rastlanmıştır. Şekil 4.1’de sırasıyla AISI 1020, Gemi sacı ve 7-Mn-6 çeliklerinde yoğun miktarda bant izleri ve St37 çeliğinde ise tane boyutlarının homojen dağılmadığı bir içyapı görülmektedir. İncelenen test numunelerinden alınan ultrasonik ölçümler ile ortalama tane boyutlarını incelemek için tane boyutları dağılımının ultrases dalgalarının izlediği doğrultudan bağımsız ve homojen olması gerekir. Bu nedenle farklı sıcaklıklarda yapılan tavlama işlemlerinden önce çelik numunelerinin tümüne 1150°C’de 12 saat süreyle homojenleştirme ısı işlemi uygulanmıştır.

Homojenleştirme işleminden sonra metalografik işlemler sonucu numunelerden elde edilen içyapı resimleri Şekil 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4.2 Homojenleştirme ısı işlemi sonrası içyapı resimleri; a) AISI 1020, b) Gemi Sacı, c) St37, d) 7-Mn-6.

İçyapı resimlerinde 7-Mn-6 çeliğinde elde edilen tanelerin çok ince olduğu gözlenmiştir (Şekil 4.2(d)). Bunun nedeni olarak kimyasal içeriğinde, alaşım elementlerinden tane

boyutu inceltici etkisi olan Alüminyum, Molibden ve Titanyum elementlerinin çok az da olsa bulunması görülmektedir (Çizelge 3.1). Diğer üç malzemenin ise ortalama tane boyutları homojenleştirme sonucu oldukça irileşmiştir. Bununla beraber tüm çeliklerde homojen bir dağılım sağlanmıştır. Ayrıca bant izlerinin de giderildiği görülmüştür.

Çizelge 4.1’de çeliklerin homojenleştirme işlemi yapılmadan (satıldıkları durumdaki) ve yapıldıktan sonraki içyapı resimlerinden hesaplanan ortalama tane boyutları verilmiştir.

Çizelge 4.1 Homojenleştirme ısıtma işlemi öncesi (satıldığı durum) ve sonrası ortalama tane boyutları.

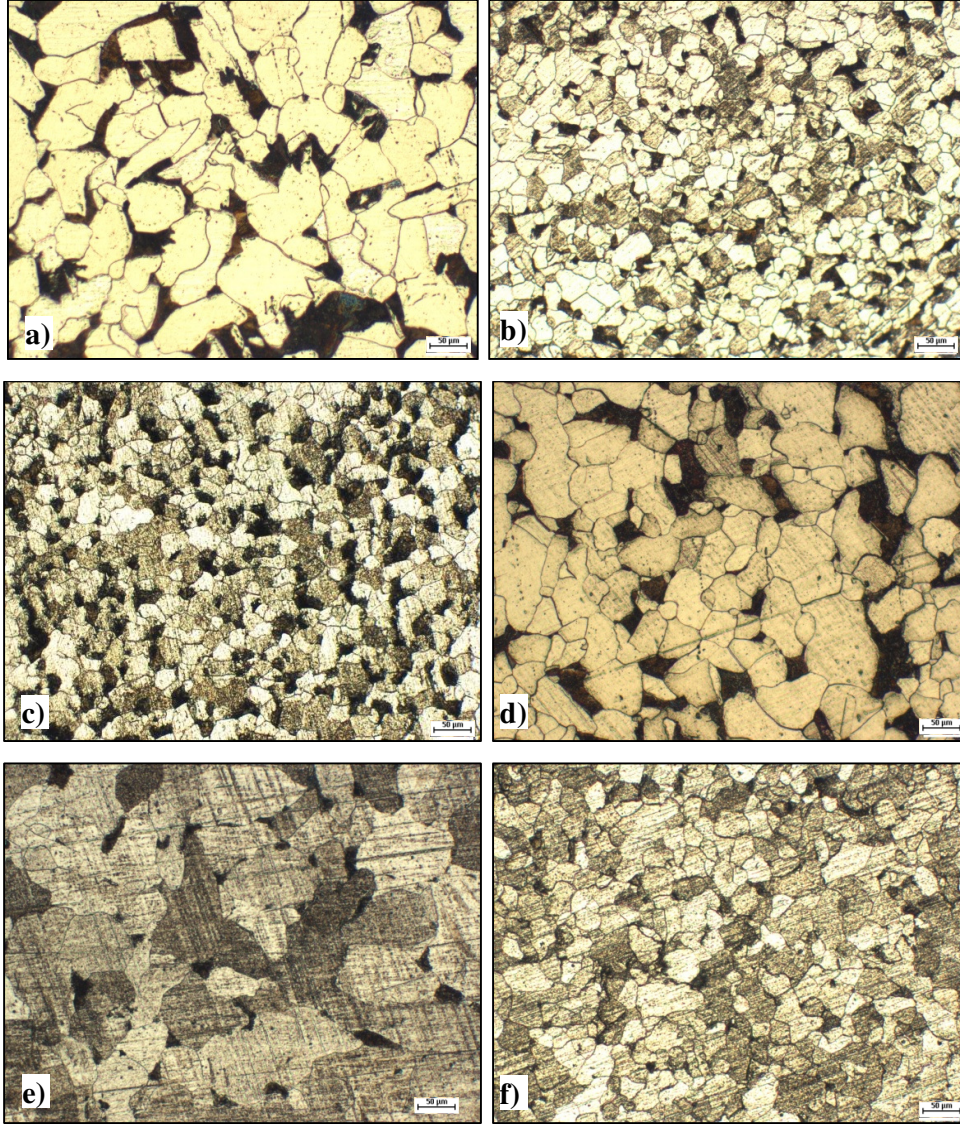
Çelik Türü	Ortalama Tane Boyutu (μm)		
	Homojenleştirme Öncesi	Homojenleştirme Sonrası	Aradaki Fark
AISI 1020	18,27	52,17	33,90
Gemi Sacı	11,25	54,08	42,77
St37	17,66	49,64	31,98
7-Mn-6	15,93	25,69	9,76

Çizelge 4.1’de verilen ortalama tane boyutları, her numune için 3 farklı doğrultuda (x, y, z) kesit yüzeyler alınarak hesaplanmış ve ortalamaları belirlenmiştir. Numuneler içinde ilerleyecek olan ultrases dalgaları yüzeysel olarak değil, hacimsel olarak ilerleyeceğinden dolayı her numunede bu üç doğrultuda çıkan ortalama tane boyutları ele alınmış ve birbirine yakın değerler olması tercih edilmesinden dolayı homojenleştirme işlemi uygulanmıştır.

Homojenleştirme sonrasında uygulanan tavlama işlemleri sonucu elde edilen içyapıların incelemesi, ortalama tane boyutları ve numunelerden alınan ultrasonik sönüm sonuçları farklı çelikler için ayrı ayrı başlıklar halinde verilmiştir.

4.1 AISI 1020 Çeliğinden Alınan Ölçümler

AISI 1020 çeliğine ait homojenleştirme sonrası farklı sıcaklıklarda tavllanmış numunelerin içyapı resimleri Şekil 4.3'te verilmiştir. İçyapı resimlerinde görülen tanelerin tavlama sıcaklığının artmasıyla büyüdüğü, fakat 1200 °C'de ısıtıl işlem görmüş numunede beklenmedik bir şekilde ince taneli olduğu gözlenmiştir.

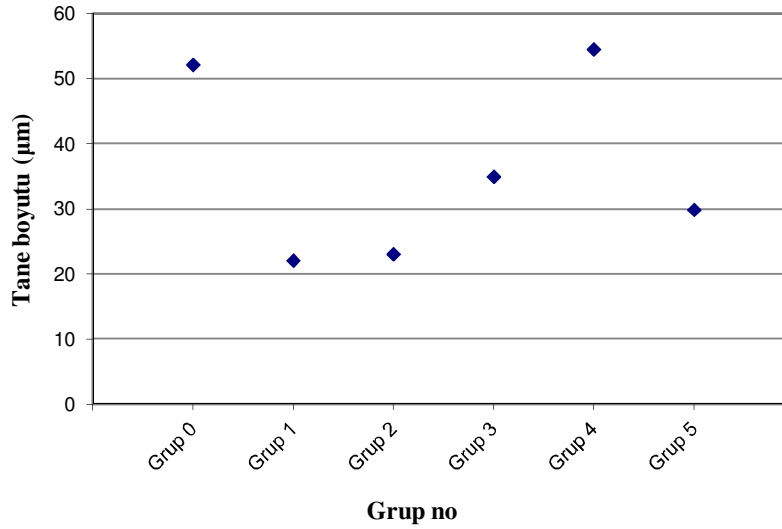


Şekil 4.3 AISI 1020 çeliği numunelerinin a) Homojenleştirme sonrası, b) 915°C, c) 1000°C, d) 1050°C, e) 1100°C, f) 1200°C sıcaklıklarında tam tavlama sonrası oluşan içyapılar.

Malzemenin ısıt işlemler öncesinde içyapısında hadde izlerine sahip olduğu görülmüştü. Şekil 4.3 incelendiğinde ise çelik malzemenin üretim esnasında oluşan hadde izlerinin homojenleştirme işlemi ile giderildiği görülmüştür. Şekil 4.3(e) ve (f)'de içyapı resimlerinde görülen aynı yönlü paralel çizgiler metalografik hatalardan meydana gelmiştir. Tane boyutları hesaplanması sırasında bu zımpara izleri dikkate alınmamıştır. AISI 1020 çeliğinin ısıt işlem görmüş numunelerinden alınan içyapı görüntülerinden kesme yöntemi ile elde edilen ortalama tane boyutları Çizelge 4.2'de verilmiştir. Ortalama tane boyutları, tavlama işlemlerinden sonra 22,11 μm 'dan 54,57 μm değerine kadar değiştiği görülmüştür. Ayrıca Çizelge 4.2'de tavlama sıcaklık değerleri ve numune kalınlıkları da verilmiştir. Numune kalınlıklarının ölçüm yapılırken kalibrasyon için kullanıldığı 3. Bölümde verilmişti. Ayrıca, birim uzunluk başına sönüm miktarlarının hesaplanması için bağıl sinyaller ($A_0, A_1, A_2, \dots$), numune kalınlığının çift katlarına göre grafikleri çizdirilerek Sigma-Plot programında Sönüm Katsayıları hesaplanmıştır. Ortalama tane boyutlarının ısıt işlem grup numaralarına göre değişimi, grafik halinde Şekil 4.4'te verilmiştir.

Çizelge 4.2 AISI 1020 çeliğine ait ısıt işlem bilgileri ve numune boyutları.

AISI 1020	Tavlama Sıcaklığı (°C)	Ortalama tane boyutu (μm)	Numune kalınlıkları (mm)
Başlangıç durumu	0	18,27	15
Homojenleştirme Sonrası (0. Grup)	1200	52,17	8,55
1. Grup	915	22,11	8,55
2. Grup	1000	23,1	14,95
3. Grup	1050	34,99	8,50
4. Grup	1100	54,57	8,50
5. Grup	1200	29,9	8,65



Şekil 4.4 AISI 1020 Çeliklerinde ısıtıl işlem görmüş numunelerde ortalama tane boyutlarının değişimi.

Grafikte ilk numune (52,17μm), homojenleştirme sonrası elde edilen numunedir. Homojenleştirme sıcaklığının ve süresinin fazla olması ortalama tane boyutunu irileştirmiştir. Homojenleştirme işleminden sonra tavlama sıcaklıkları düştüğünden dolayı tane boyutları incelmıştır. Daha sonraki numuneler ise sırayla ısıtıl işlem sıcaklığına göre artmaktadır.

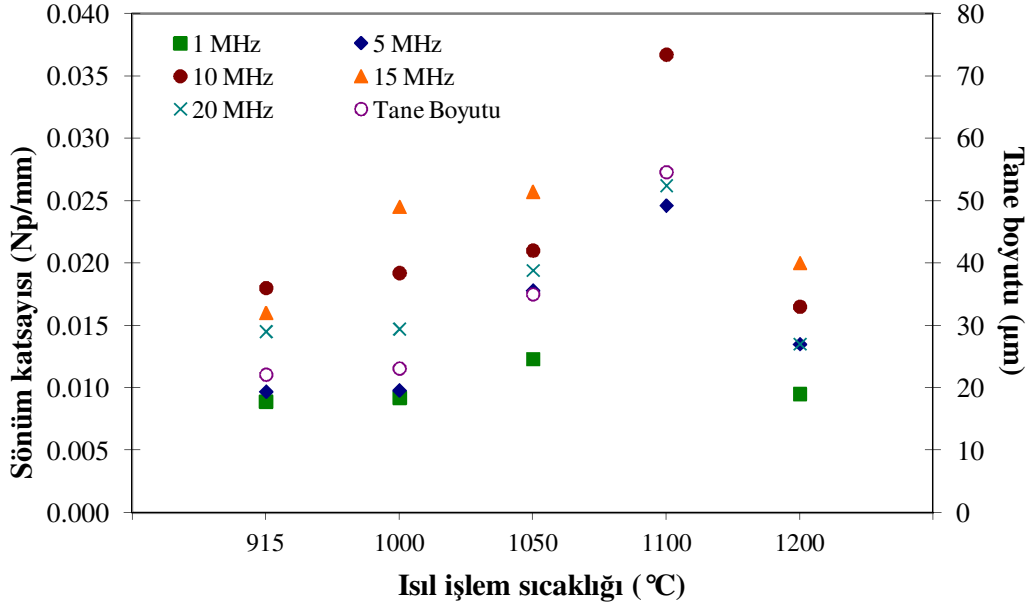
Tavlama işlemleri sonucu elde edilen farklı tane boyutlu numunelerden puls-eko metodu kullanarak arka yüzey yansıma sinyalleri cihazın programı ile bağl olarak ölçülmüş ve Sigma-plot programı ile bu sinyallerin sönüm eğrilerinin denklemlerinden sönüm katsayıları belirlenmiştir. Hesaplanan sönüm katsayıları Neper/mm biriminde Çizelge 4.3'te verilmiştir. Çizelge 4.3'te tavlama sıcaklıkları, Çizelge 4.2'de belirtilen grup numaraları ile verilmiştir.

Çizelge 4.3 AISI 1020 çelik numunelerinin ortalama tane boyutları ve numunelerden alınan farklı frekanslardaki ultrasonik sönüm değerleri.

Frekans	Grup No	Sönüm katsayısı (Np/mm)	Gain (dB)	Filter (MHz)	r ²
1 MHz	1	0,0089	25	0,5-6	0,98
	2	0,0092	25	0,5-6	0,99
	3	0,0123	25	0,5-6	0,98
	4	-	-	-	-
	5	0,0095	25	0,5-6	0,97
5 MHz	1	0,0097	45	4-25	0,92
	2	0,0098	45	4-25	0,98
	3	0,0178	45	4-25	0,97
	4	0,0246	45	4-25	0,98
	5	0,0135	45	4-25	0,98
10 MHz	1	0,018	45	4-25	ort
	2	0,0192	45	4-25	0,99
	3	0,021	45	4-25	ort
	4	0,0367	45	4-25	0,96
	5	0,0165	45	4-25	0,98
15 MHz	1	0,016	45	4-25	0,99
	2	0,0245	45	4-25	0,92
	3	0,0257	50	4-25	0,98
	4	-	-	-	-
	5	0,02	50	4-25	0,9
20 MHz	1	0,0145	55	4-25	0,96
	2	0,0147	55	4-25	0,96
	3	0,0194	55	4-25	0,95
	4	0,0262	55	4-25	0,995
	5	0,0135	55	4-25	0,93

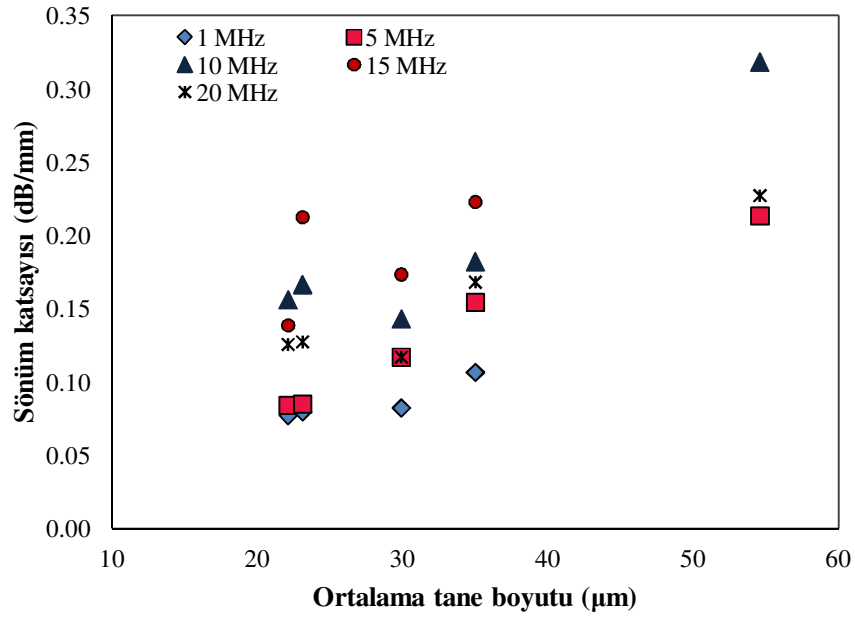
Çizelge 4.3'te farklı frekanslı transduserlerden alınan ultrasonik sonuçlar, kendi içinde AISI 1020 çeliği numuneleri için gruplandırılarak verilmiştir. Her frekansta transduserler ile farklı gruplardaki tüm numunelerden ölçüm alınmıştır. Gain ifadeleri, cihazdan alınan görüntülerde bağıl değerlerin büyüklük katsayılarıdır, birimi desibell'dir ve Şekil 3.7'de 6 nolu alandan okunur. Büyüklük katsayılarının, sönüm katsayılarına etkisine bakılmış ve sönümlerin gain ifadeleri ile değişmediği görülmüştür. A-scan görüntülerinde "Gain" ifadesi ile bağıl değerler büyüdükçe yansıyan arka yüzey yansımalarının sayıları artmakta ve sönüm davranışı daha netleşmektedir. "Filter" ifadesi ise ultrases dalgalarının numune içinde ilerlerken tane saçılmalarından kaynaklanan gürültüleri azaltmakta ve arka yüzey yansımalarının net görülmesini sağlamaktadır. Bu değerler, cihaz ile ölçüm sırasında yazılımdan ayarlanabilmektedir. Çizelge 4.3'te verilen r² ifadesi ise Sigma-Plot programında

karakterize edilen üstel eğrilerin deneysel ölçümlere uyumluluğunun ölçüsünü veren parametredir. Bu parametrelerin “1” değerine yakınlığı değerlerin sönüm katsayılarının verdiği eğriye çok yakın olduğunu vermektedir. 1 MHz ve 15 MHz frekanslarında AISI 1020 çeliğinin 4. grup numunesinden alınan A-scan görüntülerinde gürültünün fazla olmasından dolayı arka yüzey pikleri ayırt edilememiştir. Bu sebeple sönüm katsayılarını bu frekanslarda hesaplamak mümkün olmamıştır.



Şekil 4.5 AISI 1020 çeliği numunelerinden farklı frekanslarda alınan ultrasonik sönüm değerlerinin ısıtım sıcaklıklarına göre değişimi.

Isıl işlem sıcaklıklarına bağlı olarak; ultrasonik sönüm katsayılarının ve tane boyutlarının değişimleri farklı frekanslara göre Şekil 4.5’te grafik halinde verilmiştir. Grafiğin sol eksenini sönüm katsayısı, sağ eksenini ise optik olarak hesaplanan tane boyutlarını vermektedir. Grafikte, tane boyutu değişimleri ile alınan sönüm değerlerinin değişimlerinin birbirlerine orantılı olarak değiştiği gözlenmiştir. 1, 5, 10 ve 20 MHz frekanslı transduserlar ile alınan sonuçlarda bu değişimlerin orantılı olduğu gözlenmiştir.

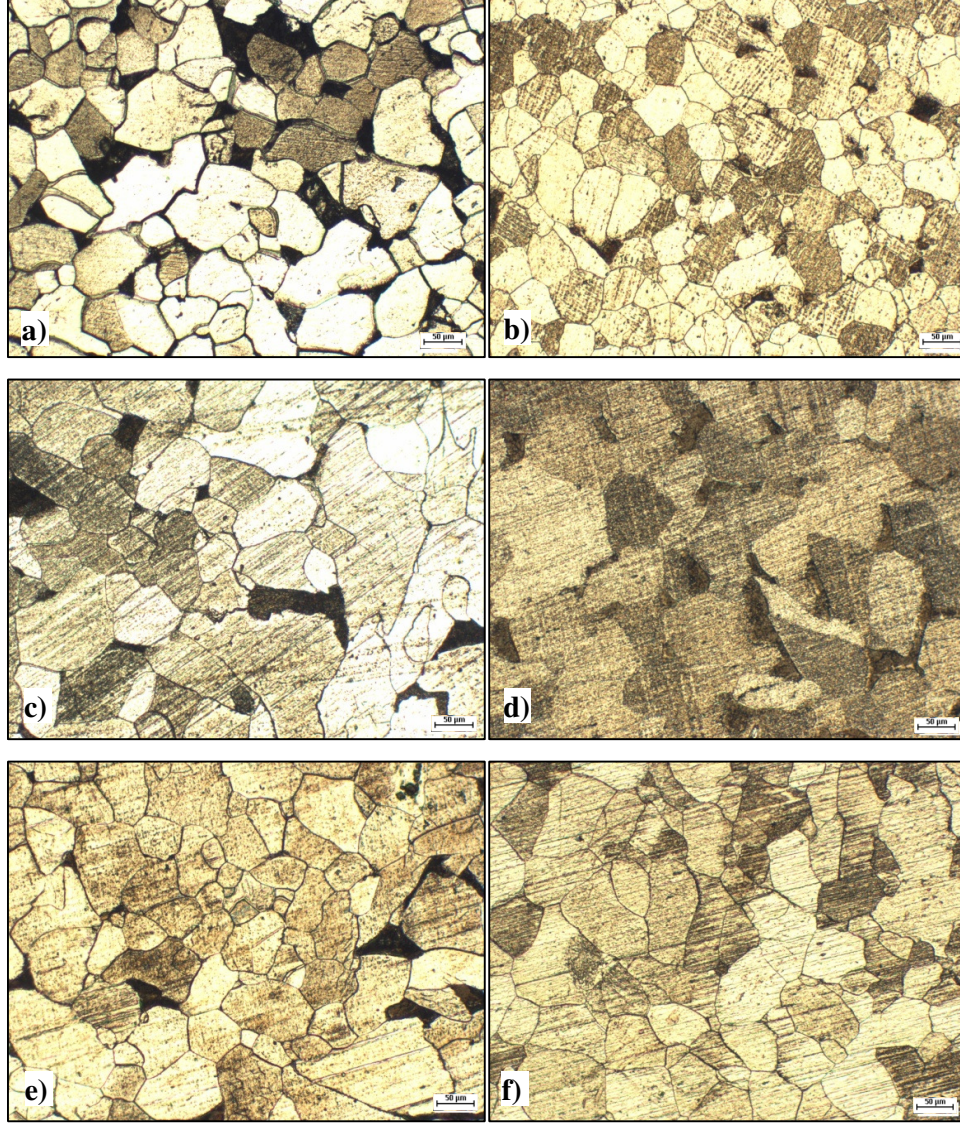


Şekil 4.6 Isıl işlem görmüş AISI 1020 çeliği numunelerinden elde edilen sönüm değerlerinin tane boyutlarına göre değişimi.

Şekil 4.6'da farklı frekanslara göre ortalama tane boyutunun sönümle olan ilişkisi incelenmiştir. Şekil 4.6'da sönümler dB/mm biriminde verilmiştir. Np/mm biriminin dB/mm birimine dönüşümünde 1 Neper = 8.686 desiBel eşitliği kullanılmıştır. Şekil 4.5'te görüldüğü gibi Şekil 4.6'da da 5 MHz'li transduser kullanarak alınan sönüm değerlerinin tane boyutu ile düzgün olarak değiştiği gözlenmektedir.

4.2 Gemi Sacından Alınan Ölçümler

Gemi sacına ait içyapı resimleri Şekil 4.7’de verilmiştir. İçyapı resimlerinde Gemi sacının tane boyutlarının ısıtıl işlem sıcaklıklarıyla orantılı olarak değişmediği gözlenmiştir.



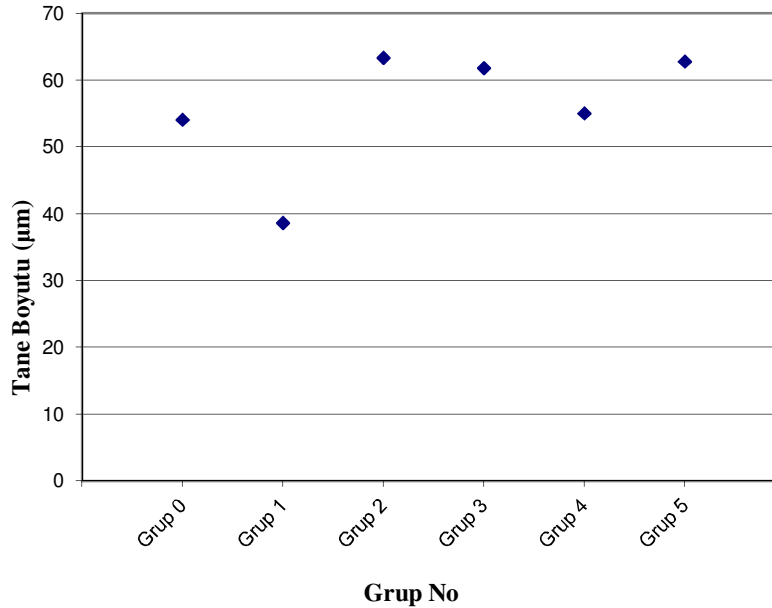
Şekil 4.7 Gemi Sacı numunelerinin a) Homojenleştirme sonrası, b) 915 °C, c) 1000 °C, d) 1050 °C, e) 1100 °C, f) 1200 °C sıcaklıklarında tam tavlama sonrası oluşan içyapılar.

Gemi sacının farklı ısıt işlem görmüş numunelerinden alınan içyapı görüntülerinden optik yöntem ile elde edilen ortalama tane boyutları Çizelge 4.4'te verilmiştir. Tane boyutlarının 38,64 μm 'dan 63,36 μm değerine kadar değiştiği gözlenmiştir.

Çizelge 4.4 Gemi Sacına ait ısıt işlem bilgileri ve numune boyutları.

Gemi Sacı	Tavlama Sıcaklığı (°C)	Ortalama tane boyutu (μm)	Numune kalınlıkları (mm)
Başlangıç durumu	0	11,25	5
0. Grup	1200	54,08	5,5
1. Grup	915	38,64	5,55
2. Grup	1000	63,36	5,6
3. Grup	1050	61,8	5,55
4. Grup	1100	55,04	5,6
5. Grup	1200	62,8	5,6

Ortalama tane boyutlarının ısıt işlem sıcaklıklarına göre değişimi grafik halinde Şekil 4.8'de verilmiştir. Isıt işlem sıcaklığı ile ortalama tane boyutunun düzgün olarak değişmediği grafikten de görülmektedir. Fakat çalışmada tane boyutlarının ısıt işlemlerle olan değişiminden ziyade ultrasonik sönüm katsayıları ile ilişkisi üzerinde durulmaktadır.



Şekil 4.8 Gemi Sacında ısıt işlem görmüş numunelerde ortalama tane boyutlarının değişimi.

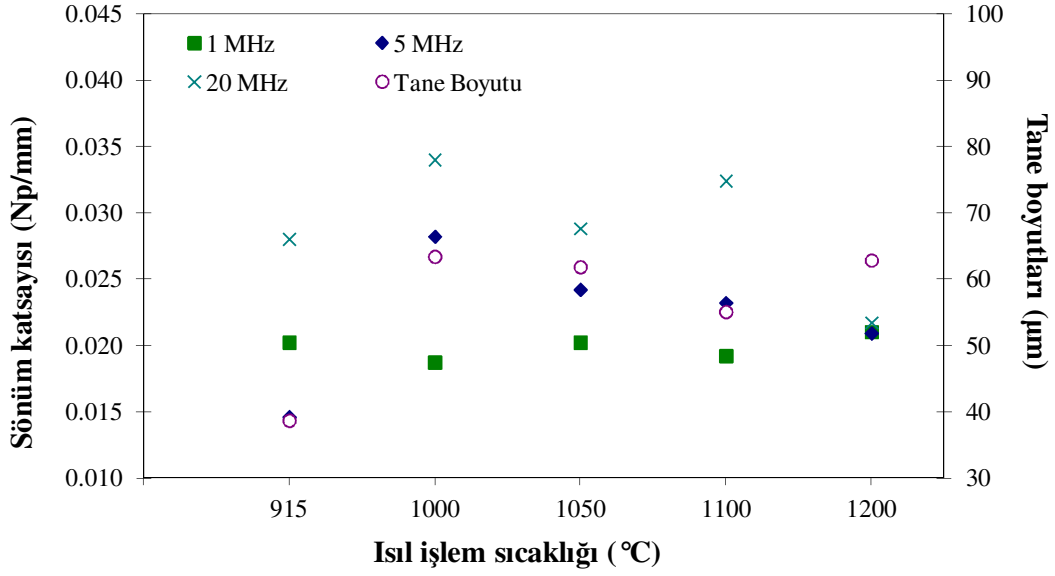
Gemi Sacı için yapılan ultrasonik ölçümler sonucu ortaya çıkan sönüm katsayıları, farklı frekanslara göre Çizelge 4.5’de verilmiştir. Gemi sacı için 10 MHz transduser ile çoğu gemi sacı numunesinden ve 15 MHz’li transduser ile de hiçbir gemi sacı numunesinden verimli sönüm ölçümleri alınamamıştır. Arka yüzey görüntülerinin gürültülü olması ve ayırd edilememesi içyapının yeterince karakterize edilmesini bu transduserlar için mümkün kılmamaktadır.

Çizelge 4.5 Gemi sacı numunelerinin ortalama tane boyutları ve numunelerden alınan farklı frekanslardaki ultrasonik sönüm değerleri.

Frekans	Grup No	Sönüm Katsayısı (Np/mm)	Gain (dB)	Filter (MHz)	r ²
1 MHz	1	0,0202	25	0,5-6	ort
	2	0,0187	25	0,5-6	ort
	3	0,0202	25	0,5-6	0,95
	4	0,0192	25	0,5-6	ort
	5	0,021	25	0,5-6	ort
5 MHz	1	0,0146	45	4-25	ort
	2	0,0282	45	4-25	ort
	3	0,0242	45	4-25	ort
	4	0,0232	45	4-25	ort
	5	0,0209	45	4-25	ort
10 MHz	1	0,027	50	4-25	0,87
	2	-	67	4-25	-
	3	-	67	4-25	-
	4	-	67	4-25	-
	5	0,025	67	4-25	0,91
15 MHz	1	-	-	-	-
	2	-	-	-	-
	3	-	-	-	-
	4	-	-	-	-
	5	-	-	-	-
20 MHz	1	0,028	50	4-25	0,95
	2	0,034	60	4-25	0,99
	3	0,0288	60	4-25	ort
	4	0,0324	60	4-25	0,999
	5	0,0217	60	4-25	0,0993

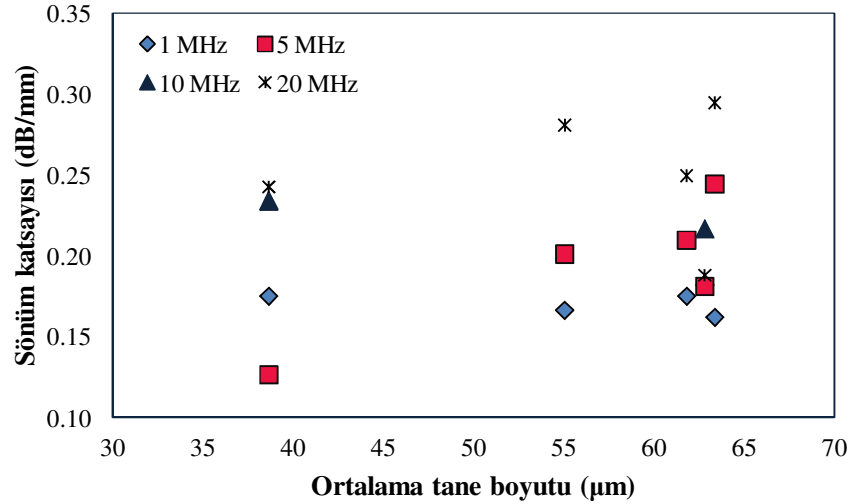
Gemi sacı numunelerinde sönüm katsayılarının tane boyutlarıyla beraber ısıtılma işlem sıcaklıklarına göre değişimi, farklı frekanslara göre Şekil 4.9’da grafik halinde verilmiştir. Tane boyutu değerlerinin, 5 MHz’lik transduser ile alınan ölçümlerle orantılı olarak değiştiği görülmektedir. Tane boyutu değerlerinin bulunduğu eksen

değer aralıklarının değişimi ile üst üste getirildiği zaman orantılı değişim gözlenmektedir.



Şekil 4.9 Gemi Sacı numunelerinden farklı frekanslarda alınan sönüm değerlerinin ısıtılma sıcaklıklarına göre değişimi.

Şekil 4.9'daki grafikte 10 ve 15 MHz frekansındaki transduserlarla arka yüzey pikleri ayırd edilemeyip, sönüm değerleri hesaplanamadığından bu ölçümlere yer verilmemiştir.

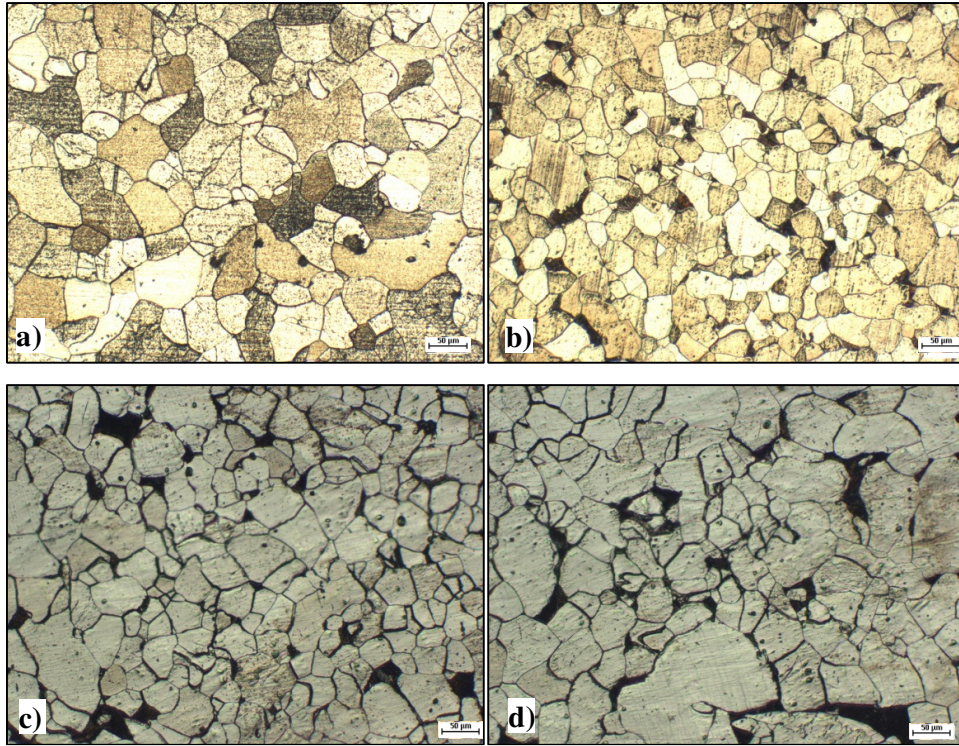


Şekil 4.10 Isıl işlem görmüş Gemi Sacı numunelerinden elde edilen sönüm değerlerinin tane boyutlarına göre değişimi.

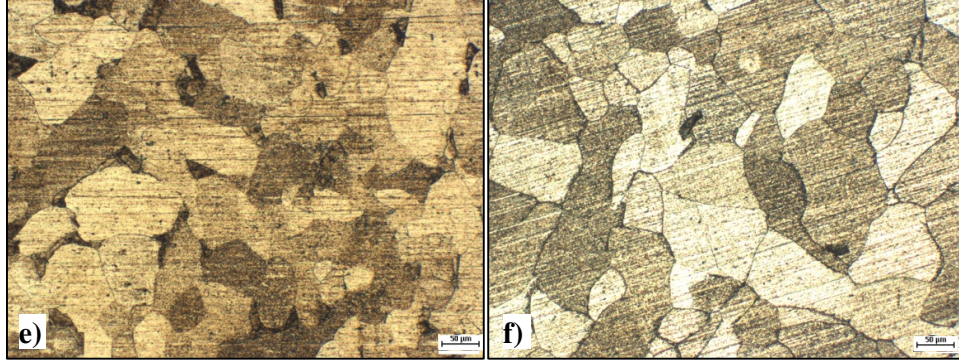
Şekil 4.10’da ise Gemi Sacı için farklı frekanslara göre ortalama tane boyutunun sönümle olan ilişkisine bakılmıştır. Tane Boyutları arasında farkın azlığından dolayı sönüm değerlerinde de fazla değişme gözlenmemektedir. Fakat yine AISI 1020 çeliğinde olduğu gibi tane boyutu ile sönüm katsayısı (dB/mm) gemi sacında da 5 MHz’li transduser ile düzgün olarak değişmektedir.

4.3 St37 Çeliğinden Alınan Ölçümler

St37 çeliğine ait numunelerin içyapı resimleri Şekil 4.11’de verilmiştir. İçyapı görüntülerinde herhangi bir hadde izine rastlanmamıştır. Ayrıca tane boyutlarının da ısıtım işlem sıcaklıklarıyla orantılı olarak arttığı görülmüştür. Şekil 4.11(d)’de görülen 1050°C’de tavllanmış St37 numunesinin içyapısında, tane boyutlarının birbirlerinden çok farklı boyutlarda olduğu ve bazı tanelerin diğerlerine göre fazla irileştiği gözlenmektedir. Fakat diğer numunelerde homojen bir dağılım gözlenmektedir.



Şekil 4.11 St37 çeliği numunelerinin a) Homojenleştirme sonrası, b) 915°C, c) 1000°C, d) 1050°C, e) 1100°C, f) 1200°C sıcaklıklarında tam tavlama sonrası oluşan içyapılar.



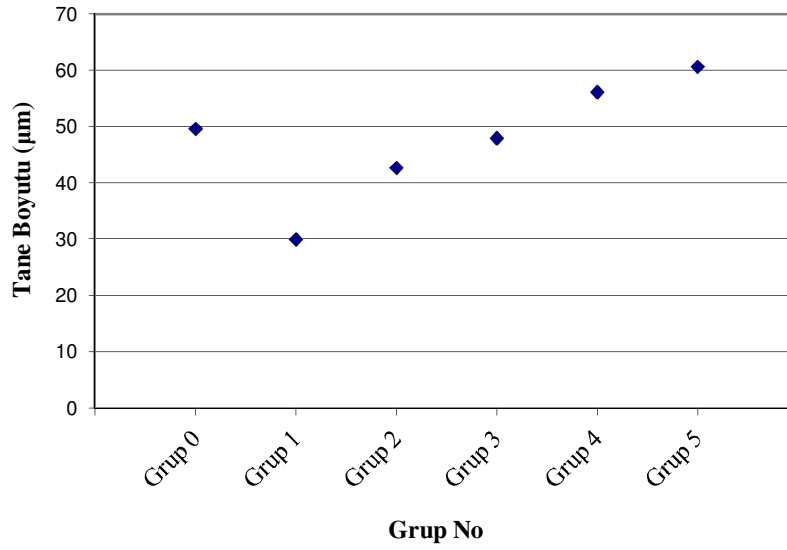
Şekil 4.11 (devamı) St37 çeliği numunelerinin a) Homojenleştirme sonrası, b) 915°C, c) 1000°C, d) 1050°C, e) 1100°C, f) 1200°C sıcaklıklarında tam tavlama sonrası oluşan içyapılar.

St37 çeliği için ısıt işlemler sonrası elde edilen ortalama tane boyutları Çizelge 4.6’da verilmiştir. Tane boyutları 30 µm’den 60,66 µm değerine kadar değişiklik görülmektedir.

Çizelge 4.6 St 37 çeliğine ait ısıt işlem bilgileri ve numune boyutları.

St 37	Tavlama Sıcaklığı (°C)	Ortalama tane boyutu (µm)	Numune kalınlıkları (mm)
Başlangıç durumu	0	17,66	8,25
0. Grup	1200	49,64	8,25
1. Grup	915	30	8,25
2. Grup	1000	42,71	8,25
3. Grup	1050	48,00	8,25
4. Grup	1100	56,2	8,25
5. Grup	1200	60,66	8,25

Çizelge 4.6’da verilen ortalama tane boyutlarının, ısıt işlem sıcaklıklarına göre değişimi Şekil 4.12’de verilmiştir. St37 çeliğinin 3. gruptaki numunesinde (Şekil 4.11(d)), tane boyutu dağılımı geniş aralığa sahip olmasına rağmen, ortalama tane boyutu ısıt işlem sıcaklığına göre Şekil 4.12’de artışı devam ettirdiği görülmektedir.

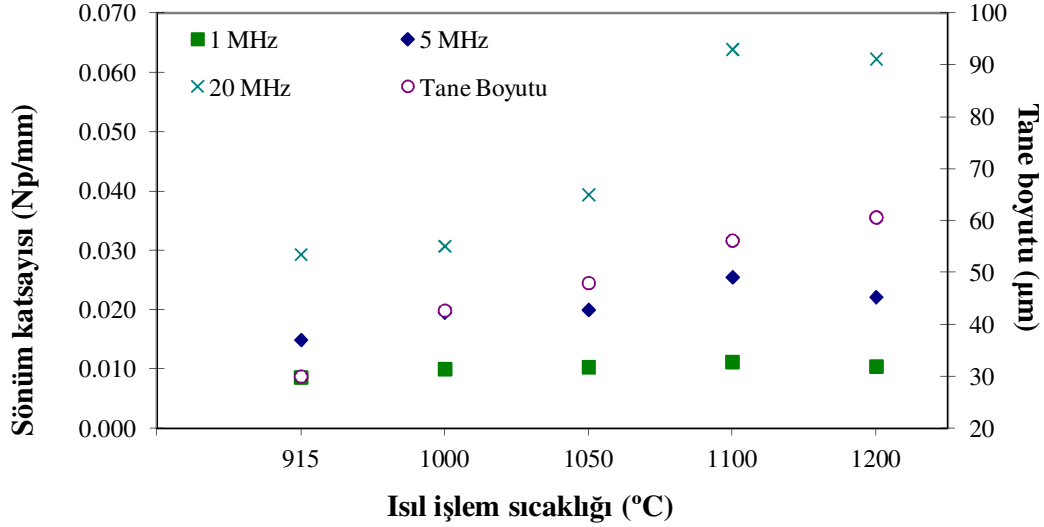


Şekil 4.12 St37 çeliğinde, ısıtılmış numunelerin ortalama tane boyutları değişimi.

Çizelge 4.7 St37 çelik numunelerinin ortalama tane boyutları ve numunelerden alınan farklı frekanslardaki ultrasonik sönüm değerleri.

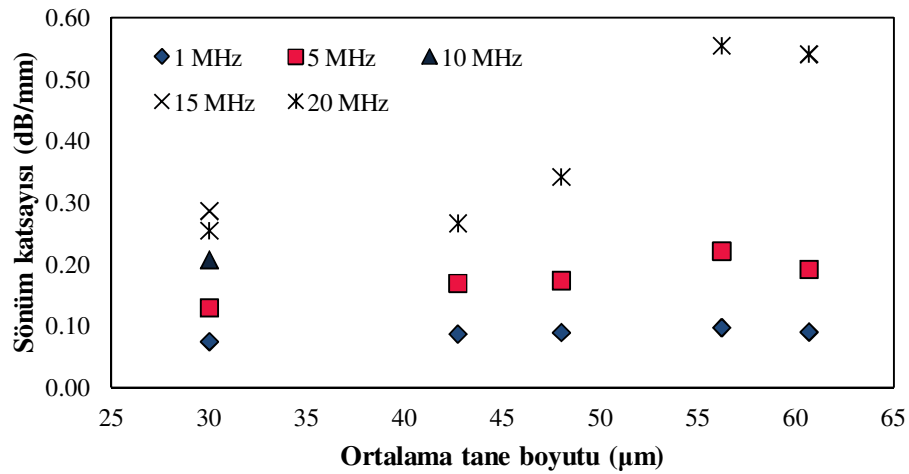
Frekans	Grup No	Sönüm Katsayısı (Np/mm)	Gain (dB)	Filter (MHz)	r ²
1 MHz	1	0,0086	25	0,5-6	0,974
	2	0,01	25	0,5-6	0,993
	3	0,0103	25	0,5-6	0,994
	4	0,0112	25	0,5-6	0,99
	5	0,0104	25	0,5-6	0,99
5 MHz	1	0,0149	40	4-25	(ort)
	2	0,0195	40	4-25	0,98
	3	0,02	40	4-25	0,99
	4	0,0255	40	4-25	0,988
	5	0,0221	40	4-25	0,987
10 MHz	1	0,0239	50	4-25	0,98
	2	-	-	-	-
	3	-	-	-	-
	4	-	-	-	-
	5	-	-	-	-
15 MHz	1	0,033	50	4-25	0,94
	2	-	-	-	-
	3	-	-	-	-
	4	-	-	-	-
	5	-	-	-	-
20 MHz	1	0,0293	55	4-25	0,93
	2	0,0307	60	4-25	0,96
	3	0,0394	60	4-25	0,98
	4	0,0639	60	4-25	0,96
	5	0,0623	60	4-25	0,986

St37 çeliği için ultrasonik ölçümler sonucu ortaya çıkan sönüm katsayıları transduser frekanslarına göre Çizelge 4.7’de verilmiştir. Gemi sacı numunelerinde olduğu gibi 10 ve 15 MHz’li transduserlarda St37 için karakterize edebilecek ölçümler alınamamıştır.



Şekil 4.13 St37 çeliği numunelerinden farklı frekanslarda alınan sönüm değerlerinin ısıtılma sıcaklıklarına göre değişimi.

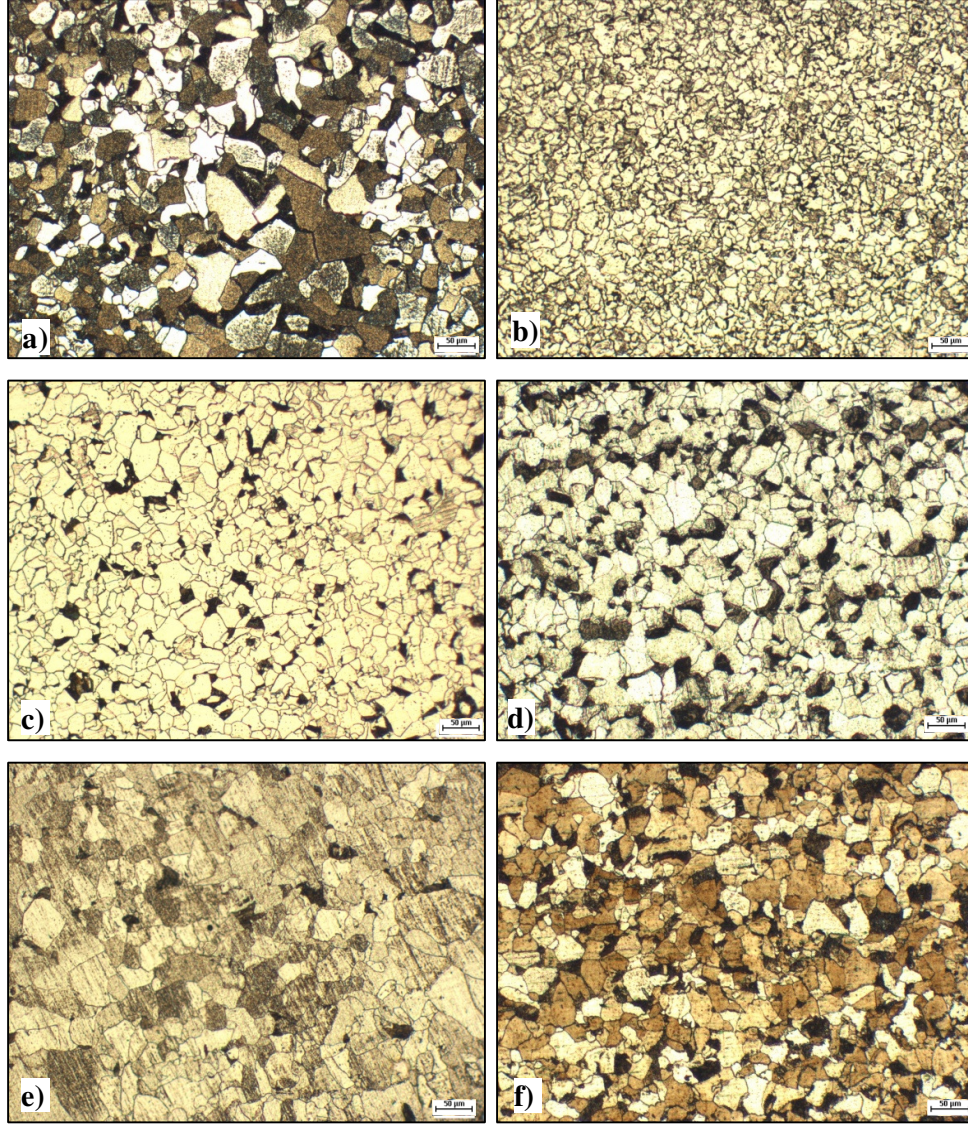
Şekil 4.13’te St37 için farklı frekanslara göre ortalama tane boyutunun sönümle beraber ısıtılma sıcaklıklarına göre ilişkisine bakılmıştır. Tane boyutları düzgün olarak arttığı gibi sönüm katsayılarının da arttığı görülmektedir. Şekil 4.14’de sönüm katsayıları dB/mm biriminde tane boyutlarına göre ilişkisi verilmiştir.



Şekil 4.14 Isıl işlem görmüş St37 çeliği numunelerinden elde edilen sönüm değerlerinin tane boyutlarına göre değişimi.

4.4 7-Mn-6 Çeliğinden Alınan Ölçümler

7-Mn-6 çeliğine ait numunelerinin içyapı resimleri Şekil 4.15’de verilmiştir. Tanelerin çok ince olduğu gözlenmektedir. 1200 °C’de tavllanmış 7-Mn-6 çeliği numunesinde, 1020 çeliğinde olduğu gibi tanelerin inceldiği gözlenmiştir.



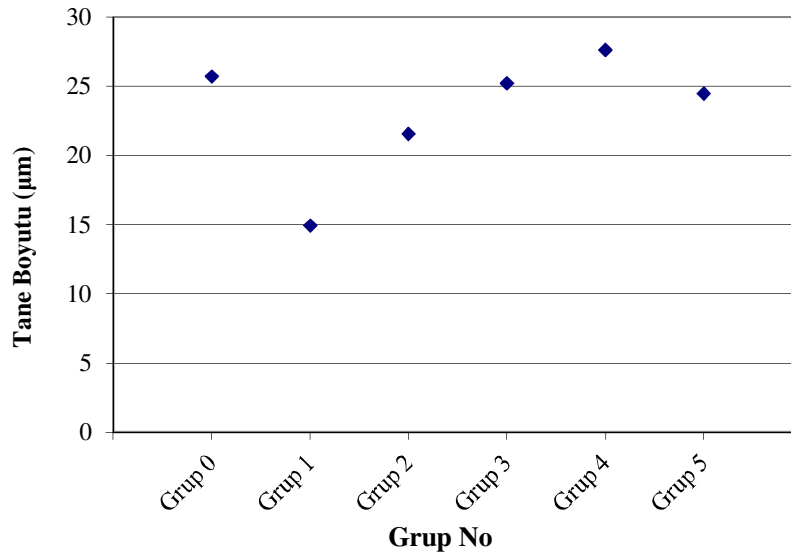
Şekil 4.15 7-Mn-6 çelik numunelerinin a) Homojenleştirme sonrası, b) 915°C, c) 1000°C, d) 1050°C, e) 1100°C, f) 1200°C sıcaklıklarında tam tavlama sonrası oluşan içyapılar.

7-Mn-6 çeliğinin farklı ısıtıl işlem görmüş numunelerinden alınan içyapı görüntülerinden elde edilen ortalama tane boyutları Çizelge 4.8’de verilmiştir. Tane boyutlarının değişim aralığının (14,92 μm - 27,61 μm) diğer çeliklere göre daha dar olduğu gözlenmiştir.

Çizelge 4.8 7-Mn-6 çeliğine ait ısıtıl işlem bilgileri ve numune boyutları.

7-Mn-6	Tavlama Sıcaklığı (°C)	Ortalama tane boyutu (μm)	Numune kalınlıkları (mm)
Başlangıç durumu	0	15,93	10
0. Grup	1200	25,69	8,25
1. Grup	915	14,92	8,25
2. Grup	1000	21,54	8,25
3. Grup	1050	25,2	8,25
4. Grup	1100	27,61	8,25
5. Grup	1200	24,45	8,25

Çizelge 4.8’de verilen ortalama tane boyutlarının, ısıtıl işlem sıcaklıklarına göre değişimi Şekil 4.16’da grafikte verilmiştir. İçyapı resimlerinden de anlaşıldığı üzere son ısıtıl işlemde tane boyutunun düştüğü görülmektedir.

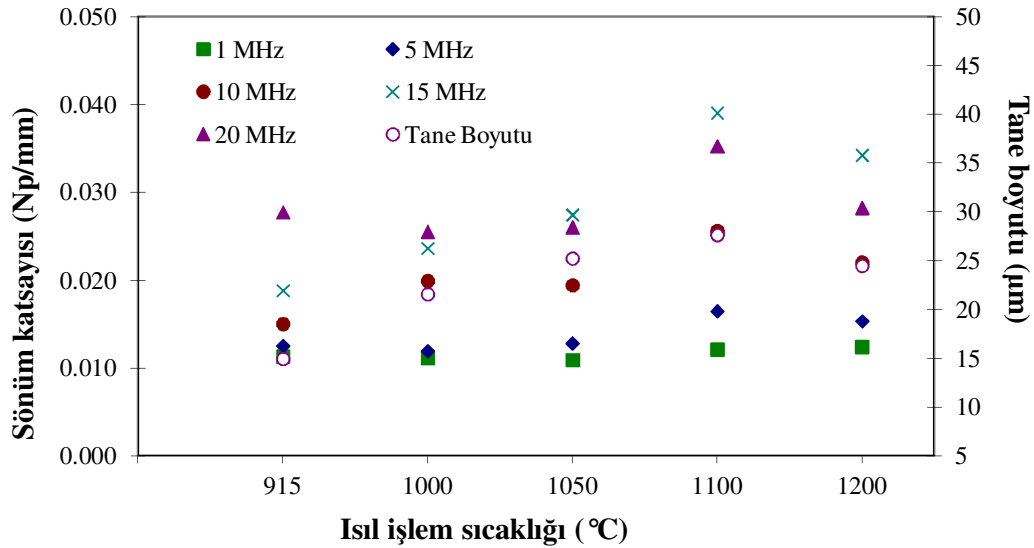


Şekil 4.16 Isıtıl işlem görmüş 7-Mn-6 çeliği numunelerinin ortalama tane boyutları değişimi.

Çizelge 4.9’da 7-Mn-6 çeliğine ait farklı ısıtıl işlem görmüş numunelerden alınmış ultrasonik ölçümler sonucu hesaplanan sönüm katsayıları (N_p/mm) frekanslara göre verilmiştir. Tüm transduserlerden ölçümler eksiksiz olarak alınmış ve karakterize edilebilecek değerler verilmiştir.

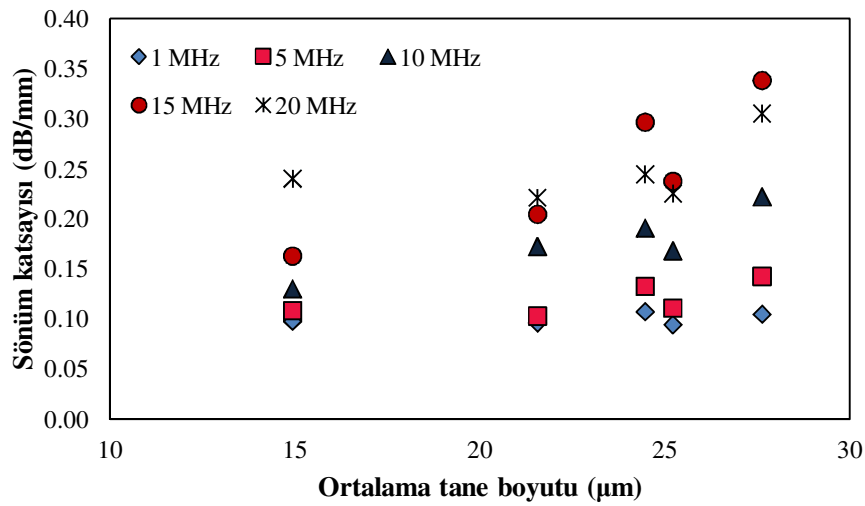
Çizelge 4.9 7-Mn-6 çeliği numunelerinin ortalama tane boyutları ve numunelerden alınan farklı frekanslardaki ultrasonik sönüm değerleri.

Frekans	Grup No	Sönüm Katsayısı (Np/mm)	Gain (dB)	Filter (MHz)	r ²
1 MHz	1	0,0113	25	0,5-6	ort
	2	0,0111	25	0,5-6	ort
	3	0,0109	25	0,5-6	ort
	4	0,0121	25	0,5-6	ort
	5	0,0124	25	0,5-6	ort
5 MHz	1	0,0125	50	4-25	ort
	2	0,0119	50	4-25	ort
	3	0,0128	50	4-25	ort
	4	0,01645	50	4-25	ort
	5	0,0153	50	4-25	ort
10 MHz	1	0,015	40	4-25	ort
	2	0,0199	40	4-25	ort
	3	0,0194	40	4-25	ort
	4	0,0256	40	4-25	ort
	5	0,022	40	4-25	ort
15 MHz	1	0,0188	35	4-25	ort
	2	0,0236	35	4-25	ort
	3	0,0274	35	4-25	ort
	4	0,039	35	4-25	ort
	5	0,0342	35	4-25	ort
20 MHz	1	0,0277	50	4-25	ort
	2	0,0255	50	4-25	ort
	3	0,026	50	4-25	ort
	4	0,0352	50	4-25	ort
	5	0,0282	50	4-25	ort



Şekil 4.17 7-Mn-6 çeliği numunelerinden farklı frekanslarda alınan sönüm değerlerinin ısıtıl işlem sıcaklıklarına göre değişimi.

Frekanslara göre sönüm değerlerinin tane boyutuyla olan ilişkisi Şekil 4.17’de grafikte verilmiştir. Grafikte sönüm değerlerinin değişimi, tane boyutu değişimi ile orantılı olduğu görülmektedir. Farklı tane boyutlarına göre sönüm katsayılarının frekansla olan ilişkisi ise Şekil 4.18’de grafikte verilmiştir. Grafikte frekanslara göre sönüm değerlerinin tane boyutuyla düzgün olarak arttığı görülmektedir. Tane boyutu dağılımının 7-Mn-6 çeliğinde diğerlerine göre daha dar aralıkta ve daha ince yapılı olmasına rağmen Şekil 4.18’de görülen hem frekanslara göre, hemde tane boyutuna göre sönümdeki düzgün değişim, çalışma da beklenen sonuçları belirgin bir şekilde desteklemektedir.



Şekil 4.18 Isıl işlem görmüş 7-Mn-6 çelik numunelerinden elde edilen sönüm değerlerinin tane boyutlarına göre değişimi.

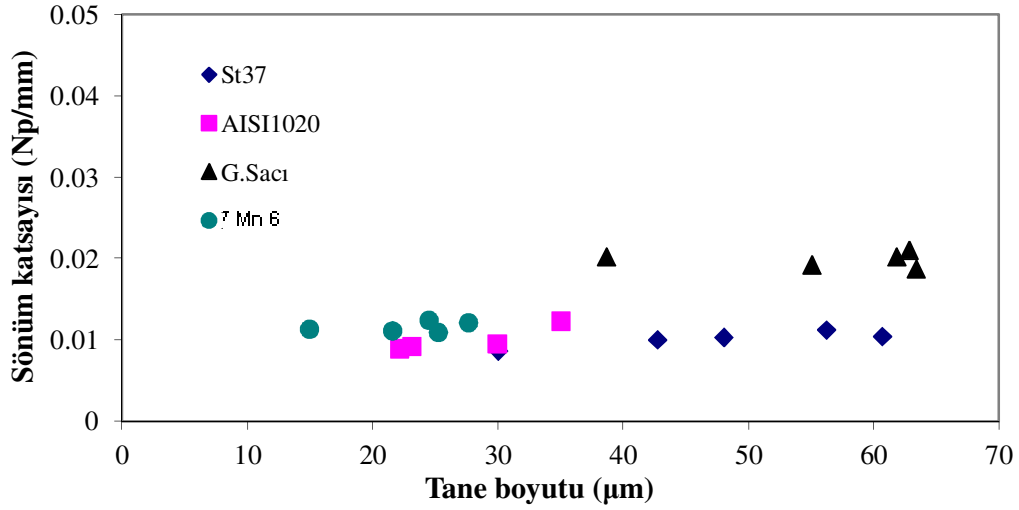
Farklı çeliklerde tavlama işlemleri sonucu elde edilen içyapılar, elde edilen ortalama tane boyutları ve frekanslara göre sönüm değerlerinin tane boyutlarıyla değişimlerinin grafikleri ayrı ayrı incelendikten sonra, çelikler ayırt edilmeden Sönüm değerlerinin tane boyutlarıyla olan ilişkileri ayrı ayrı frekanslara göre incelenmiştir.

4.5 Sönüm-Tane Boyutu İlişkisine Frekansın Etkisi

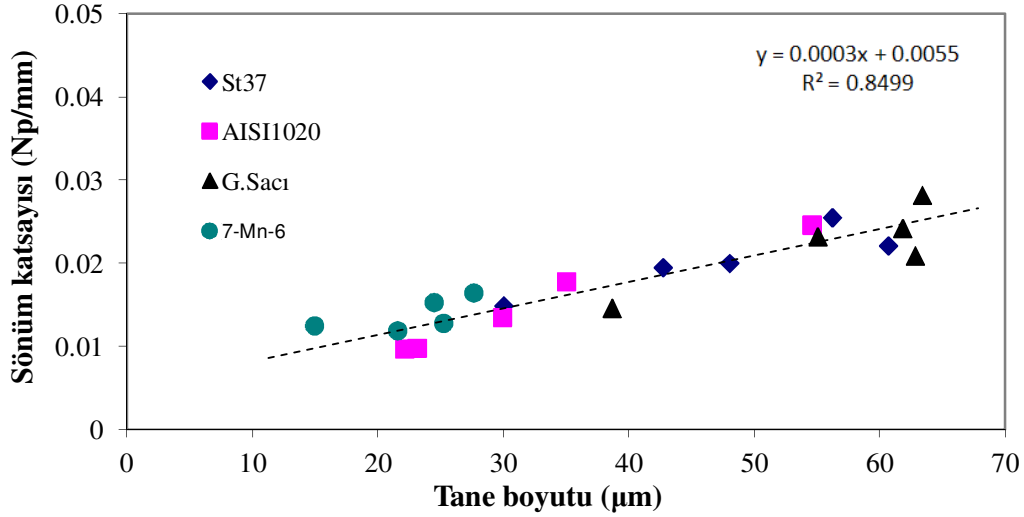
Farklı çeliklere ait sönüm değerleri, aynı grafikler içerisinde incelenecek olursa; sönüm ve tane boyutu arasındaki ilişkiye ultrases dalgalarının frekansları çerçevesinden bakılması gerekmektedir. Tüm malzemelerden alınan sonuçlar 1, 5, 10, 15 ve 20 MHz

frekanslı transduserlar kullanarak elde edilmiş ve sırasıyla Şekil 4.19, 4.20, 4.21, 4.22 ve 4.23’de grafikler halinde verilmiştir. Bu grafiklerde ortalama tane boyutlarının, malzeme cinsine bakılmaksızın ultrasonik sönüme etkileri farklı frekanslarda belirlenmiştir.

Şekil 4.19’da görülen ve 1 MHz frekanslı transduserden alınan sönüm ölçümlerinde, sönüm değerlerinin farklı çeliklerin tane boyutlarıyla ayrı ayrı doğrusal olarak değiştiği, bununla paralelinde bu doğrusallığın çelik ayırt edilmeksizin birbirini tamamladığı görülmektedir.

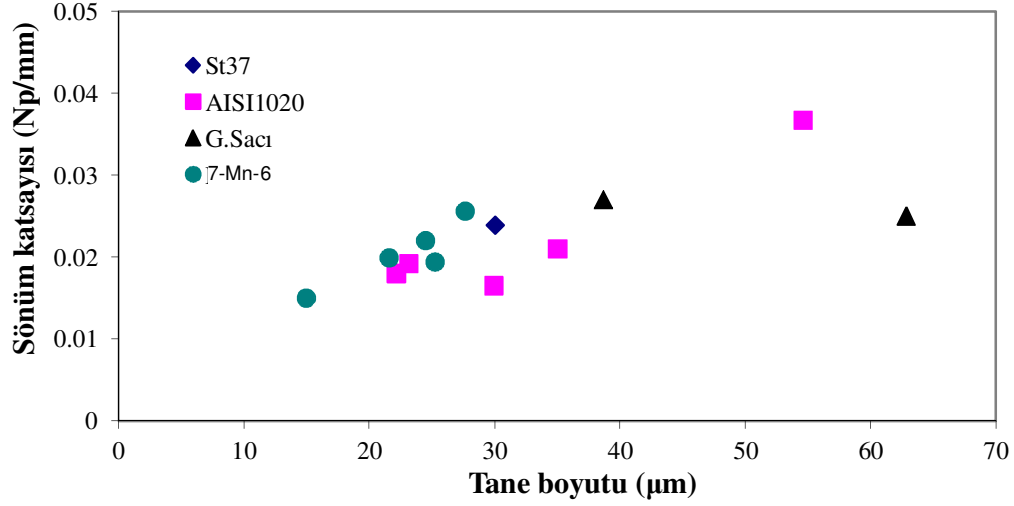


Şekil 4.19 1 MHz frekanslı transduser ile alınan sönüm katsayılarının tane boyutu ile ilişkisi.

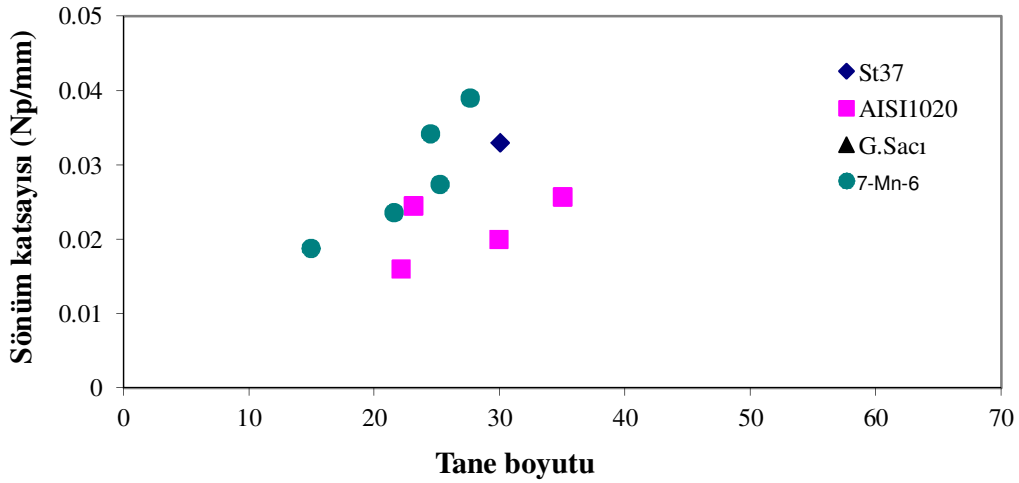


Şekil 4.20 5 MHz frekanslı transduser ile alınan sönüm katsayılarının tane boyutu ile ilişkisi.

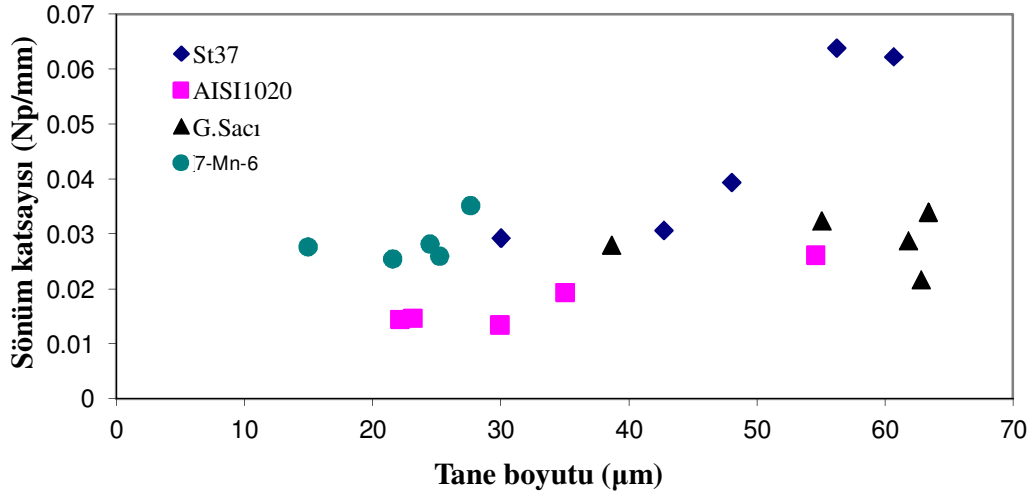
Şekil 4.19’da görülen değişimin doğrusallığı, Şekil 4.20’de verilen 5 Mhz frekanslı transduserden alınan sonuçlarda arttığı görülmektedir. Aynı zamanda Şekil 4.20’deki doğrusal değişimin eğimi, Şekil 4.19’daki eğimden fazladır. 3. Bölümde verilen saçılma bölgelerinin etkilerinin görüldüğü bu şekillerde Rayleigh bölgesinin oluşturduğu doğrusallık 5 MHz frekanslı ultrases dalgalarının sönümünde daha da belirgin olarak görülmektedir.



Şekil 4.21 10 MHz frekanslı transduser ile alınan sönüm katsayılarının tane boyutu ile ilişkisi.



Şekil 4.22 15 MHz frekanslı transduser ile alınan sönüm katsayılarının tane boyutu ile ilişkisi.



Şekil 4.23 20 MHz frekanslı transduser ile alınan sönüm katsayılarının tane boyutu ile ilişkisi.

Eğimdeki artışın Şekil 4.21 ve 4.22’de, 10 ve 15 MHz proplardan alınan sonuçlarda devam etmekte olduğu görülmektedir. St37 ve Gemi Sacı numunelerinden bu frekanslarda yeterli sönüm ölçümleri alınamadığından dolayı grafiklerde daha kaba tanelerdeki doğrusallık Şekil 4.19 ve Şekil 4.20’de görülememektedir. Bu lineer değişimin eğimindeki artışını AISI 1020 ve 7-Mn-6 çeliklerinden alınan sönüm ölçümleri desteklemektedir. Bu iki malzemenin tane boyutlarının, numunelerinin çoğunluğunda 20-35 μm aralığında olduğu, diğer Gemi sacı ve St37 numunelerinin çoğunluğunda ise tane boyutunun 40-65 μm aralığında olduğu görülmektedir. Dolayısıyla tane boyutunun kabalaşmasıyla sönüm artışı, dolayısıyla arka yüzeyden gelen arka yüzey yansımalarının daha hızlı sönümü, sönümün nedeni olan saçılmanın da iri tanelerde daha fazla olduğu ve saçılmalardan yansıyan ekolar arasında arka yüzey yansımalarının seçilememesi gibi bir sonuçla karşılaşmıştır. Şekil 4.23’te ise frekans değerinin 20 MHz olmasıyla tane boyutu ve dalga boyu arasındaki oranın Stokastik Saçılma Bölgesine yaklaşması etkisini göstermiş ve lineerlik bozulmuştur.

4.6 5 MHz Frekansta Sönüm-Tane Boyutu İlişkisi

Bölüm 4.5’te verilen grafiklerde aynı frekanslı dalgaların sönüm değerlerinin tane boyutu ilişkisine, çelik türü ayırt edilmeksizin bakıldığında; 5 MHz’e göre alınan sonuçların (Şekil 4.20) tüm çelik türleri için aynı doğru üzerinde değiştiği görülmüştür.

Bu doğrunun denklemi, kullanılan grafik programı tarafından elde edilmiştir. Bu grafikte, y ekseninde sönüm katsayısı (α) ve x ekseninde ortalama tane boyutu (D) olduğu göz önüne alınırsa denklem;

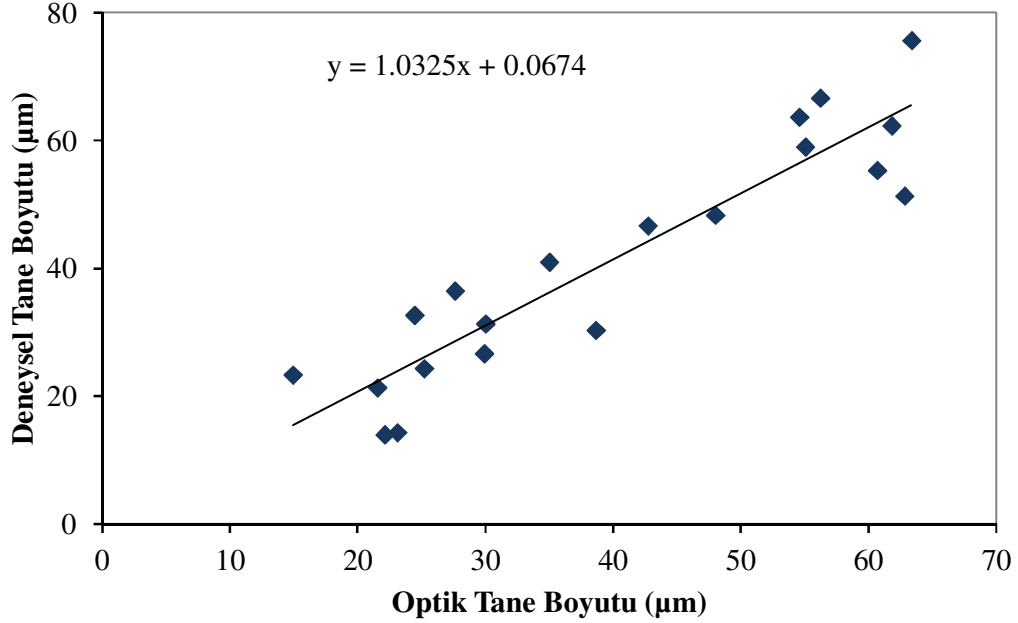
$$\alpha = 0,0003 D + 0,0055 \quad (4.1)$$

formunu alır. Denklemden α 'nın birimi Np/mm ve D'nin birimi μm 'dir. Bu denklem, çeliklerin ultrasonik olarak tane boyutu hesaplanmasında kullanılacak kalibrasyon eğrisinin denklemi olarak düşünülürse; ultrasonik sönüm katsayılarından hesaplanan tane boyutları Çizelge 4.10'da verilmiştir.

Çizelge 4.10 Optik ve ultrasonik olarak hesaplanmış ortalama tane boyutları.

Malzeme	Sönüm Katsayısı (Np/mm)	Ultrasonik Tane Boyutu (μm)	Optik Tane Boyutları (μm)	Hata (μm)
7-Mn-6 Çeliği	0.0125	23.33	14.92	-8.41
	0.0119	21.33	21.54	0.21
	0.0128	24.33	25.2	0.87
	0.01645	36.5	27.61	-8.89
	0.0153	32.67	24.45	-8.22
Gemi Sacı	0.0146	30.33	38.64	8.31
	0.0282	75.66	63.36	-12.31
	0.0242	62.33	61.8	-0.53
	0.0232	59	55.04	-3.96
	0.0209	51.33	62.8	11.47
AISI 1020	0.0097	14	22.11	8.11
	0.0098	14.33	23.1	8.77
	0.0178	41	34.99	-6.01
	0.0246	63.67	54.57	-9.10
	0.0135	26.67	29.9	3.23
St-37	0.0149	31.33	30	-1.33
	0.0195	46.67	42.71	-3.96
	0.02	48.33	48	-0.33
	0.0255	66.67	56.2	-10.47
	0.0221	55.33	60.66	5.33

Verilen bu çizelgeye göre ultrasonik olarak bulunan deneysel tane boyutunun, ölçülen optik tane boyutuna göre grafiği Şekil 4.24'te verilmiştir.



Şekil 4.24 Deneysel tane boyutunun ölçülen Optik tane boyutuna göre değişim grafiği.

Şekil 4.24'de, çelik numunesi ayırılmaksızın tane boyutlarının ultrasonik yöntem ile bulunan değerlerinin optik olarak bulunan değerleri arasındaki ilişki verilmiştir. Bu noktalar, değişim oranı 1,0325 olan ve eksenlerin birbirlerini kestikleri nokta 0,0674 olan doğru üzerinde dağılmıştır. Bu da iki yöntemle de bulunan ortalama tane boyutlarının birbirine yakınlığını vermektedir.

5. TARTIŞMA ve YORUM

Bu çalışmada; farklı tane boyutlarına sahip düşük karbon çeliklerinde, tane boyutunun ultrasonik dalgaların saçılmasına etkisi incelenmiştir. 4 farklı düşük karbonlu çeliğe ($C < 0,2\%$), 5 değişik sıcaklıkta tam tavlama ısıtma işlemi uygulanarak farklı tane boyutları elde edilmiştir. Numunelerde, boyuna ultrasonik dalgaların sönüm katsayıları; 1, 5, 10, 15 ve 20 MHz frekanslarına sahip normal temaslı transduser kullanılarak Pulse-Eko metodu ile ölçülmüştür.

Numunelere uygulanan ısıtma işlemleri sonucu bulunan ortalama tane boyutları;

- AISI 1020 çeliklerinde 22,11 - 54,57 μm ;
- Gemi Sacında 38,64 - 63,36 μm ;
- St37'de 30 - 60,66 μm ;
- 7-Mn-6 çeliğinde 14,92 - 27,61 μm

aralıklarında değiştiği gözlenmiştir (Çizelge 4.2, Çizelge 4.4, Çizelge 4.6 ve Çizelge 4.8). Fazların ultrasonik sonuçlara etki etmemesi ve içyapının Ferrit+Perlit fazlarından oluşması için düşük karbon çelikleri ve tam tavlama ısıtma işlemi uygun görülmüştür. İçeriklerde bulunan karbon oranının düşük olması ve çıkılan tavlama sıcaklığından çok yavaş soğuma olması, ferrit ve perlit fazlarından başka bir fazın görülmesini engellemiştir (Şekil 4.3, Şekil 4.7, Şekil 4.11 ve Şekil 4.15).

Bu içyapı bilgilerine göre saçılma bölgesi aralıkları incelenirse; Bölüm 3.5.1'de belirtildiği gibi, boyuna dalga hız değerlerinin düşük karbon çeliği numunelerinde ~5950 m/s olduğu kabul edildiğinde, numune içinde ilerleyen dalgaların dalga boyları, Denklem 2.1 uygulandığında;

- 1 MHz dalgalar için $\lambda = 5950 \mu\text{m}$,
- 5 MHz için $\lambda = 1190 \mu\text{m}$,
- 10 MHz için $\lambda = 595 \mu\text{m}$,
- 15 MHz için $\lambda = 396,6 \mu\text{m}$,
- 20 MHz için $\lambda = 297,5 \mu\text{m}$

olduğu hesaplanır. Belirlenen dalga boyu değerleri, Rayleigh Saçılma Bölgesi olan $0,02 < D / \lambda < 0,2$ aralığında yerine konulursa, frekanslar için tane boyutları aralıkları;

- 1 MHz için $119 \mu\text{m} < D < 1190 \mu\text{m}$;
- 5 MHz için $23,8 \mu\text{m} < D < 238 \mu\text{m}$;
- 10 MHz için $11,9 \mu\text{m} < D < 119 \mu\text{m}$;
- 15 MHz için $7,932 \mu\text{m} < D < 79,32 \mu\text{m}$;
- 20 MHz için $5,95 \mu\text{m} < D < 59,5 \mu\text{m}$

olarak belirlenir. Bu aralıklara ve ısıtma işlem sonucu numunelerde elde edilen tane boyutlarına göre, çalışmamızda kullanılan 1 MHz frekansı haricinde diğer frekans değerlerinde yapılan ölçümler Rayleigh Saçılma bölgesinde gerçekleşmiştir. 1 MHz frekansında alınan sonuçlar Etkisiz Saçılma Bölgesinde gerçekleşmiştir. Bu sebeple Şekil 4.19'da verilen grafikte, Sönüm değerleri ortalama tane boyutları ile çok fazla değişim göstermemiştir. Kumar vd. (1999) 316 östenitik paslanmaz çeliği ile yaptıkları çalışmada, 30 - 138 μm aralığında tane boyutlarına sahip numunelerde, saçılmaya en büyük etkiye artan tane boyutunun neden olduğunu belirtmişler ve saçılmayı cD^3f^4 şeklinde ifade etmişlerdir. Klinman vd. (1980) karbon çeliği numunelerinde tane boyutunun 30 μm 'den 113 μm 'ye arttığında, ultrasonik zayıflamanın Rayleigh bölgesi saçılmasına göre arttığını bulmuşlar ve çalışmalarında 5 MHz frekanslı transducer kullanmışlardır. Bu çalışmalarda daldırma metodu kullanılmıştır.

Deneyssel olarak elde edilen sönüm değerlerinin (Bölüm 3.5) ve ortalama tane boyutlarının, ısıtma işlem sıcaklıklarına göre değişimleri Şekil 4.5 (1020 çeliği), Şekil 4.9 (Gemi Sacı) Şekil 4.13 (St37) ve Şekil 4.17 (7-Mn-6) ile verilmiştir. Bu grafiklerde içi boş yuvarlaklar ile gösterilen noktalar, optik olarak ölçülen tane boyutlarını gösterirken; diğer renkli noktalar farklı frekanslardaki sönüm değerlerini vermektedir. Bu grafiklerde görülen tane boyutlarındaki değişimin ultrasonik sönüm değerlerinde de görüldüğü, özellikle 5 MHz frekanslı transducer ile alınan değişimlerin, tüm çelikler için de en yakın olduğu dikkati çekmektedir. Literatürde de, düşük karbonlu çeliklerle ($\%C < 0,2$) ilgili daldırma metoduyla yapılan çalışmalarda da 5 MHz frekanslı transducer ile en uygun ölçümlerin alındığı belirtilmektedir (Ahn *et al.* 1999, Ahn *et al.* 2000).

Isıtma işlem sıcaklıkları dikkate alınmadan çizilen, sönüm değerlerinin ortalama tane boyutları ile ilişkisini gösteren grafiklerde (1020 çeliği için Şekil 4.6, Gemi Sacı için Şekil 4.10, St-37 için Şekil 4.14 ve 7-Mn-6 için Şekil 4.18) ise lineer değişimler göze

çarpmaktadır. Sönüm - tane boyutlarındaki bu lineer değişimler grafiklerde farklı frekanslara göre verilmiş olup, frekans değerleri arttıkça eğimlerinde artmış olduğu görülmektedir.

20 MHz frekanslı dalgaların dalga boyu ile numunelerdeki iri tanelerin tane boyutları arasındaki oran (D/λ) 0,2 değerine yakındır. Dolayısıyla saçılma mekanizması, 20 MHz frekanslı dalgalarda Rayleigh bölgesi ile Stokastik bölge sınırında gerçekleşir. Bundan dolayı sönüm değerleri içerisinde sadece saçılma değil soğrulma gibi farklı sönüm mekanizmalarının da etkilerinin görüldüğü ve çalışmamızda da sönümün tane boyutlarıyla beraber lineer değişimin eğimindeki artışın da bozulduğu gözlenmiştir.

Literatürde düşük karbon çeliklerinin tane boyutlarının ultrasonik olarak; daldırma yöntemiyle (Ahn *et al.* 2000, Klinman *et al.* 1980) ve ultrasonik lazer yöntemiyle (Ahn *et al.* 1999) incelendiği, temaslı yöntem ile doğrudan tane boyutlarının ultrasonik sönüm ile ilişkisine bakılmadığı tespit edilmiştir. Ayrıca literatürde Ferrit-Perlit-Martenizit-Beynit Faz oranlarına ultrasonik olarak bakılırken tane boyutları incelenmiş fakat tane boyutuna bakılırken fazların değişmesine dikkat edilmemiştir. Bu çalışmada Ferrit-Perlit faz yapısına sahip çeliklerde tane boyutunun değişim karakterinin, 5 MHz frekanslı boyuna dalgalarla temaslı olarak alınan sönüm değerlerinin değişimlerinin aynı eğime sahip olduğu belirlenmiştir. Tahribatsız muayene tekniklerinden olan metallerin ultrasonik kırık çatlak muayenesinde kullanılan 5 MHz frekans ile aynı zamanda çeliklerde, ortalama tane boyutlarını da belirlemenin mümkün olduğu gözlenmiştir.

Bu tez çalışmasının tamamlanmasından sonra; i) farklı fazların yer aldığı içyapılarda, temaslı olarak ölçülen ultrasonik sönüm değerleri ile ortalama tane boyutlarının değişim karakterinin belirlenmesi, ii) bant izlerinin tane boyutlarını ultrasonik olarak belirlerken sonuçlara etkileri, iii) demir dışı metallerde aynı yöntem kullanarak tane boyutunun incelenmesi hedeflenmiştir.

6. KAYNAKLAR

- Aghaie-Khafri M., Honarvar F. and Zanganeh S., (2012), Characterization of Grain Size and Yield Strength in AISI 301 Stainless Steel Using Ultrasonic Attenuation Measurements, *J. Nondestruct. Eval.* **31**: 191–196.
- Ahmed, S., Thompson R.B. and Panetta P.D., (2003), Ultrasonic Attenuation as Influenced by Elongated Grains, Review of Quantitative Nandestructive Evaluation, 22, by D.O. Thompson, D.E. Chimenti, American Institute of Physics.
- Ahmed, S. and Taylor, T., (2004), Inversion of ultrasonic attenuation for textural information of polycrystals, *16th World Conference on NDT Proceedings*, 471-494.
- Ahn B., Lee S.S., Hong S. T., Kim H.C. and Kang S.J.L., (1999), Application of the acoustic resonance method to evaluate the grain size of low carbon steels, *NDT&E International*, **32**: 85-89.
- Ahn B. and Lee S.S., (2000), Effect of microstructure of low carbon steels on ultrasonik attenuation, *IEEE Transactions on ultrasonics, ferroelectrics and frequency control*, **47**, 3; 620-29
- Akseland D.R., Çeviri: Erdoğan M., (1998), Malzeme Bilimi ve Mühendislik Malzemeleri, Nobel Yayın Dağıtım, 3. Baskı, Ankara.
- Anık S., Anık E.S., Vural M., (2000), Malzeme Bilgisi ve Muayenesi, Birsen yayınevi 6. Baskı (Çeviri; Weissbach W., 1993 Materials science and materials testing.)
- Atalar, A., Jipson, V., Koch, K. and Quate, C.F., (1979), Acoustic microscopy with microwave frequencies, *Annual Review of Material Science* **9**: 255-281.
- Bashyam, M., (1991), Ultrasonic NDE for ceramic- and metal- matrix composite material characterization, Rewiev of Progress in Quantitative NDE 10, D.O. Thompson and D.E. Chimenti (Eds.), Plenum Press, New York, 1423-1430.

- Bashyam, M. and Rose, J.L., (1992), Surface acoustic wave techniques for ceramic matrix composite materials characterization, *Review of Progress in Quantitative NDE 11*, D.O Thompson and D.E. Chimenti (Eds.), Plenum Press, New York, 1483-1490
- Beecham D., (1966), Ultrasonic scatter in metals: its properties and its application to grain size determination., *Ultrasonics*, **4**: 67–76.
- Beltzer, A.I. and Brauner, N., (1987), Shear waves in polycrystalline media and modifications of the Keller approximation, *Int. J. Solids Structures*, **23**: 1, 201-209.
- Bhatia, A.B. and Moore, R.A., (1959), Scattering of high-frequency sound waves in polycrystalline materials II., *Journal of the Acoustical Society of America*, **29**: 1140-1141.
- Bonnin A., Huchon, R. and Dechamps, M., (2000), Ultrasonic wave propagation in absorbing thin plates application to paper characterization, *Ultrasonics* **37**: 555-563.
- Bridge B. and Merrikkh K., (1999), Ultrasonic backscatter measurements of grain size variations illustrated by studies on heat treated Chrome – Nickel stainless steel, Trends in NDE Science & Technology 4, *Proceedings of the 14th World Conference on Non-Destructive Testing*, 2217-2220.
- Brown A. E., (1997), Rationale and Summary of Methods for Determining Ultrasonic Properties of Materials at Lawrence Livermore National Laboratory, Technical Report UCRL-ID-119958, Lawrence Livermore National Laboratory, page 1-45.
- Bucak A., (2000), Isıl İşleme Tabi Tutulan SAE 8620 Çeliğinin Yapı ve Mekanik Özelliklerindeki Değişimlerin İncelenmesi, Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Afyon. S 8-16.

- Cantrell, J. H. and Cantrell, S. A., (2008), Analytical Model of the Nonlinear Dynamics of Cantilever Tip-Sample Surface Interactions for Various Acoustic Atomic Force Microscopies, *Physical Review B*, **77**: 16, 165409.
- Curie J. and Curie P., (1880), Sur l'electricite polaire dans les cristaux hemiedres a faces inclinees, *CR Seances Acad. Sci*, **91**: 383-386.
- Çiğdemoğlu M., (1972), Metal ve Alaşımlarının Isıl İşlemleri, MMO Yayınları, Ankara, S 110.
- Digiacomio G., Ohlstein, G. and Jones W.J, (1970), Development of An Ultrasonic Method for Determination of Grain Size in Cast Steel, *MaterialsEvaluation* **28**: 271 – 276.
- Dubois M., Moreau A., Militzer M. and Bussiere J.F., (1998), *Scripta Mater.*, **39**: 735-741.
- Dussik, K., (1942), On the possibility of using ultrasound waves as a diagnostic aid, *Neurol. Psychiat*, **174**: 153-168.
- Edwards C., Al-Kassim A. and Palmer S.B, (1992) Laser Ultrasound for the study of thin sheets., In Rev Prog in QNDE 12 (Ed D.O. Thompson and D.E. Chimenti), Plenum Press., 539-548.
- Ekinci Ş., (1991), Östenitik Kaynak Dikişlerinin Ultrasonik Testinde Karşılaşılan Sorunlar ve Çözümleri, *Metallurji dergisi*, **34**: 7-13.
- Ekinci Ş., (1994), Tahribatsız Test; Ultrasonik – Seviye 2, ÇNAEM, Endüstriyel Uygulama Bölümü, 30-50.
- Ekinci Ş., Yıldırım A. ve Sarıçam S., (2004), Ultrasonik Test, Seviye I, Eğitim Notları, TAEK, ÇNAEM, Endüstriyel Uygulama Bölümü, 22-79.
- Esen E., (2000), Karbonlu Çeliklerin Isıl İşlem Etkisinde Sertleşme Kabiliyeti, Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Afyon, S 3.

- Fay, B., Brendal, K. and Ludwig, G., (1976), Studies of inhomogeneous substances by ultrasonic backscattering, *Ultrasound in Medicine and Biology*, **2**, 195-198.
- Firestone, F.A., (1943), U.S. patent 2.439.13.9.
- Firestone, F.A., (1945), The supersonic reflectoscope for interior inspection, *Metal Progress*, **48**; 505-512.
- Goebbels, K. and Höller, P., (1976), Quantitative determination of grain size by means of scattered ultrasound, *Proceedings of the 8th World Conference on NDT*, 1-7.
- Goebbels, K., (1980), Structure Analysis By Scattered Ultrasonic Radiation, Research Techniques in Nondestructive Testing V. IV, R.S. Sharpe (Ed.), Academic Press, New York, 67-74.
- Goebbels, K. and Höller, P., (1980), Quantative Determination of Grain Size and Detection of Inhomogeneities in Steel By Ultrasonic Backscattering Measurement, Ultrasonic Material Characterization, H.Berger and M. Linzer (Eds.), Special publication 596, National Bureau of Standards, Gaithersburg, MD, 67-74.
- Goebbels, K., Hirsekorn, S. and Willems, H., (1984), The Use of Ultrasound in The Determination of Microstructure, *IEEE Ultrasonics Proceedings*, 841-846.
- Goebbels, K., (1994), Materials Characterization for Process Control and Product Uniformity, CRC Press, First Ed., Boca Raton, Florida.
- Grayeli N. and Shyne J.C., (1985), Effect of microstructure and prior austenite grain size on acoustic velocity and attenuation in steel, Review of Progress in Quantitative NDE, edited by D. O. Thompson and D. E. Chimenti Plenum, New York, **4**, 927-937
- Güngör Y., (2001), Malzeme Bilgisi, Beta Yayınevi, İstanbul, S 63.

- Gür C.H., Tuncer B., O., (2005), Nondestructive investigation of the effect of quenching and tempering on medium-carbon low alloy steels, *Int. J. Microstructure and Materials Properties*, **1**: 1, 51-60.
- Hecht, A., Thiel, R., Neumann, E. and Mundry, E., (1981), Nondestructive determination of grain size in austenitic sheet by ultrasonic backscattering, *Materials Evaluation*, **39**, 934-938
- Hirsekorn, S., (1982), The scattering of ultrasonic waves by polycrystalline, *Journal of the Acoustical Society of America*, **72**: 1021-1031.
- Hirsekorn, S., (1983), The scattering of ultrasonic waves by polycrystalline II., Shear waves, *Journal of the Acoustical Society of America*, **73**: 1160-1163.
- Hoppe M. and Bereiter-Hahn, J., (1985), Applications of Scanning Acoustic Microscopy–Survey and New Aspects, *IEEE Trans. on Sonics and Ultrasonics*, **SU-32**, 289-301.
- Huntington H.B., (1950), On Ultrasonic Scattering by Polycrystals, *J. Acoust. Soc. Am.* **22**: 3, 362-364.
- Hsu C.H., Teng H.Y. and Chen Y.J., (2004), Relationship between ultrasonic characteristics and mechanical properties of tempered martensitic stainless steel, *Journal of materials Engineering and Performance*, **13**: 5, 593-599.
- Jayakumar T., Willems H., and Raj B., (1981), *Trans. Ind. Inst. Met.*, **44**, 327-38.
- Jhang K.Y., (2009), Nonlinear Ultrasonic Techniques for Non- destructive Assessment of Micro Damage in Material: A Review, *International Journal of Precision Engineering And Manufacturing*, **10**: 1, 123-135.
- Kara R., (2005), Tane Boyutunun Hmk Kafesli Metallerin Temel Mekanik Özelliklerine Etkisi, Yüksek lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon

- Kayalı Y., (2004), İsdemirde Üretilen Çeliklerin Temel Mekanik Özelliklerine Çeşitli Isıl İşlem Rejimlerinin Etkisi (Ç4140), Y. Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Afyon, S 19-22.
- Kino, G.S., (1980), Fundamentals of scanning systems, Scanned Image Microscopy, E.A. Ash (Ed.), Academic Press, London,1-21.
- Klinmann, R., Webster, G.R., Marsh, F.J. and Stephenson, E.T., (1980), Ultrasonic prediction of grain size, strength and toughness in plain carbon steel, *Materials Evaluation*, **38**: 10, 26–32.
- Klinmann, R. and Stephenson, E.T., (1981), Ultrasonic prediction of grain size and mechanical properties in plain carbon steel, *Materials Evaluation*, **39**: 11, 1116-1120.
- Korpel, A., Kessler, L.W. and Palermo, P.R., (1971), Acoustic Microscope operating at 100MHz, *Nature*, **232**,110-120.
- KOSGEB, (1989), Çelik Malzemelerin Seçimi ve Standartları, İstanbul, S 9-29.
- Krautkramer M. B., (2000), Nondestructive Material Testing with Ultrasonics - Introduction to the Basic Principles, *The e-Journal of Nondestructive Testing & Ultrasonics*, ISSN: 1435-4934 **5**: 9.
- Kruger, S.E., Rebello, J.M.A. and Charlier, J., (1998), Ultrasonic backscattering formulation applied to cast iron characterization, 7th European Conference on Non Destructive Testing, Copenhagen.
- Kuger S.E., Geo W., Glorieux C., Charlier J., Rebello J.M.A., Lauriks W. and Thoen J., (1998), *Mater. Sci. Eng. A*, **256**: 312-14.
- Kumar A., Jayakumar T., Palanichamy P. and Raj B., (1999), Influence of grain size on Ultrasonic Spectral Parameters in AISI type 316 Stainless Steel, *Scripta Materialia*, **40**: 3, 333-340.

- Kumar A., Laha K., Jayakumar T., Rao K. B. S. and Raj B., (2002), Comprehensive Microstructural Characterization in Modified 9 Cr-1Mo Ferritic Steel by Ultrasonic Measurements, *Metallurgical and Materials Transactions A*, **33A**: 1617-1626.
- Kumar A., Jayakumar T., Raj B. and Ray K.K., (2003), Correlation between ultrasonic shear wave velocity and poisson's ratio for isotropic solid materials, *Acta Materialia*, **51**: 8, 2417-26.
- Kutty T.R.G., Cndrasekharan K.N., Pannakal J.P., Ghoshal S.K., and De P.K., (1987), *NDT&E Int.*, **20**, 359-61.
- Langevin P. and Chilowsky C., (1916), Procèdes et appareils pour la production de signaux sous-marins diriges et pour la localisation a distance d'obstacles sous-marins., Brevet français no. 502913
- Lawrence H. and Van Vlack, (1994), Elements of Materials Science and Engineering, Literatür Yayıncılık, İstanbul. S 271.
- Lemons R.A. and Quate C.F., (1974), Acoustic microscope-Scanning version, *Applied Physics Letters*, **24**, 163-165.
- Lévesque D., Kruger S.E., Lamouche G., Kolarik R., Jeskey G., Choquet M. and Monchalain J.-P., (2006), Thickness and grain size monitoring in seamless tube-making process using laser ultrasonics, *NDT & E International*, **39**: 8, 622-626.
- Lipmann G., (1881), *An. Chim. Phys.*, **24**: 145–149.
- Liu J.B., Peterson J.N., F. Forsberg F., Jaeger M., Kynor D.B. and Kline-Schoder R.J., (2004), Acoustic Microscopy System Design and Preliminary Results, *Ultrasonics*, **42**: 1-9, 337-341.
- Xinbao L., Takamori S. and Osawa Y., (2007), Effect of matrix structure on ultrasonic attenuation of ductile cast iron, *J. Mater. Sci.* **42**: 179–184.

- Madsen, E.L., Dong, F., Frank, G.R., Gara, B.S., Wear, K.A., Wilson, T., Zagzebski, J.A., Miller, H.L., Shung, K.K., Wang, S.H., Feleppa, E.J., Liu, T., O'Brien, W.D., Topp K.A., Sanghvi N.T., Zaitzen A.V., Hall J.J., Fowlkes J.B., Kripfgans O.D. and Miller J.G., (1999), Interlaboratory comparison of ultrasonic backscatter, attenuation and speed measurements, *Journal of Ultrasound in Medicine* **18**, 615-631.
- Maev R. Gr., (1988), Scanning acoustic microscopy of polymeric and biological substances, Tutorial Archives of Acoustics, Poland, **13**, N 1-2, 13–43.
- Maev R. Gr. and Levin V.M., (1997), Principles of local sound velocity and attenuation measurements using transmission acoustic microscope, IEEE Trans. Ultrason. Ferroelec. Freq. Contr., **44**: N6, 1224.
- Maev R. Gr. and Titov S.A., (1998), Measurement method based on scanning Doppler continuous wave acoustic microscope, Topics on Nondestructive Evaluation Series, 3, ASNT Publication, 343-350.
- Maev R. Gr., (2004), New Generation of High Resolution Acoustic Imaging Technique For Material Characterization and NDT, Proc. of 16th WCNDT 2004 World Conference on NDT.
- Maev R. Gr., (2006), New Generation of High Resolution Ultrasonic Imaging Technique For Material Characterization and NDT, ECNDT 2006 - World Conference on NDT.
- Makhutov N. A., (1973), Resistanca of Constructional Components Against Brittle Fracture, Machinostronie Moskova.
- Makine ve Kimya Endüstrisi Kurumu., (1978), Çelik Türleri Katalogu, MKE Basım Evi, Ankara.
- Margaten, F.J., Gray, T.A. and Thompson, R.B., (1992a), A technique for quantitatively measuring microstructurally induced ultrasonic noise, Review of Progress in

- Quantitative NDE 10, D.O. Thompson, D.E. Chimenti (Eds.), Plenum Pres, New York, 1717-1724.
- Margaten, F.J., Thompson, R.B., Han, Y.H.K., Paxson, A.J. and Shamblen, C.E., (1992b), Relationship of microstructure to backscattered ultrasonic noise, Review of Progress in Quantitative NDE 11, D.O. Thompson and D.E. Chimenti (Eds.), Plenum Pres, New York, 1685-1691.
- Mason W. P., McSkimin H. J., (1947), Attenuation and scattering of high frequency sound waves in metals and glasses, *J. Acoust. Soc. Am.* **19**: 3, 464-473.
- Merkulova, V., (1970), Effect of Grain Size Distribution on Rayleigh Scattering of Ultrasonic Waves, *Sov. J. NDT*, 223-25.
- Mulhaser, O., (1931), DE Pat. 569598.
- Murray T.W. and Balogun O., (2004), High sensitivity laser-based acoustic microscopy using modulated excitation source, *Appl. Phys. Lett.* **85**: 2974.
- Nagy, P.B., (1999), Ultrasonic Nondestructive Evaluation, Ders Notları, University of Cincinnati, Dept. Aerospace Eng. and Eng. Mech., 3.15-3.16.
- Nicoletti, D.W., Bilgutay, N. and Onaral, B., (1990), Scaling properties of attenuation and grain size, IEEE Ultrasonics Symposium, 1119-1122.
- Nicoletti, D., (1991), Scaling Properties of Ultrasonic and Grain Size in Metals, PhD Thesis, Drexel University.
- Nikoonahad, M., (1984), Recent advances in high-resolution acoustic microscopy, *Contemporary Physics* 25, 129-158.
- Berke B., (2000), Nondestructive material testing with ultrasonics - Introduction to the Basic Principles, NDT.net, Vol.5 No 9.
- Onaran K., (1993), Malzeme Bilimi, Bilim Teknik Yayınevi, 4. Baskı, Eskişehir.

- Palanichamy P., Vasudevan M., Jayakumar T., Venugopal S. and Raj B., (2000), Ultrasonic Velocity measurements for characterizing the annealing behaviour of cold worked austenitic stainless steel, *NDT&E International*, **33**: 4, 253-259.
- Palanisamy S., Nagarajah CR. and Iovenitti P., (2005), Effects of grain size and surface roughness on ultrasonic testing of aluminum alloy die castings, *Materials Evaluation* **63**: 8, 832-836
- Papadakis E.P., (1964), Ultrasonic Attenuation Caused by Scattering in Polycrystalline Metals, Bell Lab. Inc. Allentown, Pennsylvania, Journal of Acoustical Society of America, **37**: Nd 4, 711-714.
- Papadakis, E. P., (1965), Ultrasonic Attenuation Caused by Scattering in Polycrystalline Metals, *J. Acoustic. Soc. of America*, **37**: 4, 711-717.
- Papadakis E.P., (1970), *Metall. Trans.*, **1**, 1053-57.
- Pekeris C L., (1947), Note on the Scattering of Radiation in an Inhomogeneous Medium, *Phys. Rev.* **71**: 4, 268-269.
- Popovics, S., (2001), Analysis of the concrete strength versus ultrasonic pulse velocity relationship, *Materials Evaluation*, **59**: 2, 123-130.
- Quate, C.F., Atalar, A. and Wickramasinghe, H.K., (1979), Acoustic microscopy with mechanical scanning –a review, *Proceedings of IEEE* 67, 1092-1114.
- Rabe, U., Kopycinska, M., Hirsekorn, S. and Arnold, W., (2002), Evaluation of the Contact Resonance Frequencies in Atomic Force Microscopy as a Method for Surface Characterisation (Invited), *Ultrasonics*, **40**: 1, 49-54,
- Rayleigh L., (1894), Theory of Sound, Macmillan, London, 149-152.
- Roney, R., (1950), The Influence of Metal Grain Structure on the Attenuation of an Ultrasonic Acoustic Wave, PhD Thesis, California Institute of Technology, Pasadena, California.

- Rose, J.H., (1992), Ultrasonic backscatter from microstructure, Review of Progress in Quantitative NDE 11, D.O. Thompson and D.E. Chimenti (Eds.), Plenum Pres, New York, 1677-1684.
- Rosen M., Ives L., Ridder S., Biancaniello F., and Mehrabian R., (1985), *Mater. Sci. Eng.*, **74**: 1-11.
- Roth W., (1948), Scattering of ultrasonic radiation in polycrystalline metals, *J. Appl. Phys.*, **19**: 901-910.
- Russell, M.D. and Neal, S.P., (1994a), Grain size power spektrum estimation for weak scattering polycrystalline materials using experimentally estimated backscatter coefficients: normal incidence, *Ultrasonics* **32**: 163-171.
- Russell, M.D. and Neal, S.P., (1994b), Grain size power spektrum estimation for weak scattering polycrystalline materials using experimentally estimated backscatter coefficients: oblique incidence, *Ultrasonics*, **32**: 173-180.
- Sadak M., (2000), Isıl işleme tabi tutulan 42CrMo4 Çeliğinin Yapı ve Mekanik Özelliklerindeki Değişmelerin İncelenmesi, Y. Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Afyon, S 1-30.
- Said G., (2003), Isıl İşlemler Dersi Ders Notları, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Afyon.
- Saniie, J. and Bilgutay, N.M., (1985), Ultrasonic grain size evaluation of heat-treated stainless steel samples, Review of Progress in Quantitative NDE 4, D.O Thompson and D.E. Chimenti (Eds.), Plenum Press, New York, 939-946.
- Saniie, J. and Bilgutay, N.M., (1986), Quantative grain size evaluation using ultrasonic backscattered echoes, *Journal of the Acoustical Society of America* **80**, 1816-1824.
- Saniie, J., Wang, T. and Bilgutay, N.M., (1988), Statistical evaluation of backscattered ultrasonic grain signals, *Journal of the Acoustical Society of America* **84**: 400-408.

- Scruby C.B. and Moss B.C., (1993), *NDT&E Int.*, **26**., 177-88
- Scruby C.B., Young R.M.K. and Bull C.E., (1995), *Ironmaking and Steelmaking*, **22**, 84-87
- Serfiçeli Y. S., (2000), *Malzeme bilgisi*, Ankara, S 138-139.
- Singh D. and Pandey D. K., (2009) Ultrasonic investigations in intermetallics, *J. Phys.*, **72**: 2, 389–398.
- Smith W.F., Çeviri: Erdoğan M., (2000), *Mühendislik Alaşımlarının Yapı ve Özellikleri*, Nobel Yayın Dağıtım, Ankara, S 68-71.
- Smith F.W., (2001), *Malzeme Bilimi ve Mühendisliği* , Literatür Yayıncılık, İstanbul.
- Sokolov, S.J., (1929), On the problem of the propagation of ultrasonic oscillations in various bodies, *Elek. Nachr. Tech.* **6**: 454-460.
- Spicer J.B., (1997), *High Temp. Mater. Sci.*, **37**: 23-41.
- Spicer J.B. and Wallace S.L., (1998), *J.mater Sci.*, **33**: 3899-3906.
- Stanke, F. E., (1983), Unified theory and measurements of elastic waves in polycrystalline materials, Ph. D. Thesis, Stanford University, Stanford, CA.
- Stanke, F. E., and Kino, G. S., (1984), A unified theory for elastic wave propagation in polycrystalline materials, *J. Acoust. Soc. Am.*, **75**, 665– 681.
- Stigh U., (1987), *Eng. Fract. Mech.*, **28**: 1-12.
- Sturges, D., Cappabianca, C. and Minter, J., (1991), Applications of ultrasonic microscopy to the evaluation of ceramic materials, Review of Progress in Quantitative NDE 10, D.O Thompson and D.E. Chimenti (Eds.), Plenum Press, New York, 1765-1773.

- Sundin S. and Artymowicz D., (2002), Direct Measurements of grain size in low-carbon steels using the laser ultrasonic technique, *Metallurgical and Materials Transactions A*, **33A**: 687-691.
- Şişman A., (1999), Isıl İşleme Tabii Tutulan Çeliğin Yapı ve Mekanik Özelliklerindeki Değişmelerin İncelenmesi, Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Afyon, S 10.
- Taşan İ. ve Toprak Z., (2001), Tahribatsız Muayene Yöntemleri, Bitirme tezi, İ.Ü. Müh.Fak. Metalurji ve Mal. Müh., 5-20.
- TMMOB, (1997), Tahribatsız Muayene Kurs Programı Notları, Metalurji Mühendisleri Odası, 20-50.
- Topbaş M. A., (1998), Çelik ve Isıl İşlem El Kitabı, Prestij Yayın Basım, İstanbul, S 33.
- Turner, J. T., (1999), Elastic wave propagation and scattering in heterogeneous, anisotropic media: Textured polycrystalline materials, *J. Acoust. Soc. Am.*, **106**: 541-552.
- Ulu S., (2004), Karbonlu ve Düşük Alaşımli Çeliklerin Temel Mekanik Özelliklerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon.
- Weaver, R. L., (1990), Diffusion of ultrasound in polycrystals, *J. Mech. Phys. Solids*: **38**, 55–86.
- Weissbach W., Çeviri: Anık S., Anık E. S., Vural M., (1998), Malzeme Bilgisi ve Muayenesi, Birsen Yayınevi, İstanbul, S 28-29, 58, 113.
- Vary, A., (1980), Ultrasonic measurement of material properties, Research Techniques in Non-destructive Testing V. IV, R.S. Sharpe (Ed.), Academic Press, New York.
- Vary A., (1988), Concepts for Interrelating Ultrasonic Attenuation, Microstructure, and Fracture Toughness in Polyrstalline Solids, *Materials Evaluation*, **46**, 642-649.

- Yalçın H. ve Gürü M., (2002), Malzeme Bilgisi, Palme Yayıncılık, Ankara, S 41.
- Yang L., Lobkis O.I. and Rokhlin S.I., (2011), Shape effect of elongated grains on ultrasonic attenuation in polycrystalline materials, *Ultrasonics* **51**, 697–708.
- Yang L., Li J., Lobkis O.I. and Rokhlin S.I., (2012 a), Ultrasonic Propagation and Scattering in Duplex Microstructures with Application to Titanium Alloys, *J. Nondestruct. Eval.* **31**: 270–283.
- Yang L. and Turner J.A., (2004), Attenuation of ultrasonic waves in rolled metals, *J. Acoust. Soc. Am.* **116**: 6, 3319–3327.
- Yang L. and Rokhlin S.I., (2012 b), On Comparison of Experiment and Theory for Ultrasonic Attenuation in Polycrystalline Niobium, *J. Nondestruct. Eval.* **31**: 77-79.
- Yüksel M., (2001), Malzeme Bilgisi, Makine Mühendisleri Odası yayını, Ankara, S 258-260, 262-265.
- Yoon M.H., and Ramabadran, T.V., (1992), Characterization of materials using grain backscattered ultrasonic signals, Review of Progress in Quantitative NDE 14, D.O Thompson and D.E. Chimenti (Eds.), Plenum Press, New York.
- Zeng F., Agnew S.R., Raeisinia and Myneni G.R., (2010), Ultrasonic Attenuation Due to Grain Boundary Scattering in Pure Niobium, *J. Nondestruct Eval.*, **29**: 93-103.
- Zhang X.G., Simpson W.A., Vitek J.M., Barnard D.J., Tweed L.J. and Foley J., (2004), Ultrasonic attenuation due to grain boundary scattering in copper and copper-aluminum, *Journal of The Acoustical Society Of America* **116**: 1, 109-116.
- Zinin, V., Weise, W., Lobkis, O. and Boseck, S., (1997), The theory of three-dimensional imaging of strong scatterers in scanning acoustic microscopy, *Wave Motion* **25**: 213-236.

6.1 İnternet Kaynakları

- 1-http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Ultrasonics/Physics/elastic_solids.htm 05.03.2007
- 2-<http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Ultrasonics/EquipmentTrans/radiatedfields.htm> 20.12.2012
- 3- <http://cemsas.com.tr/genel-yapi-celikleri> 31.12.2012
- 4-<http://koumakina2001.8m.com> 31.12 2004
- 5- <http://web.utk.edu/~prack/MSE%20300/FeC.pdf> 22.10.2004
- 6- http://cemtas.com.tr/yeni/fason_isl3.htm 31.01.2004
- 7- <http://web.utk.edu> 31.01.2004
- 8- http://www.cmsmakina.com/kou/projeler/pdf/odev_civi_imalati.pdf 30.01.2005
- 9- http://www.ccm.udel.edu/Personnel/homepage/class_web/Lecture%20Notes/2004/AskelandPhuleNotes-CH12Printable.ppt 24.12.2004
- 10- <http://www.tu-darmstadt.de/fb/ms/student/fs/german/lab/w4/mse4-2.htm> 31/05/2005.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Ahmet DENİZ
Doğum Yeri ve Tarihi : Afyonkarahisar, 13.07.1979
Yabancı Dili : İngilizce
İletişim (Telefon/e-posta) : 0-505-346 80 73 ahmetdeniz@aku.edu.tr

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl):

Lise : Afyon Kocatepe Anadolu Lisesi - 1997
Lisans : Ankara Üniversitesi (Fen Fak. Fizik B1) - 2003
Yüksek Lisans : Afyon Kocatepe Üniversitesi (Fizik ABD) - 2005

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl :

Afyon Kocatepe Üniversitesi Çay MYO. (2009-...)

Yayınları (SCI ve diğer) :

Bitirme tezi: “Alümina Seramiklerinde Tanecik Boyutunun Ultrases ile Belirlenmesi”, 2005.

Bildiriler: A. Deniz, M. Doğan, 2012, Effect of grain sizes on ultrasonic attenuation coefficients in low carbon steels, 2nd International Advances in Applied Physics & Materials Science – APMAS2012 ANTALYA.

A. Deniz, M. Doğan, (2012), Investigating pure alumina ceramics by ultrasonic attenuation method, 2nd International Advances in Applied Physics & Materials Science – APMAS2012 ANTALYA.

A. Deniz, M. Doğan, G. Said, (2010), Düşük Karbon Çeliklerinde Ultrasonik Metot ile Tane Boyutu Karakterizasyonu, ADIM FİZİK GÜNLERİ-I, Afyonkarahisar, Özet kitabı, S.55.

A. Deniz, M. Doğan, G. Said, (2009), Karbon Çeliklerinde Isıl İşlem Etkilerinin Ultrasonik Olarak İncelenmesi, 26. TFD. Uluslararası Fizik Kongresi, Bodrum.

A. Deniz, M.Doğan, (2008), Ultrasonic Characterization of Alumina Powder Sizes Used Before Sintering, VII. Seramik Kongresi, Afyonkarahisar.

A. Deniz, M. Sarıkış, M. Doğan, (2008), Effect of Grain Size on Ultrasonic Attenuation in Plain Carbon Steels, 25th International Physics Conference, Bodrum.

A. Deniz, M. Doğan, (2005), Investigation of particle sizes in alumina ceramics with ultrasonic attenuation methods”, 23th International Physics Conference, Muğla.

A.Deniz, C.B.Emrullahoğlu, M.Doğan , (2004), Alümina seramiklerinde tanecik boyutunun ultrases ile belirlenmesi”, 22nd Physics Conference, Bodrum.