

Bazı Kompozitlerde Elastik ve Termal İletim Özellikleri Arasındaki İlişkinin Deneysel
Olarak Belirlenmesi

Vildan Özkan

DOKTORA TEZİ

Fizik Anabilim Dalı

Eylül 2012

The Experimental Determination of The Relationship Between Elastic Properties and
Thermal Conductivity of Some Composites

Vildan Özkan

DOCTORAL DISSERTATION

Department of Physics

September 2012

Bazı Kompozitlerde Elastik ve Termal İletim Özellikleri Arasındaki İlişkinin Deneysel Olarak
Belirlenmesi

Vildan Özkan

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca
Fizik Anabilim Dalı
Genel Fizik Bilim Dalında
DOKTORA TEZİ
Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Prof. M. Selami Kılıçkaya
İkinci Danışman: Yrd. Doç. Dr. İsmail Hakkı Sarpün

Eylül-2012

ONAY

Fizik Anabilim Dalı Doktora öğrencisi Vildan Özkan'ın DOKTORA tezi olarak hazırladığı “Bazı Kompozitlerde Elastik ve Termal İletim Özellikleri Arasındaki İlişkinin Deneysel Olarak Belirlenmesi” başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. M. Selami Kılıçkaya

İkinci Danışman : Yrd. Doç. Dr. İsmail Hakkı Sarpün

Doktora Tez Savunma Jürisi:

Üye : Prof. M. Selami Kılıçkaya

Üye : Doç. Dr. Suat Pat

Üye : Yrd. Doç. Dr. Ercan Uçgun

Üye : Yrd. Doç. Dr. Ali Çetin

Üye : Yrd. Doç. Dr. Ömer Özbaş

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun tarih ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Nimetullah BURNAK

Enstitü Müdürü

ÖZET

Bu çalışma kapsamında, çeşitli kompozitlerin üretimi ve üretilen kompozit numunelerin fiziksel özelliklerinin ortaya çıkarılması amaçlanmıştır. Numune hazırlama için klasik toz metalürjisi yöntemi kullanılmıştır. Seramik tabanlı kompozit numuneleri hazırlamak için WC (Tungsten Karbür) tozu ile bağlayıcı faz olarak Fe (Demir), Co (Kobalt), Ni (Nikel) ve Ti (Titanyum) tozları kullanılarak WC-Co-Ni, WC-Co-Ti ve WC-Fe-Ti kompozitleri; metal tabanlı kompozit numuneleri hazırlamak için ise taban malzemesi olarak Fe tozu ve bağlayıcı faz olarak Fe, Co, Ni, Ti ve Cr (Krom) tozları kullanılarak Fe-Co-Ni, Fe-Cr-Ni ve Fe-Ti-Ni kompozitleri üretilmiştir. Farklı oranlarda karışımlar hazırlandıktan sonra sinterleme işlemleri geleneksel tüp fırında 1000°C'de yapılmıştır.

Üretilen kompozitlerin Young modülü (E), Arşimet prensibinden yararlanılarak ölçülen yoğunlukları, ultrasonik darbe-yankı (puls-eko) yöntemi ve daldırma (immersion) yöntemi ile ölçülen ultrasonik hızları yardımıyla hesaplanmıştır. Termal iletkenlik katsayıları ise sıcak disk yöntemi kullanılarak ölçülmüştür. İki farklı yöntemle hesaplanan Young modülü ile termal iletkenlik arasındaki ilişki incelenmiş ve elde edilen sonuçlar literatürden elde edilen değerlerle kıyaslanmıştır. Ayrıca yapılan çalışmada darbe-yankı yöntemi ve daldırma yöntemi ile hesaplanan ultrasonik boyuna ve enine dalga hızları ile üretilen kompozitlerin yüzde oranları arasındaki ilişki incelenmiş olup yapının iç yapısı, dayanıklılığı, gözenekliliği vb. özellikleri hakkında bilgi edinilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kompozit, Young Modülü, Darbe-Yankı, Daldırma, Termal İletkenlik

SUMMARY

It is aimed to produce some composites and to reveal the physical features of the produced composites in this study. The method of classic powder metallurgy has been used for sample preparation. WC-Co-Ni, WC-Co-Ti and WC-Fe-Ti composites have been produced with the use of WC (Tungsten carbide) powder and the two of the Fe (Iron), Co (Cobalt), Ni (Nickel) and Ti (Titanium) powders as binder phase for the preparation of ceramic-metal composite samples. On the other hand, in order to produce metal based composite samples Fe-Co-Ni, Fe-Cr-Ni and Fe-Ti-Ni have been produced by selecting Fe powder as base material and two of the Fe, Co, Ni, Ti and Cr (Chromium) powders as binder phase. Sintering has been applied in conventional furnace with 1000°C after the mixtures have been prepared with different ratios.

The Young modulus (E) of the produced composites has been measured with the help of the density measured through Archimedes principle and the ultrasonic velocity measured through ultrasonic pulse-echo method and immersion method. Thermal conductivity has been measured via hot disk method. The relation between the Young modulus which is measured through two different methods and thermal conductivity have been physically examined and the obtained results have been compared to the literature. Moreover, within the study the relationship between ultrasonic longitudinal and transverse wave velocity measured with the methods of pulse-echo and immersion, and the percentages of the produced composites has been analyzed and the information about the features of the structure like microstructure, reliability and porosity has been obtained.

Keywords: Composite, Young Modulus, Pulse-Echo, Immersion, Thermal Conductivity

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xvi
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	xvii
1. GİRİŞ	1
LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	3
2. 1. Ultrases.....	3
2. 2. Ultrases Malzeme Analizi.....	5
2. 3. Ultrases Test Yöntemleri.....	8
2. 4. Elastik ve Termal Özellikler.....	10
2. ÖRGÜ TİTREŞİMLERİ	14
3. 1. Tek Atomlu Örgü Titreşimleri.....	15
3. 2. İki Atomlu Örgü Titreşimleri.....	19
3. 3. Üç Boyutlu Kristallerin Örgü Titreşimleri.....	22
3. 4. Fonon Dinamiği.....	27
3. TERMAL VE ELASTİK ÖZELLİKLER	31
4. 1. Termal İletkenlik.....	31
4. 1. 1. Katılarda termal iletkenlik.....	35
4. 2. Young Modülü.....	37
4. 3. Poisson Oranı.....	39
4. 4. Hacim Modülü.....	41
4. 5. Kayma Modülü.....	42
4. 6. Ultrasonik Yutulma.....	43
4. 6. 1. Elektron-Fonon etkileşiminden oluşan yutulma.....	44
4. 6. 2. Fonon- Fonon etkileşiminden oluşan yutulma.....	45

İÇİNDEKİLER (devam)

4. 7. Ultrases dalgalarının yansıma ve kırılması	46
4. MATERYAL VE METOT.....	48
5. 1. Numune Oluşturulması	48
5. 1. 1. Kullanılan kimyasal tozlar	50
5. 1. 1. 1. Tungsten karbür (WC)	50
5. 1. 1. 2. Demir (Fe)	51
5. 1. 1. 3. Kobalt (Co).....	51
5. 1. 1. 4. Nikel (Ni)	52
5. 1. 1. 5. Krom (Cr).....	53
5. 1. 1. 6. Titanyum (Ti)	53
5. 1. 2. Karıştırıcı	54
5. 1. 3. Hidrolik pres.....	54
5. 1. 4. Tüp fırın sinterleme	55
5. 1. 5. Hassas terazi.....	56
5. 2. Ultrases Ölçümleri	56
5. 2. 1. Darbe-yankı yöntemi	56
5. 2. 2. Daldırma yöntemi.....	58
5. 2. 3. Bilgisayar kontrollü pulser/receiver	61
5. 2. 4. Dijital osiloskop	61
5. 2. 5. Transdüser	62
5. 2. 6. Bağlayıcı sıvı.....	63
5. 3. Termal İletkenlik Ölçümü	64
6. DENEYSSEL SONUÇLAR.....	68
6. 1. Fe-Co-Ni Kompozit Numunesi.....	68
6. 2. Fe-Cr-Ni Kompozit Numunesi	75
6. 3. Fe-Ti-Ni Kompozit Numunesi.....	81
6. 4. WC-Co-Ni Kompozit Numunesi	88
6. 5. WC-Co-Ti Kompozit Numunesi.....	95

6. 6. WC-Fe-Ti Kompozit Numunesi	100
7. TARTIŞMA VE SONUÇ	107
8. KAYNAKLAR DİZİNİ	112
ÖZGEÇMİŞ.....	132

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
3.1. Örgü titreşimleri ve fiziksel özellikler arasındaki karşılıklı ilişkiler.	14
3.2. Tek atomlu boyuna örgü titreşimleri.	15
3.3. Tek atomlu enine örgü titreşimleri.	16
3.4. $-\pi a \leq k \leq \pi a$ aralığında $(4C/M)^{1/2}$ maksimum değerindeki dağıtkanlık bağıntısının şematik gösterimi.	17
3.5. (a) Dalgaboyu $\lambda = 2a$, dalgasayısı $k = \pi a$ için atomik yer değiştirmeleri temsil etmektedir. (b) Belirli λ (sürekli çizgi) ve k (kesik çizgi) değerine sahip dalga için atomik yer değiştirmelerdir.	18
3.6. İki atomlu örgü titreşimleri.	20
3.7. Dağıtım bağıntısının optik ve akustik kipleri.	21
3.8. Optik ve akustik kip.	22
3.9. Durum yoğunluğu başına van Hove tekilliği ile basit bir lineer zincirin dalı. Burada dağıtım bağıntısı sıfır sapmaya sahiptir.	24
3.10. a) Salınım dalgalarını karşılaşması; (b) Umklapp olayı; (c) Umklapp olayında oluşan termal salınım dalgalarının yayılım yönünün değişimi	29
4.1. Yanal daralma ile çekme gerinimi.	38
4.2. Poisson oranının tanımlanmasında 3 boyuttaki değişim.	40
4.3. a atomik uzaklığı ve d , düzlemlerarası uzaklık ile atomların iki düzlemi arasında meydana gelen bağıl kayma.	42
4.4. Sıvı-katı ve katı-sıvı arayüzeydeki yansıyan ve kırılan dalgaları.	47
5.1. Metal tozunun sinterlenmesi sırasında boyun oluşumunun ilk safhaları.	49
5.2. İki konili karıştırıcı.	54
5.3. Numune hazırlamada kullanılan silindir biçimindeki çelik kalıp.	55
5.4. Argon gazı atmosferinde sinterleme işlemi için kullanılan tüp fırın.	55
5.5. Elektronik hassas numune tartım cihazı.	56
5.6. Darbe-yankı yönteminin şematik gösterimi.	57
5.7. Darbe-yankı yönteminin deneysel kurulumunun şematik gösterimi.	57

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.8. Daldırma yönteminin deneysel kurulumu.	58
5.9. Boyuna hız ölçümü için daldırma yönteminde (a) ultrases dalgalarının izlediği yollar ve (b) iletilen boyuna dalgaların çeşitli ekoları.	59
5.10. Enine hız ölçümü için daldırma yönteminde (a) ultrases dalgalarının izlediği yollar ve (b) enine ve boyuna dalgaların iletimi.	60
5.11. Ultrases ölçümlerinde darbe-yankı yöntemi için kullanılan pulser-receiver.	61
5.12. Pulser/receiver ile kullanılan dijital osiloskop.	62
5.13. Numune ölçümlerinde kullanılan boyuna ve enine transdüserlar.	63
5.14. Hız ölçümlerinde kullanılan bağlayıcı sıvı.	63
5.15. Sıcak disk için sensör ve numunenin şematik gösterimi.	65
5.16. Sıcak disk termal iletkenlik cihazı ve numune sensörü.	66
5.17. Sıcak disk numune tutucuları ve sensörü.	66
5.18. Farklı malzemelerin termal iletkenlik-termal geçirgenlik değerleri	67
6.1. $Fe_xCo_{3(1-x)/4}Ni_{(1-x)/4}$ kompozit numunesinin yüzde oranlarının ultrases (a) boyuna ve (b) enine hıza olan grafiği	70
6.2. $Fe_xCo_{(1-x)/2}Ni_{(1-x)/2}$ kompozit numunesinin yüzde oranlarının ultrases (a) boyuna ve (b) enine hıza olan grafiği	71
6.3. $Fe_xCo_{(1-x)/4}Ni_{3(1-x)/4}$ kompozit numunesinin yüzde oranlarının ultrases (a) boyuna ve (b) enine hıza olan grafiği	72
6.4. $Fe_{0.5}$ -Co-Ni kompozit numunesinin termal iletkenlik ile Young modülü grafiği	72
6.5. $Fe_{0.6}$ -Co-Ni kompozit numunesinin termal iletkenlik ile Young modülü grafiği	73
6.6. $Fe_{0.7}$ -Co-Ni kompozit numunesinin termal iletkenlik ile Young modülü grafiği	73

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
6.7. Fe _{0.8} -Co-Ni kompozit numunesinin termal iletkenlik ile Young modülü grafiği	74
6.8. Fe _{0.9} -Co-Ni kompozit numunesinin termal iletkenlik ile Young modülü grafiği	74
6.9. Fe _x Cr _{3(1-x)/4} Ni _{(1-x)/4} kompozit numunesinin yüzde oranlarının ultrases (a) boyuna ve (b) enine hıza olan grafiği	76
6.10. Fe _x Co _{(1-x)/2} Ni _{(1-x)/2} kompozit numunesinin yüzde oranlarının ultrases (a) boyuna ve (b) enine hıza olan grafiği	77
6.11. Fe _x Cr _{(1-x)/4} Ni _{3(1-x)/4} kompozit numunesinin yüzde oranlarının ultrases (a) boyuna ve (b) enine hıza olan grafiği	78
6.12. Fe _{0.5} -Cr-Ni kompozit numunesinin termal iletkenlik ile Young modülü grafiği	79
6.13. Fe _{0.6} -Cr-Ni kompozit numunesinin termal iletkenlik ile Young modülü grafiği	79
6.14. Fe _{0.7} -Cr-Ni kompozit numunesinin termal iletkenlik ile Young modülü grafiği	80
6.15. Fe _{0.8} -Cr-Ni kompozit numunesinin termal iletkenlik ile Young modülü grafiği	80
6.16. Fe _{0.9} -Cr-Ni kompozit numunesinin termal iletkenlik ile Young modülü grafiği	81
6.17. Fe _x Ti _{3(1-x)/4} Ni _{(1-x)/4} kompozit numunesinin yüzde oranlarının ultrases (a) boyuna ve (b) enine hıza olan grafiği	83
6.18. Fe _x Ti _{(1-x)/2} Ni _{(1-x)/2} kompozit numunesinin yüzde oranlarının ultrases (a) boyuna ve (b) enine hıza olan grafiği	84
6.19. Fe _x Ti _{(1-x)/4} Ni _{3(1-x)/4} kompozit numunesinin yüzde oranlarının ultrases (a) boyuna ve (b) enine hıza olan grafiği	85

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
6.20. Fe _{0,5} -Ti-Ni kompozit numunesinin termal iletkenlik ile Young modülü grafiği	86
6.21. Fe _{0,6} -Ti-Ni kompozit numunesinin termal iletkenlik ile Young modülü grafiği	86
6.22. Fe _{0,7} -Ti-Ni kompozit numunesinin termal iletkenlik ile Young modülü grafiği	87
6.23. Fe _{0,8} -Ti-Ni kompozit numunesinin termal iletkenlik ile Young modülü grafiği	87
6.24. Fe _{0,9} -Ti-Ni kompozit numunesinin termal iletkenlik ile Young modülü grafiği	88
6.25. WC _x Co _{3(1-x)/4} Ni _{(1-x)/4} kompozit numunesinin yüzde oranlarının ultrases (a) boyuna ve (b) enine hıza olan grafiği	90
6.26. WC _x Co _{(1-x)/2} Ni _{(1-x)/2} kompozit numunesinin yüzde oranlarının ultrases (a) boyuna ve (b) enine hıza olan grafiği	91
6.27. WC _x Co _{(1-x)/4} Ni _{3(1-x)/4} kompozit numunesinin yüzde oranlarının ultrases (a) boyuna ve (b) enine hıza olan grafiği	92
6.28. WC _{0,5} -Co-Ni kompozit numunesinin termal iletkenlik ile Young modülü grafiği	93
6.29. WC _{0,6} -Co-Ni kompozit numunesinin termal iletkenlik ile Young modülü grafiği	93
6.30. WC _{0,7} -Co-Ni kompozit numunesinin termal iletkenlik ile Young modülü grafiği	94
6.31. WC _{0,8} -Co-Ni kompozit numunesinin termal iletkenlik ile Young modülü grafiği	94
6.32. WC _{0,9} -Co-Ni kompozit numunesinin termal iletkenlik ile Young modülü grafiği	95

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
6.33. $WC_xCo_{3(1-x)/4}Ti_{(1-x)/4}$ kompozit numunesinin yüzde oranlarının ultrases (a) boyuna ve (b) enine hıza olan grafiği	97
6.34. $WC_xCo_{(1-x)/2}Ti_{(1-x)/2}$ kompozit numunesinin yüzde oranlarının ultrases (a) boyuna ve (b) enine hıza olan grafiği	98
6.35. $WC_xCo_{(1-x)/4}Ti_{3(1-x)/4}$ kompozit numunesinin yüzde oranlarının ultrases (a) boyuna ve (b) enine hıza olan grafiği	99
6.36. $WC_{0.6}-Co-Ti$ kompozit numunesinin termal iletkenlik ile Young modülü grafiği	99
6.37. $WC_{0.7}-Co-Ti$ kompozit numunesinin termal iletkenlik ile Young modülü grafiği	100
6.38. $WC_{0.8}-Co-Ti$ kompozit numunesinin termal iletkenlik ile Young modülü grafiği	100
6.39. $WC_xFe_{3(1-x)/4}Ti_{(1-x)/4}$ kompozit numunesinin yüzde oranlarının ultrases (a) boyuna ve (b) enine hıza olan grafiği	102
6.40. $WC_xFe_{(1-x)/2}Ti_{(1-x)/2}$ kompozit numunesinin yüzde oranlarının ultrases (a) boyuna ve (b) enine hıza olan grafiği	103
6.41. $WC_xFe_{(1-x)/4}Ti_{3(1-x)/4}$ kompozit numunesinin yüzde oranlarının ultrases (a) boyuna ve (b) enine hıza olan grafiği	104
6.42. $WC_{0.5}-Fe-Ti$ kompozit numunesinin termal iletkenlik ile Young modülü grafiği	105
6.43. $WC_{0.6}-Fe-Ti$ kompozit numunesinin termal iletkenlik ile Young modülü grafiği	105
6.44. $WC_{0.7}-Fe-Ti$ kompozit numunesinin termal iletkenlik ile Young modülü grafiği	106

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
5.1. Tungsten Karbür tozunun malzeme özellikleri.	51
5.2. Demir tozunun özellikleri.	51
5.3. Kobalt tozunun özellikleri.	52
5.4. Nikel tozunun özellikleri.	52
5.5. Krom tozunun özellikleri.	53
5.6. Titanyum tozunun özellikleri	53
6.1. Fe-Co-Ni kompozit numunesine ait ultrases hızları, elastik modülü, termal iletkenlik ve yoğunluk değerleri	68
6.2. Fe-Cr-Ni kompozit numunesine ait ultrases hızları, elastik modülü, termal iletkenlik ve yoğunluk değerleri	75
6.3. Fe-Ti-Ni kompozit numunesine ait ultrases hızları, elastik modülü, termal iletkenlik ve yoğunluk değerleri	81
6.4. WC-Co-Ni kompozit numunesine ait ultrases hızları, elastik modülü, termal iletkenlik ve yoğunluk değerleri	88
6.5. WC-Co-Ti kompozit numunesine ait ultrases hızları, elastik modülü, termal iletkenlik ve yoğunluk değerleri	95
6.6. WC-Fe-Ti kompozit numunesinin darbe-yankı ve daldırma tekniği ile elde edilen ultrases hızları, elastik modülü, termal iletkenlik ve yoğunluk değerleri	101

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
ω	: Ultrasonik frekans
τ	: Termal fonon genleşme süresi
E_r	: Bağlı çekme modülü
k_r	: Bağlı termal iletkenlik
\vec{k}	: Dalga vektörü
a	: Örgü sabiti
v_p	: Faz hızı
v_g	: Grup hızı
m_1, m_2	: Atom kütleleri
ξ	: Yay ve zincir titreşimlerinin genliği
V	: Kristalin hacmi
$g(\rho)$: Durum yoğunluğu
\hbar	: Planck sabiti
κ	: Termal iletkenlik
Q	: Isı
A	: Kesit alanı
L	: Uzaklık
σ	: Gerilim (Stress)
τ_E	: Elektronların enerji gevşeme süresi
C_e	: Elektronların hacimsel öz ısısı
L	: Lorentz sayısı
ε	: Gerinim (strain)
ρ	: Yoğunluk kütlesi
τ_{kl}	: Gerilim tensörü
ε_{ij}	: Gerinim tensörü
$C_{kl ij}$: Elastik tensörü
λ	: Dalga boyu, Lamé sabiti

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

μ	:	Lamé sabiti
ν	:	Poisson oranı
E	:	Young modülü
V_L	:	Boyuna dalga hızı
V_T	:	Enine dalga hızı
B	:	Hacim (Bulk) modülü
G	:	Kayma (Shear) modülü
α	:	Yutulma (Attenuation) katsayısı
E_0	:	Termal enerji yoğunluğu
d	:	Dalganın aldığı yol, kalınlık
t	:	İletim süresi
V_w	:	Sudaki ses hızı
$^{\circ}\text{C}$:	Santigrad derece
K	:	Kelvin

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Kısaltmalar</u>	<u>Acıklama</u>
NDT	: Tahribatsız Muayene Testi (Non-destructive Testing)
DT	: Destructive Testing, Tahribatlı Muayene Testi
NDE	: Tahribatsız Muayene Hesaplaması (Non-destructive Evaluation)
3W	: Termal özellik test sistemi
rf	: Radyo frekans
3-D	: Üç boyutlu
UDM	: Ultrasonik Doppler yöntemi
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
EMT	: Etkin ortam teorisi
3N	: Örgü kiplenim sayısı
fcc	: Yüzey merkezli kübik
bcc	: Cisim merkezli kübik
DSC	: Diferansiyel Taramalı Kalorimetri
MHz	: Megahertz
T/R	: Alıcı/verici

BÖLÜM 1

GİRİŞ

XX. yüzyılın sonlarında bilim ve teknolojinin hızla gelişmesi, ilerlemesi ve yeni tekniklerin ortaya çıkması sanayinin temel yapısı olan malzeme ve malzeme biliminde de gelişmelerin hızlanmasına sebep olmuştur. Dolayısıyla bilim ve teknolojinin hızla ilerlemesiyle havacılık, uzay ve otomotiv endüstrilerinde, medikal, spor ve diğer alanlarda kullanılmaya başlanan hafif, aynı zamanda üstün özelliklere sahip yeni malzemelere ihtiyaç hızla artmıştır. Bu üstün özellikleri elde etmek amacıyla birbirlerinin zayıf yönünü düzelterek bir araya getirilmiş değişik malzemelerden veya fazlardan oluşan sistemlere kompozit malzeme denir. Kompozit malzemeler; standart, hafif ve yüksek mukavemet özellikli malzemelere daha hafif ve daha yüksek mukavemet alternatifi getirmesi, esneklik, iyi korozyon – aşınma dirençleri, uzun yorulma ömürleri ve düşük ısı iletkenlikleri ile birçok uygulama alanında geleneksel malzemelere oranla üstünlük sağlamaktadırlar. Bu üstün özelliklerinden dolayı yalnız malzemecilerin değil makina, tekstil, kimya, biyoloji, tıp ve fizik gibi değişik alanlarda çalışanların da ilgisini çeken malzemelerdir. Bununla birlikte gelişen teknoloji ile yeni kullanım alanları için farklı özellikteki malzeme ihtiyacını karşılamak amacıyla kompozit malzeme özelliklerinin de iyileştirilmesi gerekmektedir. Kompozitlerin özelliklerini geliştirmenin en önemli yollarından birisi ise ilave edilen katkı malzemeleri ile yapılan değişimlerdir. Bu yapı değişimleri incelemenin tahribatlı ve tahribatsız birçok yolu mevcuttur. Tahribatlı malzeme analizleri, malzemeye zarar vermesi, uzun zaman alması, her malzemedeki kullanılmaması ve ekonomik olmamasından dolayı zorunlu şartlar dışında genellikle tercih edilmemektedir. Bunun yerine daha ucuz, daha ekonomik ve kısa sürede sonuç veren, numuneye zarar vermeyen tahribatsız muayene yöntemleri tercih edilmektedir. Tahribatsız muayene yöntemlerinden ise en çok tercih edileni “Ultrasonik Test” tekniğidir.

Ultrasonik test, malzeme karakterizasyonunun ve kalitesinin belirlenmesinin yanı sıra kimyasal reaksiyonların hızlandırılması, sert maddelerin işlenip delinmesi, metallerin ince toz haline getirilmesi, vb. birçok farklı alanda kullanılmaktadır.

Kullanılan ultrasonik ölçüm yöntemleri değişik boyutlardaki numunelerin fiziksel özelliklerini karakterize eden esneklik modülleri gibi en önemli parametrelerinin hızlı ve hatasız olarak ölçülebilmesine olanak tanımaktadır. Bu parametreler malzemelerin en önemli fiziksel ve mekanik özelliklerinin yanında aynı zamanda onların yapısı hakkında da bilgi vermektedir. Malzeme özelliklerinin ultrases yerine mekanik yöntemlerle incelenmesi durumunda malzemenin içyapısında ve özelliklerinde değişimin oluşmasına sebebiyet verir ki bu da malzemeye uygulanan yüksek mekaniksel gerilme değerleri ve oldukça büyük gerilmelerden kaynaklanan etkilerin bir sonucudur. Bütün bunlar deneysel verilerin yorumlanmasını zorlaştırmakta ve doğru olup olmadığı belirlenemeyen sonuçlar vermektedir.

Bu çalışmada, seramik tabanlı kompozit numuneleri hazırlamak için WC tozu, metal tabanlı kompozit numuneleri hazırlamak için ise Fe tozu taban malzemesi olarak ve bağlayıcı faz olarak Fe, Co, Ni, Cr ve Ti tozları kullanılmıştır.

Yapılan bu tez çalışması yedi bölümden oluşmaktadır. Tezin birinci bölümünde, ultrases ile ve yapılan çalışma ile ilgili temel bilgiler verilmiştir. İkinci bölümde ise ultrases, ultrasesin malzeme analizinde, test yöntemlerinde, elastik ve termal iletkenlik ile ilgili kullanımları hakkında literatürde yapılan çalışmalar ifade edilmiştir. Üçüncü ve dördüncü bölümlerde ise yapılan çalışma ile ilgili olan temel konulara değinilmiştir. Beşinci bölümde ise numunelerin oluşturulması, kullanılan cihazlar, yöntemler ve deneysel işlemler hakkında bilgi verilmiştir. Altıncı bölümde ise çalışmada elde edilen bulgular, grafikler, çizelgeler verilerek sonuçları tartışılmıştır. Yedinci bölümde ise çalışmadan elde edilen sonuçlar kısaca özetlenerek, çalışmanın amacı belirtilip çeşitli önerilerde bulunulmuştur.

BÖLÜM 2

LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2. 1. Ultrases

Bilimin diğer dallarında olduğu gibi akustik alanındaki çeşitli gelişmeler deneysel çalışmalar öncesinde gözlemlenmiştir. Eski Mısır, Suriye ve Babil’de sesin doğal yapısı hakkındaki bilgilerin az olduğu bilinmesine rağmen uzun mesafelerde ses sinyallerinin nasıl yayıldığı biliniyordu. Günümüzde titreşim frekansı, duyulabilir ses aralığının her iki sınırının ötesine uzanırken uygun elektronik cihazlar ses dalgalarının araştırılması veya bulunması için kullanılmakta ve böylece çalışma frekans aralığının oldukça genişletilmesine sebep olmuştur.

Galileo 1581 yılında tavadan sallanan bir lambanın salınımlarını gözlemleyerek, bir tam salınım için geçen sürenin, salınımın genliği ne olursa olsun hep aynı kaldığını deneysel olarak doğrulamıştır (Aygün, 2006). Galileo’nun yapmış olduğu çalışmaları dikkate alan Mersenne, 1636’da ilk ses hızı çalışmalarını yapmıştır (Gruber, 1970). XIX. yüzyılın ilk önemli ilerlemesi, titreşen cisimlerin dalga modellerinin belirlenmesinde 1787 yılında Chladni’nin yapmış olduğu çalışmadır (Aydoğan, 2006). Violin yayının yardımıyla üstü kumla kaplı bir kare levhanın kenarlarına vurularak titreştirilmesiyle armoni değerine sahip sesler çıkardığında, düzgün görüntüler elde ettiğini keşfettiği bu evrensel şekiller daha sonra ismiyle Chladni desenleri olarak anılmıştır. 1810-1830 yılları arasında Young, Fresnel, Fourier, Poisson, Laplace ve diğerleri elastik ve termal dalgaların yayılım teorilerini geliştirdiler. 1858-1862 yılları arasında Koenig, özellikle Scott’un osilografını (salınımölçer) geliştirmeye kendini adanmıştır (Greenslade, 1992).

Klasik akustiğin farklı dallarının birleştirilmesinin en önemli dönemi 1870-1880 yılları arasında olmuştur. Bir ses dalgasının dayanıklılığının belirlenmesi için optiksel bir yöntem ilk olarak 1820 yılında Biot tarafından tanımlanmıştır ve 1864’te Kundt ve 1872’de Mach tarafından geliştirilmiştir (Macleki, 1969; Koç, 1992). 1870 yılında

Toepler ve Boltzman tarafından ikinci bir optiksel yöntem tasarlanmış olup, duyulabilirlik için gerekli olan minimum ses genliği ve yoğunluğu ile yakından ilgili olan sorunlar ilk kez incelenmiştir (Toepler and Boltzman, 1870). XIX. yüzyılın başlıca gelişmeleri, akustik biliminin dört durumunu içermektedir; ses hızının ölçülmesi, frekansın belirlenmesi, parçacık hızının belirlenmesi ve ses tınısının gözlemlenmesi (Beyer, 1999).

Ultrasesin temeli olan piezoelektrik etkinin ilk ispatı Curie kardeşler tarafından 1880 yılında yapılmıştır (Curie and Curie, 1880). Ancak Curie kardeşler, ters piezoelektrik etki üzerinde çalışmamışlardır. Ters etki, temel termodinamik prensiplerden yola çıkılarak Lippmann tarafından matematiksel olarak gösterilmiştir (Lippmann, 1881). Bunun üzerine ters etkinin varlığını gözlemleyen Curie kardeşler, piezoelektrik kristallerde elektro-elasto-mekanik deformasyonlarının terslenebilirliğinin ölçülebilir ispatını yaparak yollarına devam etmişlerdir.

İkinci Dünya savaşında su altı nesnelere tanımlamak için alınan ekoları incelemekte kullanılan sonar aleti ve tıbbi tanı kavramını uygulamak için çeşitli yollar bulmaya çalışan araştırmacılar ultrases'ten yararlanmışlardır (ASM Handbook 17, 1989). Fransız fizikçi Langevin, 1914 yılında ultrases dalgalarından faydalanarak ultrases alıcı-verici sistemini geliştirmiş ve su altında yüksek frekanslı ultrases atmaları yollayıp bu dalgaların doğrusal olarak ilerlediğini ve gönderilmiş olan yüksek frekanslı ultrases atmalarının bir cisme çarptığında geri döndüğünü gözlemlemiştir (Shuyu, 1995). 1929 ve 1935'te Sokolov, metal nesnelere ultrases dalgalarının kullanımını üzerine çalışmalar yapmıştır ve malzeme yapısının ultrases ile incelenmesinin öncüsü olmuştur (Graff, 1982).

İkinci Dünya savaşından kısa bir süre sonra Japonya'daki araştırmacılar ultrasesin tıbbi teşhisine yönelik kabiliyetini keşfetmeye başlamalarına rağmen 1950 yılına kadar Japonya'daki ultrases çalışmaları, Amerika Birleşik Devletleri ve Avrupa'dakine nazaran pek bilinmemektedir. Yine bu yıllarda Ludwig ve Struthers, ultrases dalgalarının yardımıyla farklı dokulardaki yoğunluk ve ses hız ölçümleri ile yumuşak dokulardan görüntü elde etmişlerdir (Rantanen, 1986). Daha sonra

araştırmacılar safra kesesi taşları, meme kitleleri ve tümörleri tespit etmek için kullanılan ultrason ile ilgili elde ettikleri bulguları sunmuşlardır. Aynı zamanda Japonya, 1957 yılında Satomura tarafından kardiyovasküler araştırma için kalp boyunca dolaşan kan gibi vücut içinde hareket eden nesnelere tespit etmek için ultrasesin bir uygulaması olan Doppler ultrasonu uygulayan ilk ülkedir (ASM Handbook 17, 1989). 1969 yılında Viyana'da dünyada ilk kez uluslararası "Tıpta Ultrasonla Tanı Yöntemi" isimli bir kongre düzenlenmiş ve 1974 yılında İngiltere'de Barnett ve Morley tarafından ilk ultrasonografi kitabı yayınlanmıştır (Barnett and Morley, 1974). 1981 yılında Finlandiyalı doktor Jouppila ve arkadaşları, bebeklerin kordonundaki toplardamar kan akışının gelişme geriliği olduğu durumlarda bozulduğunu ultrasesi kullanarak bulmuştur (Jouppila et al., 1981). İngiltere'de 1982 yılında Campbell ve Griffin benzer ölçümleri bu kez bebeklerin kordonlarındaki atardamarlar üzerinde yapmıştır (Griffin et al., 1983).

O'Brien ve arkadaşları tarafından 1995 yılında ultrases dalgalarının yayılma özelliklerinin ortaya çıkarılmasıyla kalp kasının morfolojik ve kimyasal olarak belirlenmesi ilk defa yapılmıştır (O'Brien et al., 1975). 1999 yılında Töyräs ve arkadaşları, 2000 yılında ise Miller ve Bamber tarafından ultrases dalgalarının frekansı yükseltilerek daha iyi bir ultrason görüntüsü elde edilmiştir (Töyras et al., 1999; Miller and Bamber, 2000).

Yagel ve arkadaşları tarafından 2009 yılında yapılan çalışmada fetomaternalda üç ve dört boyutlu ultrason uygulamaları incelenmiştir (Yagel, et. al., 2009). Günümüzde yapılan birçok çalışma ile 4 boyutlu cihazlarda ise çekim sırasında 3 boyutlu resim elde edilmeye yani anne karnındaki bebeğin 3 boyutlu görüntüsünü hareket halindeyken kaydedilmesine ve fetus sağlığı ile ilgili olarak MR'dan farksız bilgi elde edilmesiyle teşhiste yeni bir dönemin başlamış olduğu kanıtlanmıştır.

2. 2. Ultrases Malzeme Analizi

Malzeme karakterizasyon tekniğinin iki önemli sınıflandırması tahribatsız test (NDT) ve tahribatlı test (DT)'dir. Test edilen malzeme veya ürün, tahribatlı test tekniği

ile karakterizasyonunda (çekme testi, sünme testi, darbe testi, burulma testi, sertlik testi vb. gibi) tekrar kullanılamaz; genellikle bu test tipinde zarar görür. Tahribatsız test tekniği ise malzemenin hizmet yeteneği yönünden özel bir yöntemdir (tekrar kullanılabilirliği ve çalışma esnasında test edilebilirliği) ve numuneler, test işlemi sırasında zarar görmez. Görsel test, sıvı toksin giderici test, manyetik parçacık testi, eddy akım testi, radyografik test, ultrasonik test, sızdırmazlık testi, termografi ve nötron radyografi gibi çeşitli yöntemler malzeme karakterizasyonunun bilinen NDT teknikleridir (Pandey and Pandey, 2010).

Ultrasonik Test, malzeme özelliklerinin karakterizasyonu için en çok tercih edilen NDT tekniğidir. Ultrasonik test parametreleri malzemelerin mikroyapı ve fiziksel özelliklerindeki değişikliklerden önemli şekilde etkilenir. Elektronikteki gelişmeyle bu parametreler güvenli bir şekilde çeşitli malzeme özellikleri ile korelasyonunu çok doğru ölçülebilmektedir. Ultrasonik test parametreleri ile ilişkili olan önemli metalürjik özelliklerin bazıları; tane boyutu, konsantrasyon miktarı, elastik modülü, sertlik, kırılma tokluğu, akma mukavemeti ve çekme mukavemetidir. Ultrasonik malzeme karakterizasyonu; çökeltme sertliği, durum sertliği vb. gibi çeşitli işletim davranışlarını nitelendirmek için ve aynı zamanda da yorulma, sünme, korozyon, hidrojen hasar vb. gibi çeşitli bozunma mekanizmaları nedeniyle hasarı değerlendirmek için kullanılmaktadır.

Ultrasonik biliminin kurucusu sayılan ve 1904 yılında Nobel fizik ödülü kazanan Lord Rayleigh'in elastik dalga yayılmasının temeli olan akustik ve optik alanında birçok keşfi olmuştur (Rayleigh, 1899). Deneysel fiziğin sistematik kurallarını geliştirerek fiziğin bütün alanlarını kapsayan çalışmalar yapmıştır. Rayleigh'in yazmış olduğu iki cilt olarak yayımlanan "The Theory of Sound" akustik literatürün en büyük eserlerinden biridir. Rus bilim adamı Sokolov 1929 ve 1935 yıllarında, üretilen malzemelerdeki hatalar, çatlak ve kırıklar gibi kusurların bulunmasında ultrasesin kullanılabileceğini göstermiştir. 1931 yılında Mulhauser katı madde içindeki hatanın tespiti için iki problu sistemin kullanılabileceğini göstermiştir (Graff, 1982).

Ultras ses ile malzeme karakterizasyonunda dalga hızı ve yutulma ölçümleri ile yapılan çalışmalar 1947 yılında Mason ve McSkimin tarafından başlamıştır (Mason and McSkimin, 1947). Roderick ve Truell ise yutulma metodunu kullanarak ultras ses yardımıyla tanecik boyutunu 1952 yılında belirlemişlerdir (Roderick and Truell, 1952). Bu çalışmayı kullanarak, alıcı transdüserden gelen bilgileri değerlendirerek tanecik boyutunu belirlemeyi Hilliard (1963) ve Aldrige (1969) geliştirmiş ve daha sonra teorik açıklamasını Papadakis (1965) yapmıştır. Geri-saçılma (back-scatterer) tekniğini kullanarak tanecik boyutunun belirlenmesinin ilk deneysel çalışması Beecham (1966) tarafından yapılmıştır. Bununla ilgili teorik çalışma Fay ve ark. (1976) tarafından gerçekleştirilmiş, değişik yapılara uygulanması ise Goebbels ve Höller (1976) tarafından yapılmıştır.

1982 yılında Hirsekorn, ultras ses ile tanecik boyutu belirleme çalışmalarını farklı yönelimli, eşit boyutlu taneciklerin oluşturduğu polikristalleri düşünerek bunların içinde elastik dalgaların yayılımını esas alan çalışmalar yapmıştır. Katı malzemelerin sertlik, kırılma dayanımı, çekme dayanımı gibi özellikleriyle dalga hızı ve yutulma arasındaki ilişkilerini Vary (1980) açıklamıştır. Saniie ve Bilgutay 1986 yılında ultras ses dalgasının madde içinde tüm tanecikler ile etkileştiğini varsayarak tanecik boyutunun belirlenmesi için difüz alanlarının kullanımını amaçlamışlardır. Thorsos (1988) ve Wirgin (1989) tarafından açıklanan Kirchoff yaklaşım teorisi kullanılarak sert-katı yüzeylerden saçılan ultras ses dalgalarının birinci ve ikinci mertebeden simülasyonu Embrechts (2000) tarafından yapılmıştır. Nicoletti et al (1990) yutulma metoduyla tanecik boyutunun belirlenmesi konusunda daha önce iki transducer kullanılarak yapılan deneyleri, bir transducer kullanarak yapmış ve deneylerin teorik sonuçlarını karşılaştırmıştır. 1992 yılında Yoon ve Rammabdran (1992), 1996 yılında Bridge ve Merikh (1996) metal alaşımlarda ısıl iyileştirme ile tanecik boyutunun değişimleri, geri-saçılma tekniği ile araştırılmıştır. Sturges et al (1991), Bashyam ve Rose (1992) seramik numunelerde malzeme karakterizasyonu ile ilgili olarak tanecik boyutu, sertlik gibi fiziksel özelliklerin tespitini yapmışlardır. Ultras ses dalgalarını kullanarak Kruger et al (1998) ve Bonnin et al (2000) demir ve kâğıt numunelerde malzeme karakterizasyonu çalışmalarını yapmışlardır. Alüminyum numunelerin elastik sabitelerini ve malzeme dayanımı özelliklerini ultras ses tekniğini kullanarak Schneider (1998) tarafından 1998

yılında araştırılmıştır. Bu çalışmada gerilim dayanımı eddy akımı tekniği ile belirlenerek ultrases dalgası geçiş zamanı tekniği ile belirlenen elastik sabiteleri arasındaki ilişki açıklanmıştır. Aynı yılda Anderson ve Brown (1998), darbe-yankı tekniğini kullanarak malzeme içindeki ultrases dalgasının hızının hesaplanması için bir yöntem geliştirerek bunun malzeme karakterizasyonunda kullanılmasını açıklamışlardır. 1999 yılında Bernabé et al. (1999) ise ince filmlerin elastik sabitelerinin yüzey akustik dalgalarını kullanarak belirlemiştir.

Lianga ve Wu (2002), tek boyutlu dalga denklemi yardımıyla ultrasonik test yöntemi için eksponansiyel form ile deneysel formül kullanarak betonun basınç dayanımını teoriksel olarak açıklamışlardır. Hamouda ve arkadaşları (2007), kuartz katkılı alüminyum-silisyum matris kompozitlerin özelliklerini ve uygulamalarını araştırıp tanımlamışlardır.

2. 3. Ultrases Test Yöntemleri

Ultrasonik test yöntemlerinde kullanılan cihazların birçok çeşidi vardır. Her bir cihazın en önemli parçası, ultrasonik dalga üretmek ve almak için kullanılan bir piezoelektrik element içeren transdüserdir. Özel amaçlar için tasarlanan transdüserlerin hassasiyeti ve doğruluğu, sistemin maliyetini arttırmaktadır. Çeşitli amaçlar için kullanılan birçok farklı ultrases ölçüm teknikleri vardır.

Mulhauser, Firestone ve Simons (1930-1950) ultrasonik dalgalar kullanarak ölçüm yöntemlerinin ve ultrases testinin oluşmasına öncü olmuşlardır. Papadakis, darbe-yankı tekniği, darbe-yankı çakışma tekniği ve darbe üst üste binme tekniğini kullanarak katı içindeki kayıpları, faz değişimlerini, kırınım kayıplarını, ultrasonik özellikleri incelemek adına bu yöntemleri geliştirip çalışmalar yapmıştır (Papadakis, 1959, 1966, 1967, 1971, 1972).

McSkimin ve Andreatch tek transdüser ile darbe yankı sisteminde faz hızı ölçümleri için radyo-frekans (rf) yankılarının bire bir eşleştirmesini veren üst üste

binme yöntemi üzerine çalışmalar yapmışlardır (McSkimin, 1961; McSkimin and Andreatch, 1962). McSkimin hesaplaması, Papadakis'in oluşturmuş olduğu darbe-yankı çakışma yöntemindeki yankı çiftlerine doğrudan uygulanabilir. Packman ve arkadaşları (1969), yorulma çatlaklarını belirlemek için x-ışınları, manyetik-parçacık muayene, penetrant muayene ve ultrasonik muayene gibi bu dört tahribatsız testi geliştirmek için çalışmışlar ve birbirileri ile karşılaştırmışlardır. 1987 yılında Ohozama ve arkadaşları (1987) ultrasonik yöntemle yüzey akışını bulmuşlardır. Chimenti ve Nayfeh, 1985 ve 1988 yıllarında zayıf bir Lamb dalgası deneysel tekniğini kullanarak cam fiber, epoksi laminant tabakalarda ultrasonik faz hızı ölçümlerini araştırmışlardır (Chimenti and Nayfeh, 1985; Nayfeh and Chimenti, 1988). Mase ve arkadaşları (1990) malzemenin yapısına uygulanan gerilimin etkisini belirlemeye çalışmışlardır. Yapmış oldukları çalışmada, boyuna ve enine dalga hızlarının değişiminde gerilim altındaki bir malzemenin deformasyon oluşumunun etkisini incelemişlerdir. Nayfeh ve Taylor (1990), ultrasonik dalgaların gönderildiği çok tabakalı ortam içindeki gerilimler ve yer değiştirmelerin hesaplanması için daldırma tekniğini kullanmışlardır. 1978 yılında Sachse ve Pao (1978), homojen olmayan malzemelerin faz hızını ölçmek için darbeli sinyal faz spektral analiz yöntemi geliştirdi. Ayrıca aynı yılda güçlü dağılım dalgaları için sürekli dalganın faz kıyaslama tekniği Ting ve Sachse (1978) tarafından açıklanmıştır.

Ultrasonik uzaklık ölçümlerinde yüksek doğruluk elde etmek için dijital sinyal işleme teknikleri 2001 yılında Andria ve arkadaşları tarafından kullanılmaya başlanmıştır. Murakawa ve arkadaşları (2005) yaptıkları çalışmada çok fazlı akış ölçümleri için yeni bir teknik tasarlamış olup ve bu tekniğin ultrasonik Doppler yöntemini (UDM) temel aldığını belirtmişlerdir. Raišutis ve arkadaşlarının (2007) yapmış oldukları çalışmanın amacı darbe-yankı tekniği ile elde edilen elektronik parçaların ultrasonik görüntülerinin kalitesini arttırmaktır.

Loosvelt ve Lasaygues (2011), saf iletim modunda sadece tek kazanım kullanarak numunenin kalınlığına karşı hem dalga yolunun hem de hızının bağımsız ve aynı anda belirlenmesi için bir metot geliştirmeyi amaçlamışlardır. 2012 yılında Robin ve arkadaşları (2012) zaman içinde değişen lineer ortam özelliklerini (faz hızı ve

zayıflama) izlemek için darbe-yankı yöntemini temel alan bir gerçek zamanlı ultrases yöntemini kullanmışlardır. Ayrıca yine aynı yılda Zhang ve arkadaşları aralıklı sinyal simgeleme yöntemini NDE uygulamalarında kullanılabileceğini göstermişlerdir.

Zaman içinde ihtiyaçlara, uygulanan malzemeye, hassasiyetine, pahalı ve ucuz olup olmamasına bağlı olarak yöntem çeşitleri artmıştır. Günümüzde darbe-yankı çakışma, darbe iletim ve darbe üst üste binme teknikleri doğru ve güvenilir sonuçlar verdiklerinden dolayı en çok kullanılan tekniklerdir.

2. 4. Elastik ve Termal Özellikler

Elastisite (esneklik), 1600'lü yıllarda Hooke ve Galileo'ya dayanan deneysel kaynaklar ile oluşturulmuş olan matematiksel bir teoridir. XVII. yüzyılın sonlarına doğru İngiltere'de Hooke ve Fransa'da Marotte yapmış oldukları deneysel çalışmalar boyunca gerilim ve gerinim orantılılığını bağımsız olarak keşfetmişlerdir. Navier (1821), elastisitenin genel denklemlerini ilk keşfeden kişi olarak bilinmektedir. Kuvvetin merkezi olarak materyal noktalarını kabul eden Navier yaklaşımı ve kristal cisimler üzerinde Poisson ve Cauchy'nin benzer yaklaşımları, izotropik cisimlerde sadece tek sabit içeren elastik denklemlerle sonuçlanmıştır. Navier tarafından bulunan denklemler, 1822 yılında Cauchy (1822) tarafından geliştirilen elastisite (elastiklik) denklemlerinin özel bir durumunu içerir ve daha sonra enerjinin korunum ilkesi kullanılarak bağımsız olarak Stokes ve Green tarafından türetilmiştir. Stokes, kayma (sadece biçimdeki değişim) ve basınç (sadece hacimdeki değişim) değerlerine karşı elastik bir cismin eğilimini farklı sabitlere dayandırmıştır (Hazewinkel, 2001). 1807 yılında Young kayma ve daralma ile elastik cisimlerin bu özelliklerini ilk yorumlayan ve materyalin elastiklik modülünü ilk tanımlayan kişi olmuştur (Schenck, 1999).

1930'lardan itibaren elastisitenin matematiksel teorisi çoğu dünyaca ünlü bilim adamları tarafından geniş bir araştırma konusu haline gelmiştir. Malzeme özelliklerine bağlı olarak birçok matematiksel model geliştirilmiştir. Herhangi bir kristalin tam şekli, boyutu, yönelimi ve konumu bilinirse tanecik sınırlarındaki sınır şartları kesinlikle

dikkate alınmış olmalı ve bu durumda polikristal özelliklerin kolayca hesaplanabileceği görülmüştür. Bazı istatistiksel varsayımlar polikristalin elastik sabitleri için çeşitli tahmini modellerin oluşmasına sebebiyet vermiştir. İlk olarak, Voight (1928) modelinde polikristal boyunca sabit gerininin olduğu varsayılırsa Reuss (1929) modelinde ise sabit gerilimin olduğu varsayılmıştır. Mikroyapı hakkında hiçbir şey bilinmeden Hill (1952) yaklaşımında bu varsayımların her ikisinin ortalamasının alınabileceği sunulmuştur. Bu yaklaşım teorik olarak yeterlidir ve uyum göstermiştir; fakat teoriksel olarak çok daha tatmin edici bir model Kröner (1958) tarafından geliştirilmiştir.

1982-1990 yılları arasında Hirsekorn polikristal malzemelerin elastik özelliklerinin, kristalin tek boyutlu elastik sabitine bağlı olduğunu ve bununla ilgili önemli teoriler ve metotlar geliştirmiş olup ultrasonik hız ve tane boyut ilişkisini açıklamıştır (Hirsekorn, 1990). Li ve Thompson (1990) ortotropik (üç ortogonal simetri düzlemlerine sahip olan sürekli bir ortam) tabakaların dağılım karakteristiklerini incelemişlerdir. Periyodik bir lamine edilmiş tabakadaki Lamb dalgalarının dağılımı Shull ve arkadaşları tarafından 1994 yılında incelenmiş ve dağılım davranışlarındaki boşlukların ve kümelenmelerin özelliklerini bulmuşlardır. Enine izotropik silindirden akustik saçılma son zamanlarda Ahmad ve Rahman (2000) tarafından incelenmiştir. Yang (2003), Aggelis ve arkadaşları (2004), küresel elastik bir ortamda yayılan etkin düzlem dalgalarının zayıflaması ve dağılımı için çeşitli yaklaşım teorileri içeren çalışmalar yapmışlardır.

Katıların termal iletkenliklerinin deneysel ölçüm çalışmaları XVIII. yüzyılda başlamıştır. 1753 yılında Franklin farklı maddeleri sıcaklık derecelerine göre ve ısı yönünden zayıf ya da güçlü olarak değerlendirmiştir. Franklin'in kararlı durum ölçüm yöntemi ile ilgili yapmış olduğu çalışmaları geliştirerek devam ettiren Ingen-Hausz (1789) ve Despretz (1822)'dir. 1822 yılında Frouier (1822) tarafından “Theorie Analytique de la Chaleur” (Isınmanın Analitik Teorisi) de sıcaklık değişimi ve ısı akış oranı ile ilgili olarak incelemeler yapılmıştır. Despretz'in kullanmış olduğu bu yöntem Wiedeman ve Franz tarafından 1853 yılında bazı metallerin termal iletkenliklerinin bulunmasında kullanılmış ve Wiedemann-Franz kanunu (1853) olarak adlandırılmıştır.

Forbes (1851) ilk kararlı hal yöntemini ve Angström (1861) ilk kararsız hal yöntemini kullanmıştır.

Ladd ve arkadaşları 1986 yılında yaptıkları çalışmalarda anharmonik pertürbasyon teorisi ile ve moleküler dinamikler ile ve periyodik sınırlar ile 108-, 256-, ve 864- parçacıklı klasik kristallerin bütün fonon durumlarının yarı-ömürlerini hesaplamışlardır (Ladd et al., 1986). Daha sonra bu yarı-ömürleri, termal iletkenliği tahmin etmek için kullanmışlardır. McIvor ve arkadaşları (1990) enine eksen için termal iletkenlik değerinin eksenel kayma modülüne ve elastik modülüne bağlı olduğunu gözlemlemişlerdir. Hui ve arkadaşları (1998) sonlu elemanlar metodunu kullanarak seramik malzemelerin ısı iletkenlikleri için sayısal bir çalışma yapmışlardır. Chen ve arkadaşları (2000) sialon seramiklerinin içyapısını belirlemişlerdir ve bu belirlemeyi yaparken Taramalı Elektron Mikroskop (SEM) görüntülerini kullanmışlardır. Isıl iletkenliği üçlü nokta yaklaşımı ile hesaplamışlardır.

2002 yılında Yamada ve arkadaşları sinterlenmiş SiC katkılı malzemelerin ısı iletkenliğini sayısal ve deneysel olarak incelemişlerdir (Yamada, et al., 2002). Nakano ve arkadaşları (2004) ise SiC seramiklerin mikro yapıda ısı iletkenliğini deneysel olarak incelemişlerdir. Farklı malzemeler, farklı yöntemler kullanılarak hem elastik özelliklerle hem de termal iletkenlikle ilgili birçok çalışma yapılmıştır. Kristallerdeki ultrasonik yutulma genellikle fonon gevşeme süreçlerini içeren teoriler kullanılarak analiz edilmiştir. Bu gevşeme süreçleri aynı zamanda örgü termal iletkenliği için önemlidir. Holland (1968) hem yüksek sıcaklık ($\omega\tau < 1$) hem de düşük sıcaklık ($\omega\tau > 1$) bölgelerindeki ultrasonik özelliklerin belirlenmesinde termal iletkenlik ölçümlerinin önemini araştırmıştır. Lawless ve arkadaşları (1981) düşük sıcaklıklardaki $\text{KTa}_{0,988}\text{Nb}_{0,012}\text{O}_3$ numunesindeki öz ısı, termal iletkenlik ve ultrasonik verileri rapor etmişlerdir. 1995 yılında Davis ve Artz (1995) çalışmalarında metal matriks kompozitlerinin termal iletkenliğini tahmin etmek için etkin ortam teorisini (EMT) kullanarak bu teorinin geçerliliğini incelemişlerdir. Pohl ve arkadaşları (2002) çalışmalarında yaygın kullanılan amorf katılarda düşük enerji uyarımlarının olup olmadığını test etmek için akustik yutulma ve düşük sıcaklıklardaki termal iletkenlik değerinin bütün ölçümlerini 60 farklı bileşik için analiz etmişlerdir. Gadzhiev (2003),

ZnO tabanlı seramiklerde boyuna ve enine ultrasonik dalgaların yayılım hızını ve termal genleşme katsayısını, termal iletkenliğini %1,5'den %21'e kadar olan bir gözeneklilikle 300K'den 1200K'e kadar olan sıcaklık aralığında araştırmışlardır. Yaptıkları çalışmayla akustik dalgaların dağılımı, bağ enerjisi ve gözeneklilik ile saçılma sürecindeki termal titreşimin uyumsuzluk derecesini ve ısı transferinin doğal olgusunu analiz etmek için gözeneklilik ve sıcaklığın bir fonksiyonu olarak elastik ve termal özelliklerinin araştırmalarının yapılması mümkün olmuştur.

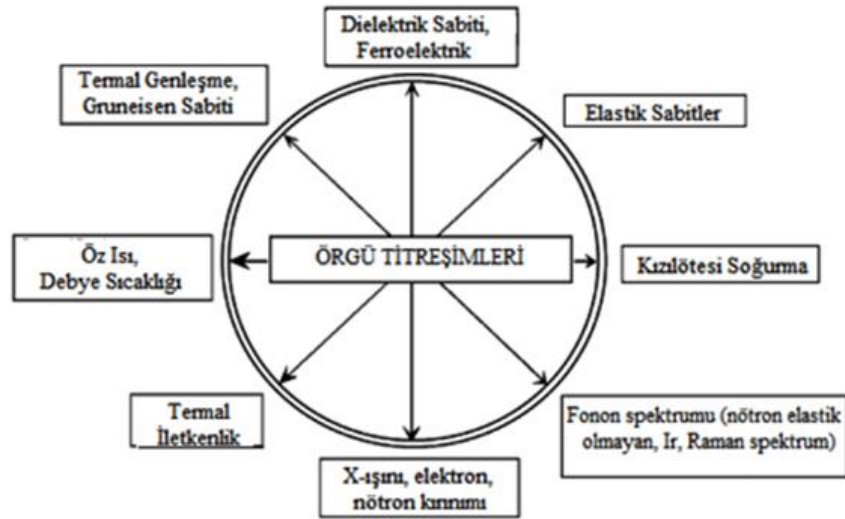
Elastik modülü ve termal iletkenlik mekanik deformasyonlar ve sıcaklık değişimleri ile bir malzeme tepkisini belirleyen temel özelliklerdir. Heterojen malzemelerdeki etkin özellikler, faz özelliklerindeki büyük farklılıklardan dolayı gözenekli malzemelerde malzemenin mikroyapısı ile belirlenmesine rağmen sadece hacim kesir bilgisini temel alan bu özelliklerin poroziteye olan bağlılığını tahmin etmek genellikle mümkün değildir. Pabst ve Gregorova (2007) izotropik malzeme için bağıl çekme modülü E_r 'nin veya bağıl termal iletkenlik k_r 'nin $3 \ln E_r = 4 \ln k_r$ ilişkisi ile diğerlerinden farklı bir şekilde hesaplanabileceğini göstermişlerdir.

Amirthan ve arkadaşları (2011), farklı sıcaklıklardaki Si/SiC seramik kompozitlerin termal iletkenliklerini lazer flash yöntemi ile ölçmüştür. Sonuçlar, serbest karbon ve boşlukların varlığının bu malzemelerin termal iletkenliklerini etkilediğini göstermektedir. Liao ve arkadaşları (2011) içi boş silis kürelerin termofiziksel özelliği deneysel test sistemi olan 3W yöntemi (termal özellik test sistemi), teorik hesaplama ve sonlu elemanlar simülasyon vasıtasıyla incelenmiştir.

BÖLÜM 3

ÖRGÜ TİTREŞİMLERİ

Bir örgü titreşiminin veya elastik dalgaların enerji kuantumuna *fonon* denir. Başka bir deyişle; bir kristal yapı periyodik bir örgüden ibaret olduğu için bir kristal içerisinde belirli bir atomun hareketi, boyuna yayılan bir dalga oluşturur. Bu dalga örgünün katı içerisinde titreşimine neden olur. Bu titreşim fonon olarak adlandırılmaktadır. Fonon teorisi, en çok katıhal olgusuyla açıklanır ki bu durum statik örgü teorisi ile açıklanamaz (Ashcroft and Mermin, 1976; Mathew, 2006).



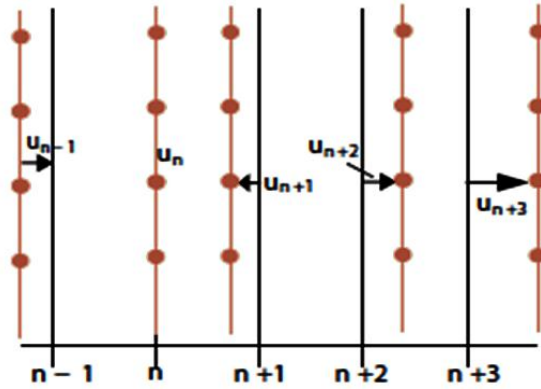
Şekil 3.1. Örgü titreşimleri ve fiziksel özellikler arasındaki karşılıklı ilişkiler (Sirdeshmukh, 2011).

Kristal yapıdaki bir katının karakteristik örgü titreşimleri, periyodik yerleşimli atomik yapıya sahip bir katı içerisindeki dalgaların yayılımını, örgü titreşimlerinin enerjilerini, yine bu titreşimlerin kuantumlanmış büyüklüklerini yani fononları veya atomlar arasında harmonik özellik taşımayan etkileşimlerin anlaşılmasında ve bunlara

açıklık getirilmesinde yol göstermiştir. Şekil 3.1’de örgü titreşimleri ile bu fiziksel özellikler arasındaki ilişki açıklanmıştır.

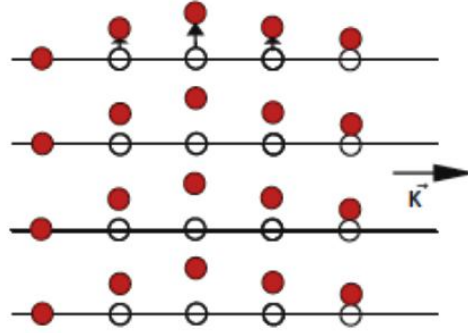
3. 1.Tek Atomlu Örgü Titreşimleri

Kristal bir yapı içindeki atomların hareketi ve atomların diğer komşu atomlarla olan etkileşimleri yüksek simetrisinin bir yönü boyunca bir basit kübik örgüde çok kolay bir şekilde açıklanabilmektedir. Birim hücrelerinde tek bir atom olan bir kristal ve bu kristalin elastik titreşimleri dikkate alınmaktadır. Örneğin, [100] yönünde örgü düzlemlerinin yer değiştirmesi dikkate alındığında bu doğrultulardan birisi boyunca dalga yayılıyor ise bu dalga, dalga vektörü doğrultusuna paralel veya düz olarak bütün atom düzlemleri boyunca hareket eder.



Şekil 3.2. Tek atomlu boyuna örgü titreşimleri (Wharam, 2008).

Noktalı çizgiler atom düzlemlerinin denge konumlarını, sürekli çizgiler de boyuna bir yer değiştirmeden sonraki konumları göstermektedir. Şekil 3.2, boyuna dalga için kolaylıkla anlaşılabilir; fakat enine uyarımlar için tek atomlu örgü titreşimleri açık bir şekilde Şekil 3.3’de gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Tek atomlu enine örgü titreşimleri (Wharam, 2008).

Varsayılan elastik kuvvetler lineerdir ve $\vec{F} = -k\vec{x}$ Hooke kanunu ile verilir. Herhangi bir u_n, u_m yer değiştirmelerinden kaynaklanan kuvvet

$$F_{nm} = -C_{nm}(u_n - u_m) \quad (3.1)$$

ile verilir. C , kuvvet sabiti olup enine ve boyuna titreşimler için farklı değerler alır. C sabiti düzlemin bir atomu için tanımlanırsa F_n 'de n düzleminde bir tek atom üzerindeki kuvvet olur. Sadece yakın komşuları düşünüldüğünde bir düzlem içindeki bir atoma etkiyen net kuvvet bulunur.

$$F_n = C(u_{n+1} - u_n) + C(u_{n-1} - u_n) \quad (3.2)$$

ve C 'nin doğrusal olduğu varsayılarak Newton'un ikinci kanunu;

$$M \frac{d^2 u_n}{dt^2} = C[u_{n+1} - u_{n-1} - 2u_n] \quad (3.3)$$

yazılırsa bir düzlem için hareketin denklemi (M , düzlemdeki bir atomun kütlesidir) elde edilir. Varsayılan bütün yer değiştirmeler, $\exp(-i\omega t)$ (normal kip) bağlı olan aynı frekansa sahiptir.

$$\Rightarrow -M\omega^2 u_n = C[u_{n+1} - u_{n-1} - 2u_n] \quad (3.4)$$

Bu diferansiyel denklem;

$$u_n = u \exp(inka) \quad (3.5)$$

ile doğrusal olarak derecelendirilmiş bir faz faktörü ile ve \vec{k} , dalga vektörü ile ilerleyen dalga çözümlerine sahiptir. Burada a , basit bir kübik örgüdeki örgü sabitidir. Bu yaklaşım, herhangi bir iki örgü düzlemleri arasında var olan uygun bir faz ilişkisinin anlaşılmasını kolaylaştırır. Böylece,

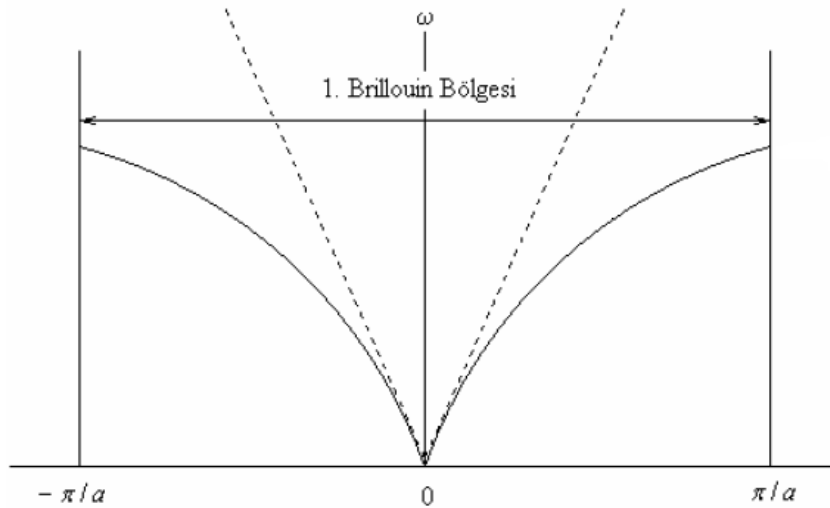
$$-\omega^2 M u \exp(inka) = Cu[\exp(i(n+1)ka) + \exp(i(n-1)ka) - 2\exp(inka)] \quad (3.6)$$

bulunur. $-\exp(ix) + \exp(-ix) = 2\cos(x)$ kosinüsün eksponansiyel tanımlaması kullanılarak sadeleştirmeler yapılabilir.

$$-\omega^2 M = 2C[1 - \cos(ka)] \quad (3.7)$$

$$\Rightarrow \omega^2 = \frac{4C}{M} \sin^2 \frac{ka}{2} \quad (3.8)$$

Burada trigonometrik dönüşümler kullanılmıştır. Bu, ω frekansı ve k dalga vektörünün elastik dalgası için dağılım ilişkisidir. Şekil 3.4'te çizgisel örgünün birinci Brillouin bölgesindeki dağıtkanlık bağıntısı göstermektedir.



Şekil 3.4. $-\pi/a \leq k \leq \pi/a$ aralığında $(4C/M)^{1/2}$ maksimum değerindeki dağıtkanlık bağıntısının şematik gösterimi.

Dalga, nka 'da yerleşmiş olan özel bir örgü düzlemi ile sadece tanımlanmıştır. Birbirinin ardından gelen iki ardışık (komşu) düzlem için yer değiştirmelerin oranı;

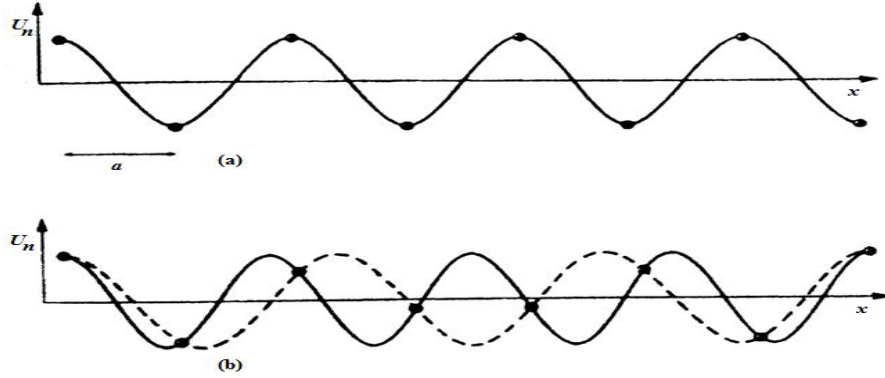
$$\frac{u_{n+1}}{u_n} = \frac{u \exp(i(n+1)ka)}{u \exp(inka)} = \exp(ika) \quad (3.9)$$

yazılabilir. ka fazı için $-\pi$ ile $+\pi$ aralığı düşünülürse üstel fonksiyonun bağımsız değerleri taranmış olur ($2\pi i$, oran periyodiktir). Bu yüzden $-\pi \leq ka \leq \pi$ 'dir ve burada

$-\pi/a \leq k \leq \pi/a$ yani karşılıklı örgünün Wigner-Seitz hücresi ile tanımlanan karşılıklı alanının ilk Brillouin bölgesi içindeki çözümler sınırlandırılmıştır.

Şekil 3.5'teki iki salınım, örgü düzlemleri (a ile ayrılan) için yer değiştirmeleri temsil etmektedir. İlk Brillouin bölgesi dışındaki \vec{k} dalga vektörü genellikle uygun bir ters örgü vektörü ilavesi ile birinci Brillouin bölgesine geri dönüştürülebilir.

$$\vec{k}' = \vec{k} + \vec{K} = \exp(ink'a) = \exp(inka) \underbrace{\exp(in\vec{K}\vec{a})}_{=1} \quad (3.10)$$



Şekil 3.5. (a) Dalgaboyu $\lambda = 2a$, dalgasayısı $k = \pi/a$ için atomik yerdeğıştirmeleri temsil etmektedir. (b) Sürekli çizgi ve kesik çizgi ile gösterilen belirli λ ve k değerine sahip dalga için atomik yer değıştirmelerdir (Hook and Hall, 2006).

Burada \vec{a} , örgü vektörüdür. Çözüm ise, $k = \pm \pi/a$ haricinde her yerde hareket eden bir dalgadır. Bitişik düzlemler arasındaki bu faz faktörü, $\exp(ika) = \exp(i\pi) = -1$ 'dir. Bu nedenle komşu düzlemlerin hareketi kesin olarak zıt fazdadır ve durağan bir dalga çözümü vardır. Genellikle faz hızı,

$$v_p = \frac{\omega}{k} \quad (3.11)$$

ile tanımlanır; fakat dalga paketinin hareketi yani daha çok grup hızı

$$v_g = \frac{\partial \omega}{\partial k} = \text{grad}_{\vec{k}}(\omega(\vec{k})) \quad (3.12)$$

dikkate alınır. (3.8) denkleminde grup hızı;

$$v_g = \left(\frac{4C}{M}\right)^{\frac{1}{2}} \frac{a}{2} \cos\left(\frac{ka}{2}\right) \quad \left[0 < k \leq \frac{\pi}{a}\right]$$

$$\Rightarrow v_g = \left(\frac{Ca^2}{M}\right)^{\frac{1}{2}} \cos\left(\frac{ka}{2}\right) \quad (3.13)$$

olarak elde edilir. Ortamdaki enerjinin iletim hızı, aynı zamanda grup hızını vermektedir. Küçük \vec{k} dalga vektörü için uzun dalga boyu limitine ulaşılır.

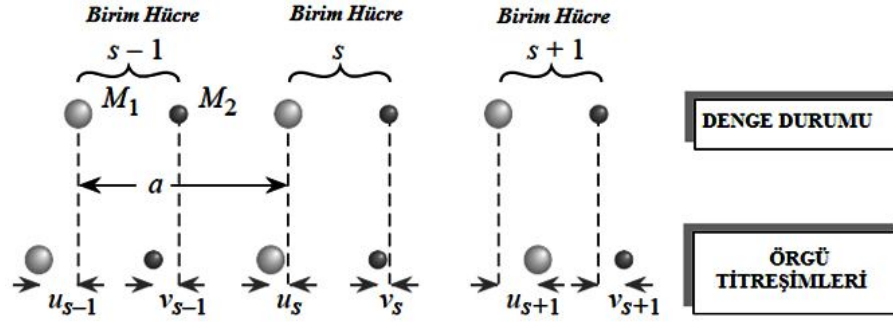
$$\omega^2 = \left(\frac{2C}{M}\right) [1 - \cos(ka)] \simeq \left(\frac{2C}{M}\right) \left[1 - \left(1 - \frac{1}{2}k^2a^2 + \dots\right)\right]$$

$$\simeq \left(\frac{2C}{M}\right) \frac{1}{2}k^2a^2 \Rightarrow \omega = \pm \left(\frac{C}{M}\right)^{\frac{1}{2}} ka \quad (3.14)$$

Ses hızı, frekanstan bağımsızdır, k , sıfıra gittiği zaman ka 'da sıfıra gider anlamındadır ki bu da kristalin sürekli bir ortama benzediği anlamına gelir. Düzlem içinde her bir atom temelde üç serbestlik derecesine sahiptir. Titreşimin ikisi enine birisi boyuna olmak üzere üç kipi vardır ve boyuna ve enine titreşimler için hemen hemen farklı C 'ye sahiptirler. Bir boyutlu kristalin yayılma yönünü ve kutuplanma yönünü dikkate alarak bu kristal içinde bir ses hızının var olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca basit kristalin dispersiyon bağıntısının çizilebilmesi için ses hızının ve örgü sabitinin bilinmesi yeterlidir (Mathew, 2006; Wharam, 2008, Hook and Hall, 2006; Durlu, 1992).

3. 2. İki Atomlu Örgü Titreşimleri

İlk yapılan çalışmalarda bir basit kübik yapı düşünülmüştür. Daha sonra ilkel birim hücresi, bir atom ya da daha fazla atom içerdiğinde ne olur? sorusu sorularak bunun üzerine incelemeler yapılmaya başlanmıştır. Örneğin; m_1 ve m_2 kütleleri ile atomların diatomik zincirini düşünülmüş ve her bir örgü düzlemi ile ilişkili olarak m_1 kütlelerinin bir atomu ve m_2 kütlelerinin bir atomu var olduğu kabul edilmiştir (Şekil 3.6).



Şekil 3.6. İki atomlu örgü titreşimleri (Singh, 1993).

Denge konumlarından atomların yer değiştirmeleri dikkate alınarak m_1 ve m_2 kütleleri için hareket denklemleri;

$$\begin{aligned} m_1 \frac{d^2 u_s}{dt^2} &= C[v_s + v_{s-1} - 2u_s] \\ m_2 \frac{d^2 v_s}{dt^2} &= C[u_{s+1} + u_s - 2v_s] \end{aligned} \quad (3.15)$$

şeklinde elde edilir. Burada daha önce olduğu gibi dalga denklemleri;

$$u_s = u \cdot \exp(iska) \exp(-i\omega t) \quad (3.16)$$

$$v_s = v \cdot \exp(iska) \exp(-i\omega t) \quad (3.17)$$

yazılabilir. (3.15) denklemlerine denklemler (3.16) ve (3.17) yazılırsa;

$$-\omega^2 m_1 u = Cv[1 + \exp(-ika)] - 2Cu \quad (3.18)$$

$$-\omega^2 m_2 v = Cu[\exp(ika) + 1] - 2Cv \quad (3.19)$$

bulunur. u ve v 'ye göre doğrusal olan bu homojen denklem sisteminin başka bir çözümünün olabilmesi için bu denklemler sisteminin katsayılar determinantı sıfıra eşitlenerek çözülürse,

$$\begin{vmatrix} 2C - m_1 \omega^2 & -C(1 + \exp(-ika)) \\ -C(1 + \exp(ika)) & 2C - m_2 \omega^2 \end{vmatrix} = 0 \quad (3.20)$$

$$4C^2 - 2C(m_1 + m_2)\omega^2 + m_1 m_2 \omega^4 - C^2(1 - \exp(ika))(1 + \exp(-ika)) = 0 \quad (3.21)$$

elde edilir. Son terim $2 + 2 \cos(ka)$ olarak yazılabilir.

$$\Rightarrow m_1 m_2 \omega^4 - 2C(m_1 + m_2)\omega^2 + 2C^2(1 - \cos(ka)) = 0 \quad (3.22)$$

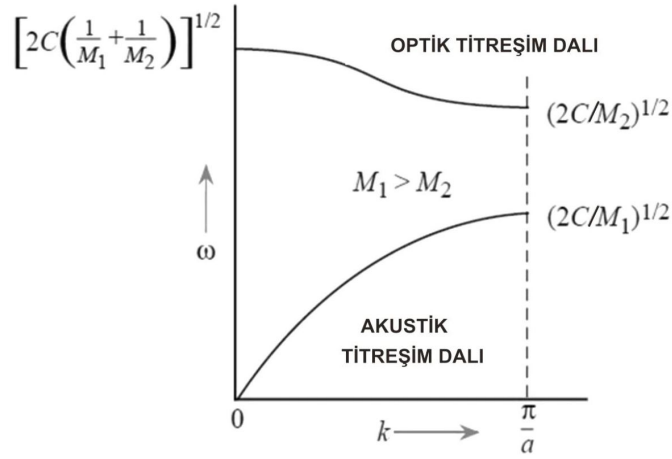
İlk olarak $k \rightarrow 0$ limit davranışı düşünülmüştür. Daha önce de olduğu gibi $\cos(ka) \approx 1 - 1/2 k^2 a^2$ genişletilerek,

$$\Rightarrow \omega^4 m_1 m_2 - 2C(m_1 + m_2)\omega^2 + C^2 k^2 a^2 = 0 \quad (3.23)$$

$$\Rightarrow \omega^2 = \frac{2C(m_1 + m_2) \pm (4C^2(m_1 m_2)^2 - 4m_1 m_2 C^2 k^2 a^2)^{\frac{1}{2}}}{2m_1 m_2} \quad (3.24)$$

Tek olası çözüm ($k = 0$) olduğundan,

$$\Rightarrow \omega^2 = 2C \left(\frac{m_1 + m_2}{m_1 m_2} \right) = 2C \left(\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} \right) \quad \text{optik dal} \quad (3.25)$$



Şekil 3.7. Dağılım bağıntısının optik ve akustik kipleri (Singh, 1993).

Diğer olası kök,

$$\omega^2 = \frac{1}{2} k^2 a^2 \frac{C}{(m_1 + m_2)} \quad \text{akustik dal} \quad (3.26)$$

sağlar ve aynı zamanda tek atomlu (monoatomik) zincir bulunur. $ka = \pm\pi$ bölge sınırında,

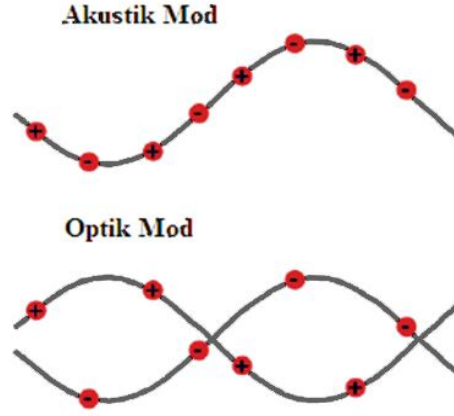
$$\Rightarrow m_1 m_2 \omega^4 - 2C(m_1 + m_2)\omega^2 + 4C^2 = 0 \quad (3.27)$$

$$\omega^4 - 2C \left(\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} \right) \omega^2 + \frac{4C^2}{m_1 m_2} = 0 \quad (3.28)$$

$$\Rightarrow \omega^2 = \frac{2C}{m_1} \text{ veya } \omega^2 = \frac{2C}{m_2} \quad (3.29)$$

$m_1 > m_2$ olduğunda, $\omega_1^2 < \omega_2^2$ sonucuna ulaşılır.

Uzun dalga boyu limitinde yani $\lambda \gg 2a$ uyan dalga boyu sınırında akustik ve optik kip, Şekil 3.8'deki gibi atomik türlerin hareket yönü ile ilgili olarak farklıdır.



Şekil 3.8. Optik ve akustik kip.

Optik kipte, kütle merkezleri değişmeyecek şekilde zıt fazda titreşirler. Akustik kipte, farklı türlerin komşu atomları aynı fazda titreşirler. Optik kip davranışı için 3.18 denklemi ya da 3.19 denkleminde ω^2 eklenmesi ile matematiksel olarak elde edilebilir ve

$$\frac{u}{v} = -\frac{m_2}{m_1} \quad (3.30)$$

için çözümlenir. Optik kip için kütle merkezi belirlenmiştir ve sabittir. Atomlar ise, birbirlerine karşı zıt yönde titreşirler. Akustik kip için atomlar ve onların kütle merkezleri birlikte hareket eder (Wharam, 2008, Hook ve Hall, 2006; Durlu, 1992; Singh, 1993).

3. 3. Üç Boyutlu Kristallerin Örgü Titreşimleri

Üç boyutlu bir kristal içindeki atomların hareketinin belirlenmesi için çeşitli yöntemler izlenir. Çekirdekte atomun kütlelerinin tamamı olduğu için var olan çekirdeğin hareketi incelenmelidir. Problemin kavramsal ve matematiksel olarak basitleştirilebilmesi ve çözümlenmesi için adyabatik yaklaşım kullanılır ve elektronlarla

çekirdeklerin hareketlerinin iyi bir yaklaşıklıkla birbirinden ayrılabilirliğini gösterir. Bir adyabatik pertürbasyon durumunda dalga fonksiyonu ve enerji değişirken kuantum durumu değişmez. Bu bir katının enerjisinin hesaplanmasını daha da kolaylaştırır.

Tek atomlu üç boyutlu kristal düşünülürse, üç tamsayı ile verilen örgü vektörü ile özel bir atomun denge konumunu tanımlamak için $r_j = j_1 a_1 + j_2 a_2 + j_3 a_3$ gereklidir. Zincirin en genel titreşimi, e_{ql} polarizasyonu (l imgesi ile tanımlanan yer değiştirmelerin yönü), q dalga vektörü ile verilen her birinin olası kiplerinin lineer üst üste binme ve ξ_{ql} genliğidir.

$$x_j = \sum_{q,l} e_{q,l} \{ \xi_{ql} e^{i(qja - \omega_l(q)t)} + \xi_{ql}^* e^{-i(qja - \omega_l(q)t)} \} \quad (3.31)$$

Burada titreşim nicelikleri, eksponansiyel'in kullanımına göre karmaşık konjuge gerçek bir sayı ile verilen fiziksel bir niceliği elde etmek için eklenmiştir. (3.31) denklemindeki sonucun genelleştirilmesi ile parçacıkların yer değiştirmesi

$$x_j = \sum_{q,l} e_{q,l} \{ \xi_{ql} e^{i(qr_j - \omega_l(q)t)} + \xi_{ql}^* e^{-i(qr_j - \omega_l(q)t)} \} \quad (3.32)$$

ile verilir. Sonlu bir uzunluktaki bir zincirin sınır koşulları ele alınırsa zincirin çok büyük bir halka için oluşturulduğu varsayıldığında dairesel sınır şartları kullanabilir. Her hangi bir j ve t için

$$x_j + N(t) = x_j(t) \quad (3.33)$$

elde edilir. Bu dairesel (dönüşüm) şartları uygulandığı zaman,

$$\xi e^{i(q(j+N)a - \omega(q)t)} = \xi e^{i(qja - \omega(q)t)}$$

veya

$$e^{iqNa} = 1, \quad qNa = 2\pi n \quad n = 0, \pm 1, \pm 2 \quad (3.34)$$

elde edilir. Bu yüzden

$$q_n = \frac{2\pi}{L} n \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (3.35)$$

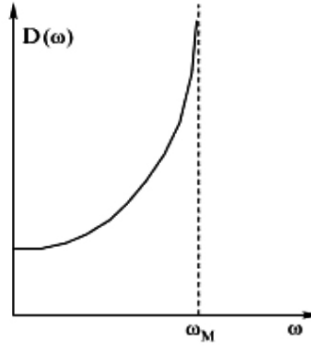
Burada $L = Na$, zincirin uzunluğudur. Böylece titreşim dizisi içindeki gibi normal kipler, kesikli, zinciri daha uzun kiplere daha yakındır. Bu tek boyutlu sınırlamalar üç boyutlu durumda

$$\begin{cases} N_1 q a_1 = 2\pi n_1 \\ N_2 q a_2 = 2\pi n_2 \\ N_3 q a_3 = 2\pi n_3 \end{cases} \quad n_1, n_2, n_3 = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \quad (3.36)$$

şeklindedir. Burada N_1, N_2, N_3 üç yöndeki hücrelerin sayısıdır. q dalga vektörü, ters örgünün birim vektörü bakımından yazılırsa $q = q_1 b_1 + q_2 b_2 + q_3 b_3$ 'dir. Tek boyutlu zincirin (3.35) denklemi ile ilgili olarak (3.36)'daki ilişkinin $q_1 = \frac{n_1}{N_1}$, $q_2 = \frac{n_2}{N_2}$, $q_3 = \frac{n_3}{N_3}$ olması sağlanır. Daha sonra izin verilen dalga vektörü,

$$q = \frac{n_1}{N_1} b_1 + \frac{n_2}{N_2} b_2 + \frac{n_3}{N_3} b_3, \quad n_1, n_2, n_3 = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \quad (3.37)$$

elde edilir ve s_i tamsayıları ile $q' = q + s_1 b_1 + s_2 b_2 + s_3 b_3$ ters örgünün bir vektörü (3.37) ifadesindeki izin verilen vektöre ilave edilirse (3.32)'deki atomal yer değiştirmeleri değişmez. Böylece sadece temel q dalga vektörü bunları ters örgünün birim hücresinde içerir. Bu amaç için, ilk Brillouin bölgesi içinde q 'yu düşünmek uygun olur.



Şekil 3.9. Durum yoğunluğu başına van Hove tekilliği ile basit bir lineer zincirin dalı. Burada dağıtım bağıntısı sıfır sapmaya sahiptir (Jacoboni, 2010)

Paralel yüzünün δV_q hacmi, kristaldeki birim hücrelerinin sayısı $N = N_1 N_2 N_3$ ile bölünen ve (3.38) denklemi ile verilen $b_1 \cdot b_2 \times b_3$ birim hücresinin hacmidir. Daha önce belirtilen analizlerden q izinli dalga vektörlerinin $\frac{1}{N_1} b_1, \frac{1}{N_2} b_2, \frac{1}{N_3} b_3$ kenarları ile ters uzaydaki bir paralel yüzünün köşelerinde olduğu açıktır. Ters örgünün birim

hücresinin ters uzaydaki hacmi, üçlü vektör oluşumu için formülün uygulanması ile kolayca bulunabilir.

$$b_1 \cdot b_2 \times b_3 = \left(\frac{2\pi}{V_c}\right)^3 (a_2 \times a_3) \cdot [(a_3 \times a_1) \times (a_1 \times a_2)] = \frac{(2\pi)^3}{V_c} \quad (3.38)$$

Böylece her bir dal için ters uzayda izin verilen q kiplerinin yoğunluğu

$$g(q) = \frac{1}{\delta V_q} = \frac{N}{(2\pi)^3/V_c} = \frac{V}{(2\pi)^3} \quad (3.39)$$

şeklinindedir. Burada $V = NV_c$ kristalin toplam hacmidir. q kiplerinin toplam sayısı, böylece N başına daldır. Optik kip için üç ve akustik kip için üç olası polarizasyon vardır. Kristalin birim hücrelerinin temeli, n atomları tarafından oluşturulursa optik modlar, $3(n-1)N$ ve akustik modlar ise $3N$ 'dir. Böylece, üç boyutlu bir kristalin titreşimlerinin normal kiplerinin toplam sayısı, beklendiği gibi örgünün serbestlik derecesinin $3N$ toplam sayısına yine eşittir. $\omega(q)$ dağılım eğrileri, q üç boyutlu vektörünün fonksiyonudur. Yüksek simetri yönü boyunca yönelen q için sadece saf olarak boyuna veya saf olarak enine kipler vardır.

Denklem (3.39)'da verildiği gibi ters uzayda durumların yoğunluğu sabittir. Genellikle, frekans alanındaki durumların yoğunluğunda yani ω ve $\omega + d\omega$ arasındaki frekans ile kiplerin sayısı ile ilgilenilmiştir. Bu, $\omega(q)$ dağılımı bağıntısına bağlıdır.

$\omega(q) = 2\sqrt{\frac{c}{M}} \left| \sin\left(\frac{qa}{2}\right) \right|$ dağılım bağıntısı ile verilen basit bir analitiksel dağılıma sahip olduğu için basit atomik zincirden başlamak böylece daha faydalı olmuştur. Tek boyutlu durum için ters uzaydaki durum yoğunluğu, $g(q) = \frac{L}{2\pi}$ ile verildi. Varolan simetriden dolayı q ve $-q$ çakışan kiplerin frekansı dağılım bağıntısı ile doğruluğu gösterilmiştir. q ve $q + dq$ arasında izin verilen dalga vektörlerinin sayısı, $dN = \frac{L}{2\pi} dq$ ile verilir. İlgili frekans aralığı ise, $d\omega = \frac{d\omega}{dq} dq$ 'dur. Böylece $d\omega$ aralık frekansındaki kiplerin sayısı pozitif ve negatif q hesaba katılarak,

$dN = 2 \times \frac{L}{2\pi} dq = 2 \times \frac{L}{2\pi} \frac{1}{d\omega/dq} d\omega$ 'dır. $D(\omega)$ durumlarının istenen yoğunluğu, $D(\omega) = \frac{dN}{d\omega} = 2 \times \frac{L}{2\pi} \frac{1}{d\omega/dq}$ olarak verilir. Basit bir lineer zincir için durum yoğunluğu kullanılarak bu ifade aşağıdaki denklemle ifade edilir.

$$D_{lc} = 2 \times \frac{L}{2\pi} \frac{1}{a \sqrt{\frac{C}{M} \cos\left(\frac{qa}{2}\right)}} = \frac{1}{\pi a \sqrt{\frac{C}{M} \left[1 - \sin^2\left(\frac{qa}{2}\right)\right]}}$$

veya durum yoğunluğundaki dağılım bağıntısı hesaba katılarak

$$D(\omega) = \frac{2L}{\pi a} \frac{1}{\sqrt{\omega_M^2 - \omega^2}} \quad (3.40)$$

şeklinde olur. Burada, $\omega_M = 2\sqrt{C/M}$ maksimum frekansıdır. Dağılım bağıntısındaki durum yoğunluğunun davranışı, Şekil 3.9'da gösterilmiştir. $\omega = \omega_M$ 'deki sapma, $\omega = \omega_M$ 'deki dağılım eğrisinin sapmasının sıfır değeri ile ilgilidir ve van Hove tekilliği olarak adlandırılmaktadır. Aynı zamanda enine kipler düşünüldüğünde (3.39) denkleminde dalga vektör uzayındaki durum yoğunluğu üç kat daha büyüktür (tek başına polarizasyon) ve enine kipler için durum yoğunluğuna (3.40) denklemindeki ifadeler eklenir. Diatomik zincir durumunda aynı zamanda optik kip düşünülmüştür. Dağılımları hemen hemen sabit olduğu için frekans aralığındaki durum yoğunlukları güçlü bir şekilde en yüksek noktadadır.

Üç boyutlu durumda, ω , izotropik malzemelerdeki gibi gerekli olmayan küresel simetri, q vektörünün bir fonksiyonudur. Küresel durumda $d\omega$ 'deki durum sayısının başına dal, q ve $q + dq$ yarıçapının iki küresi arasında q uzayındaki hacim düşünülerek bulunmuştur.

$$dn = 4\pi q^2 dq \frac{V}{(2\pi)^3} = 4\pi q^2 \frac{V}{(2\pi)^3} \frac{1}{d\omega/dq} d\omega$$

Öyle ki

$$D(\omega) = \frac{Vq^2(\omega)}{2\pi^2 v_g}$$

Bu ifade akustik ve optik, boyuna ve enine farklı dallar üzerinde toplanmalıdır. Daha genel durumda $\omega(q)$ sabitinin $s(\omega)$ yüzeyi, daha karmaşık bir biçime sahiptir ve ω ve $\omega + d\omega$ arasındaki durum yoğunluğu,

$$dn = \int_{s(\omega)} \frac{V}{(2\pi)^3} dsdq = \frac{V}{(2\pi)^3} \int_{s(\omega)} \frac{ds}{|v_g|} d\omega \text{ 'dir. Böylece,}$$

$$D(\omega) = \frac{V}{(2\pi)^3} \int_{s(\omega)} \frac{ds}{|v_g|} \quad (3.41)$$

v_g modülü hesaba katıldığında q uzayındaki hacim, artan q 'daki hem azalan hem de artan frekanslar için pozitiftir. Bu şekilde elde edilen durum yoğunluğu, farklı dallar ve van Hove tekillik özellikleri için eklenmelidir. Lineer zincirde görüldüğü gibi her zaman ω , yok olan grup hızı ile ilgili olarak bir ekstremum (uç değeri) sahiptir (Hook and Hall, 2006; Jacoboni, 2010).

3. 4. Fonon Dinamiği

Katıhal fiziği ve malzeme bilimi için fononların titreşim özelliklerinin ve enerjilerinin incelenmesi son derece önemlidir. Isı iletimi, ısı sığası, ısısız genişleme, elastiklik, elektron-fonon etkileşimi, fonon-fonon etkileşimi, elektriksel iletkenlik, termal iletkenlik gibi birçok özellik fononlarla doğrudan ilgilidir. Örgü titreşimlerinin yani elastik dalgaların enerji kuantumuna elektromanyetik dalgalardaki fotona benzer olarak fonon adı verilir ve fotonlar için geçerli olan bütün fizik kuralları fononlar içinde geçerlidir.

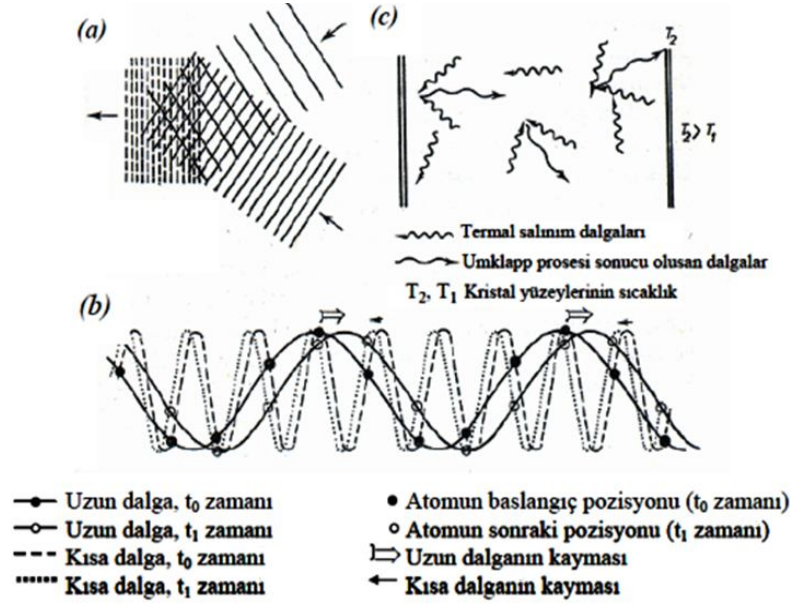
Bir örgü dalgasının enerjisi $\hbar\omega$ ile ifade edilir ve fononların enerjileri ise $\hbar\omega$ 'nın katları olacak şekilde değişir. Yapı içindeki elastik dalgalar fononlardan oluşmaktadır (Kittel, 1996). Bir fononun enerjisi; ω açısal frekanslı titreşim kipi için $\hbar\omega$, momentumu ise $\hbar k$ 'dir. Bu $\hbar k$ momentumuna fononun kristal momentumu denir. Kristal boyunca yayılan düzlem dalgalar normal kiplerdir ve bu kiplere karşılık gelen fononlar yerleşmiş parçacıklar değildir. Fonon momentumu tam anlamıyla bilindiği için, var olan belirsizlik ilkesi konumun belirlenemeyeceğini ifade eder. Ayrıca fotonlar veya elektronlarla olduğu gibi farklı frekans ve dalgaboylu kipler birleştirilerek bir dalga paketi oluşturulur. Bu oluşturulan dalga paketi, $d\omega/dk$ grup

hızı ile hareket eden bir fononu temsil eder. Fononların enerjisi ve momentumu arasındaki bağıntı;

$$E = \hbar\omega \text{ ve } \vec{p} = \hbar\vec{k} \quad (3.42)$$

Fonon momentumu $\hbar\vec{k}$ olarak ifade edilse de k 'nın $2\pi/a$ periyodikliğine sahip olduğundan dolayı bir fonona belirli bir \vec{k} değeri verilemez. Bu nedenle var olan bu momentum gerçek bir momentum değildir, kristal momentumudur. Ayrıca fononlar, Bose-Einstein istatistiğine uyan parçacıklar olduklarından dolayı aynı enerji seviyesinde sonsuz sayıda bulunabilirler. Bozondurlar ve korunumlu olmadıkları için çarpışmalarla yaratılabilir ya da yok edilebilirler (Hook and Hall, 2006; Erkişi, 2007).

Fononlar yardımıyla ısı iletimi ise katı içinde bir sıcaklık gradyanı olduğu zaman daha sıcak olan bölgeden daha soğuk olan bölgeye doğru bir ısı akışının gerçekleşmesiyle meydana gelir. Elektriksel olarak yalıtılmış olan bir katıda, var olan ısıl iletimine en önemli katkı fononların akışından gelmektedir. 1914 yılında Debye tarafından, nonlinear bir sistem olması durumunda normal kiplerin birbirleriyle etkileşeceği ve örgü titreşimlerinin ısıyı taşıyan hareketli dalgalar olduğu ilk olarak açıklanmıştır (Zengin, 2005). Bu ısıl iletimde fononların dağılımı ve gazlardaki serbest çarpışma arasındaki farkın hesaba katılması önemlidir. Eğer harmonik yaklaşımda bütün kipler ortogonal ve bağımsız olduklarından farklı k değerlerine sahip fononlar arasında etkileşme olmaz. Çünkü harmonik salınımlar dinamik olarak bağımsızdırlar. Bu sebepten dolayı katılardaki ısı sığası iyi bir şekilde açıklanabildiği halde harmonik yaklaşımlıklarda termal genleşme, termal direnç ve bir katıda termal dengenin kurulması gibi olayları izah edilemez. Gerçek sistemlerde salınımlar harmonik olmadığından etkileşim meydana gelir. İki salınım dalgası bu şekilde devam ederek birbirlerine engel olabilirler.



Şekil 3.10. a) Salınım dalgalarının karşılaşması; (b) "Umklapp" olayı; (c) "Umklapp" olayı sonucu oluşan termal salınım dalgalarının yayılım yönünün değişimi (Bruls, 2000)

Katılarda termal dengenin kurulabilmesi için enerjinin çok sayıda kiplere gelişigüzel dağılıncaya kadar bir fonon kipinden diğerine geçmesi gerekir. Yüksek frekansa sahip iki dalganın etkileşimiyle, bunların kombinasyonundan yeni bir dalga meydana gelebilir. Böylece daha yüksek bir frekansa ve var olan dalgadan daha küçük dalga boyuna sahip olacaktır. Şekil 3.10'a göre böyle bir durum olamaz; çünkü dalga boyu birim hücrenin boyutundan daha küçük olamaz. Böyle bir durum ancak Şekil 3.10.(b)'deki gibi fononların çarpışması sonucunda meydana gelen dalgadan daha büyük bir dalga boyuna sahip olan ve buna karşılık tam olarak ters yönde hareket eden alternatif bir dalga ile izah edilir. Bu olaya Umklapp olayı denir. Bu olay fononların yolunu uzatarak ısı enerjisinin yapı içerisinde eşit olarak yayılmasını ve yayılma süresini arttırır. Ayrıca fononların çarpışma sayısını arttırarak saçılma neden olur ve ortalama serbest yol azalır.

Katılarda saçılmanın meydana gelmesine, direnç göstermesine sebep olan diğer bir etken ise yapı içinde var olan hatalar, dislokasyonlardır. Yapı içine giren katkı

atomlarından fonon hareketi etkilenir. Bu katkı atomları kendilerine ait farklı atom ağırlıklarına sahip oldukları için titreşim dalgalarında bozukluğa neden olurlar. Bu durum daha çok çizgisel ve noktasal kusurların etkisi altında özellikle hatanın büyüklüğü, boyutu, fonon dalga boyu ile kıyaslanabilir ölçüde olduğunda ortaya çıkar. Umklapp olayı ve yapı içindeki mevcut hatalarla çarpışmaya bağlı olarak ortalama serbest yolu azaltır ve daha kısa boylu dalga boyuna sahip fononlarda açığa çıkar (Durlu, 1992; Kuşhan, 2006).

BÖLÜM 4

TERMAL VE ELASTİK ÖZELLİKLER

4. 1. Termal İletkenlik

Termal iletkenlik, bir katı malzemedeki en temel ve en önemli fiziksel parametrelerden biridir. İki sistem arasında veya bir sistemle çevresi arasındaki sıcaklık farkından kaynaklanan ve sistemin sınırlarından geçen enerji, ısı olarak ifade edilmektedir. Sistem ile çevresi arasındaki enerji alış verişi iki şekilde olur. Biri, sistem tarafından yapılan iştir. Bu tür enerji değişiminde, sistemin makroskobik değişkenlerinde (yani basınç ya da kuvvetin uygulama noktalarında) önemli bir değişim meydana gelir. Diğeri ise mikroskobik bileşenlerinin yani atom ve moleküller arasındaki gelişigüzel çarpışmalardan oluşan ısı transferidir. Her ikisi de sistemin iç enerjisinde değişime sebep olduğundan dolayı sistemin makroskobik (basınç, sıcaklık ve hacim gibi) değişkenlerinde gözlemlenebilir değişimler meydana gelir (Serway and Beichner, 2011).

Sistemin iç enerji değişimine neden olan üç çeşit ısı transferi tanımlanmaktadır. Bunlar;

- i. Isı iletimi
- ii. Isı taşınımı
- iii. Isı ışınımı olarak ifade edilmektedir.

Isı iletimi, sıcaklık farkları nedeniyle meydana gelen enerji aktarımıdır. Aynı katı, sıvı, gaz ortamındaki farklı bölgeler arasında veya fiziki temas durumunda bulunan farklı ortamlar arasında oluşan ısı transferine atomik boyutta moleküller, atomlar ve elektronlar arasındaki kinetik enerji değişimi olarak bakılan ısı yayılımı işlemidir. Bu durumda düşük kinetik enerjiye sahip parçacıklar, daha yüksek kinetik enerjiye sahip parçacıklarla çarpışarak enerji kazanırlar.

Isı taşınımı, ısıtılan bir maddenin hareketiyle aktarılan ısıya denir. Herhangi bir boru içerisinden veya bir yüzey üzerinden akan akışkanın sıcaklığı var olan yüzey sıcaklığından farklı ise akışkan ile yüzey arasındaki ısı transferi mekanizması konveksiyon (taşınım) olarak adlandırılmaktadır.

Isı ışınımı ise bütün cisimler sürekli olarak elektromanyetik dalgalar şeklinde enerji yaydıkları için elektromanyetik dalgalar vasıtasıyla olan ısı transferi mekanizmasıdır. Moleküllerin ısı titreşimleri ile elektromanyetik dalgalar oluşur. Bir cismin çevreye verdiği ışınım enerjisi, kendi sıcaklığının dördüncü kuvveti ile doğru orantılıdır. Bütün cisimler, üzerlerine düşen ısı ışımanın bir kısmını soğurur, bir kısmını yansıtır, bir kısmını da geçirirler (Serway and Beichner, 2011; Poyraz, 2006).

Isı enerjisi, yüklü taşıyıcılar (elektronlar veya boşluklar), örgü dalgaları (fononlar), elektromanyetik dalgalar, spin dalgaları veya diğer etkileşimler yoluyla katılar boyunca iletilir. Yalıtkanlarda örgü dalgaları, baskın ısı taşıyıcılarıken metallerde ise çoğunu yüklü taşıyıcılar taşır. Genelde κ , toplam termal iletkenlik, çeşitli etkileşimleri (α) temsil eden tüm bileşenlerin bir toplamı olarak aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\kappa = \sum_{\alpha} \kappa_{\alpha} \quad (4.1)$$

Büyüklik ve sıcaklığa bağlı olarak bir materyalden diğerine katıların termal iletkenlikleri önemli ölçüde değişir. Polikristal numuneler için tanecik boyutları veya tek kristaller için numune boyutlarındaki farklılıklar, örgü kusurları veya hatalar, dislokasyonlar, örgü kuvvetlerinin uyumsuzluğu, taşıyıcı yoğunlukları, taşıyıcılar ile örgü dalgaları arasındaki etkileşimler ve manyetik iyonlar ile örgü dalgaları arasındaki etkileşimler gibi süreçler termal iletkenliği hem deneysel hem de teorik olarak ilginç bir çalışma alanı yapar. Hem çok yüksek hem de çok düşük termal iletkenlikli materyaller teknolojik olarak önemlidir. Elmas veya silikon gibi yüksek termal iletkenlikli materyaller, elektroniklerin termal yönelimindeki potansiyel uygulamaları nedeniyle kısmen çalışılmıştır. Arsenik ve kobalt karışımı, klotratlar, daha elektropozitif elemanı ile herhangi bir ikili bileşik olan hallojenler ve yeni oksitler gibi düşük termal

iletkenlikli materyaller yüksek verimlilikli termoelektrik materyalleri için son araştırmaların odağı olmuştur (Tritt, 2004).

Termal iletkenlik teorisi 1822 yılında Fourier tarafından ortaya atılmıştır. Fourier'e göre temel ısı iletim denklemi "homojen bir katı için yerel ısı akışı, negatif yerel sıcaklık değişimi ile doğru orantılıdır" olarak ifade edilmiştir. Bir boyutlu kararlı durum ısı transferi için bu ifade

$$dQ = -\kappa dA \frac{dT}{dL} \quad (4.2)$$

şeklinde ifade edilir. Burada q , ısı akışı, κ , malzemenin termal iletkenliği ve pozitif bir ikinci derece tensör niceliğindedir, dT/dL , kalınlık karşısındaki sıcaklıktaki değişimi ve negatif işaret ise ısının daima yüksek sıcaklıktan, düşük sıcaklığa akması nedeniyle, pozitif değer elde etmek için kullanılmaktadır. Denklem (4.2)'ye göre iletkenlik;

$$\kappa = \frac{(Q/A)}{\Delta T/\Delta L} \quad (4.3)$$

olarak verilir. Burada Q , ısı akışı, A , numunenin kesit alanı, ΔT , sıcaklık farkı, ΔL ise uzunluktur.

Atomik boyutta termal iletkenliğin açıklanması basit bir durum değildir. Bunu ifade edebilmek için termal iletkenliği, mükemmel bir gazda düşünmek daha doğru olacaktır; çünkü gazda ısı, gaz moleküllerinin birbirlerine çarpması sonucu iletilir ve çarpışmanın sonucu olarak rastgele hareket ederler. Gazlardaki termal iletimin kinetik formülü için c , her bir parçacığın ısı kapasitesidir ve n , ise parçacıkların yoğunluğudur. ΔT , sıcaklık gradyentinin varlığında v , hızı ile hareket eden bir parçacık için enerjisini denklem (4.4) oranında değiştirmek gerekir.

$$\frac{\partial E}{\partial t} = cv \cdot \Delta T \quad (4.4)$$

Saçılma olmadan önce bir parçacığın ortalama mesafesi, $v\tau$ 'dir. Burada τ ise gevşeme süresidir. Tüm parçacıkların toplam birim alan başına ortalama toplam ısı akışı oranı

$$Q = -nc\tau \langle \vec{v} \cdot \vec{v} \rangle \Delta T = -\frac{1}{3} nc\tau v^2 \Delta T \quad (4.5)$$

dir. Denklem (4.5)'teki parantez, tüm parçacıklar üzerindeki bir ortalamayı temsil eder. Denklem (4.3) ve (4.5)'in birleştirilmesiyle;

$$\kappa = \frac{1}{3} n c \tau v^2 = \frac{1}{3} C v l \quad (4.6)$$

elde edilir. Burada $C = n c$, toplam ısı kapasitesidir ve $l = v \tau$ ise ortalama parçacık serbest yoludur. Katılarda aynı türetme, çeşitli uyarımlar (elektronlar, fononlar, fotonlar vb.) için yapılabilir. Denklem (4.6) daha sonra genelleştirilerek

$$\kappa = \frac{1}{3} \sum_{\alpha} C_{\alpha} v_{\alpha} l_{\alpha} \quad (4.7)$$

elde edilir. Burada toplam, α tarafından gösterilen tüm uyarımlar üzerindedir. Genelde denklem (4.7) termal iletkenliğin iyi bir görüngüsel açıklamasını verir ve büyüklük tahminleri için pratik olarak çok yararlıdır. Denge durumunda olmayan taşıma parametrelerinin çoğu gibi termal iletkenlikte tam olarak çözülemez. Hesaplamalarda genellikle Boltzman denklemi ve pertürbasyon teorisinin bir kombinasyonu temel alınmıştır. Burada ısı iletim, analiz edilen mikroskobik işlemler için var olan taşıyıcılar ve örgü dalgaları tarafından kontrol edilir (Tritt, 2004; Mutnuri, 2006).

Elektronların termal iletkenliği fononların türetilmesi için de benzer bir biçimde elde edilebilir. Wiedemann ve Franz (1853) bütün iyi elektriksel iletkenlerinin aynı zamanda iyi birer termal iletken olduğunu ve belirli bir sıcaklıkta termal ile elektriksel iletkenliklerin oranının bütün metaller için aynı olduğunu keşfetmişlerdir. Lorentz daha sonra bu oranın mutlak sıcaklık ile doğru orantılı olduğunu göstermiştir. Herhangi bir akım akışının olmadığı varsayıldığında elektronlardan dolayı termal iletkenlik,

$$k_e = \frac{1}{3} C_e v_F^2 \tau_E \quad (4.8)$$

öyle ki metallerin elektriksel direnci hem fonon direnci hem de örgü kusuru direncine bağlıdır. Buna göre direnç $\rho = \rho_{fonon} + \rho_{örgü kusuru}$ gibi iki bileşenden oluşur.

$$\sigma = \frac{n e^2}{m} \tau_E \quad (4.9)$$

Burada σ , elektriksel iletkenliktir, τ_E , elektronların enerji gevşeme süresi ve elektronların enerjisine karşı ölçülen τ 'nin bir ortalamasıdır ve C_e , elektronların hacimsel öz ısıdır. τ_E , aşırı enerjiyi yok etmek için bir elektronun ortalama süresini

temsil eder. Genellikle enerji gevşeme süresi, momentum gevşeme süresinden farklı olabilir. Buna rağmen tipik bir şekilde iki gevşeme süresi çok yakındır. Denklem (4.8) ve (4.9)'dan ve gevşeme süreleri arasındaki fark ihmal edilirse,

$$L = \frac{k_e}{\sigma T} = \frac{m C_e v_F^2}{3 n T e^2} = \frac{\pi^2}{3} \left(\frac{\kappa_B}{e} \right)^2 = 2,45 \times 10^{-8} \quad (4.10)$$

veya

$$\frac{K}{\sigma T} = \text{sabit} = L \quad (4.11)$$

Bu ifade, Wiedemann-Franz kanunu olarak adlandırılmaktadır ve L ise Lorentz sayısıdır. Çoğu metal, Lorentz sayısı değerindeki küçük değişiklikler ile bu kanuna uyar. Yarı iletkenler için Lorentz sayısı, katkılamaaya bağlı olarak n ve Fermi seviyesi arasındaki ilişki hesaplanmasıyla elde edilir; fakat Lorentz sayısının büyüklüğü değerine yakın olarak kalır. Wiedemann-Franz kanunu çoğu kez termal iletkenlik ile elektron iletimini tahmin etmek için kullanılır. Elektronlar çoğu metallerde baskın ısı taşıyıcıları olduğundan dolayı metaller için elektriksel iletkenlikten doğrudan termal iletkenliği hesaplamak için bazen kullanılır. Wiedemann-Franz yasası gerçekte ortalama serbest elektron yolunun hem elektriksel hem de termal iletim süreçleri için aynı olduğu düşüncesine dayanmaktadır. Wiedemann-Franz yasası Debye sıcaklığını aşan sıcaklıklar için geçerlidir (Chen, 2005; Rajakopal, 2011).

4. 1. 1. Katılarda Termal İletkenlik

Isı iletimi üç ayrı yolla sağlanır. Birincisi fotonlar tarafından sağlanan radyasyonla veya fotonlarla ısı iletimidir ve bu tarz ısı iletiminde herhangi bir ortama gerek duyulmaz. İkincisi gazlarda ve sıvılarda olduğu gibi, kütle içinde atomların ve moleküllerin hareket etmesi ile sağlanan konveksiyonla ısı iletimidir. Üçüncüsü termoelastik dalgaların fonon hareketi veya atomdan atoma titreşimle sağladığı kondüksiyonla iletimdir. Metallerin ısıl iletkenlikleri onların olağan özelliklerinden bir tanesidir. Metallerde fononlar aracılığıyla ileri gelen ısıl iletkenlik, fononlar iletkenlik

elektronları tarafından saçıldıkları için, genel olarak metal olmayanlarınkinden daha küçüktür (Hook and Hall, 2006).

Örgü titreşimleri tarafından elektronların saçılmasından saf metalin direnci ortaya çıkar. Isıl enerjinin iletim hızını malzeme içindeki ısıl iletkenlik belirler. Isı iletimi metallerde serbest elektronlarla ve fononlarla sağlanır. Kovalent bağlı ve iyonik bağlı yapılarda serbest elektron bulunmadığından ısı yalnız fononlarla iletilir. Isı enerjisinin etkisiyle titreşip aktive olan elektronlar Fermi düzeyi üstüne çıkarak serbest hale geçer ve sıcaklığı yoğun olan bölgeden soğuk olan bölgeye doğru hareket ederek ısıl enerji iletirler. Bu durumda net bir ısı akışına sebep olmaktadır (Onaran, 2009).

Fononlar, diğer fononlarla (titreşen atomlarla), safsızlık atomlarıyla (yabancı atomlarla) ve kristal içerisindeki kusurlarla etkileşirler. Düşük sıcaklıklarda fonon sayısının ve termal enerjinin az olmasından dolayı fononların diğer fononlarla etkileşme ihtimali düşüktür ve termal enerji, uzun dalga boyuna sahip fononlarla iletilir. Uzun dalga boyuna sahip fononlar genelde safsızlık ve hatalara bağlı olarak önemli bir saçılmaya uğramadıklarından düşük sıcaklıklarda ortalama serbest yolları da uzundur. Bu da yüksek iletkenlik veya çok küçük direnç demektir. Yüksek sıcaklıklarda fononların sayısı artar ve diğer fononlarla etkileşme ihtimali de arttığından yüksek frekansa ve düşük dalga boyuna sahip fononlar termal enerjinin taşınımında daha büyük rol oynamaya başlarlar. Dalga boyunun kısa olması sebebiyle safsızlık atomlarıyla etkileşecektir ve saçılma miktarı da buna bağlı olarak artacaktır (Turton, 2007).

Anizotropik yapıya sahip kristallerde termal iletkenlik farklı kristalografik yönlerde değişiklik gösterir. Termal genleşmeye bağlı olarak sıcaklıkla birlikte yapının anizotropisinde azalır. Dolayısıyla sıcaklık artışı ile termal iletkenliğinde anizotropisi azalır (Kuşhan, 2006).

Seramiklerde ısıl iletkenlik durumu yalnızca fononlarla sağlanır. Dolu valans bandı ile boş iletim bandı arasında geniş bir enerji aralığı bulunduğu için bu tarz malzemelerde ısıl enerjinin elektronları aktive etme durumu söz konusu değildir. Çok

yüksek sıcaklıklarda bu enerji aralığını geçen elektronlar olabilir ama genellikle seramikler ısı iletimi bakımından yalıtkan olarak ifade edilmektedirler (Onaran, 2009).

Yarıiletkenlerin enerji aralığı küçük olduğu için mevcut olan elektronlar çok çabuk aktive olurlar ve fononların yanında ısı iletimine katkıda bulunurlar. Isı iletkenlikleri sıcaklıkla artar.

Kovalent bağlı polimerlerin ısı iletkenliği seramiklerin ısı iletkenliğine benzer olup yalnızca fononlar tarafından sağlanır ve ısı iletkenlikleri çok düşüktür.

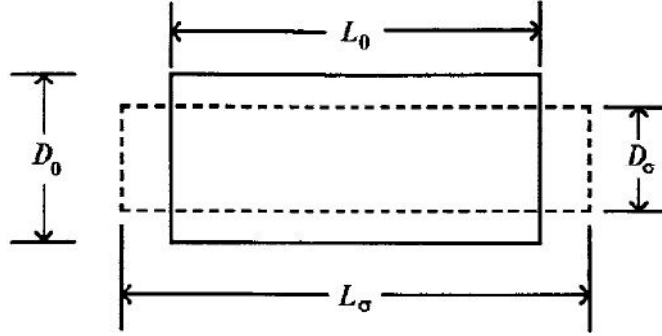
4. 2. Young Modülü

Makroskopik boyutta olmasına rağmen katıların incelenen fiziksel özellikleri genel olarak ultrases dalgaların ortamdaki yayılma ve davranışlarının anlaşılması için önemlidir. Gerilme ve gerinim kavramlarından yararlanılarak herhangi bir katının elastik özellikleri hakkında bilgi sahibi olunur. Gerilim, iç kuvvetlerin kesim yüzeyinin herhangi bir noktasındaki ortalama şiddetinin birim alana bölünmesiyle elde edilen değerdir. Bu ortalama şiddete o noktaya ait gerilme denir ve σ ile gösterilir (Ilıcan, 1995; Dinçer, 2004; Oral, 2011). Gerinim ise bilinen bir gerilim altında malzemenin akması, şekil veya biçim değiştirmesi, deformasyona uğramasıdır ve ε ile gösterilmektedir (Ilıcan, 1995; Dinçer, 2004; Oral, 2010).

Bir malzeme, bir σ gerilimine maruz kaldığı zaman malzeme deformasyona uğrar. Katı bir malzemede belirli bir yön için malzemenin mühendislik ε çekme gerilimi bu yönde doğrusal bir boyutun bağıl değişimi olarak belirlenir.

$$\varepsilon = \frac{L_{\sigma} - L_0}{L_0} \quad (4.12)$$

Burada Şekil 4.1'de gösterildiği gibi L_{σ} , gerilimin uygulamasından sonra malzemenin doğrusal boyutunun uzunluğudur ve L_0 ise deformasyondan önceki uzunluğudur (Timoshenko, 1940).



Şekil 4.1. Yanal daralma ile çekme gerinimi (Munro, 2000).

Malzemenin kuvvet altında elastik şekil değiştirmesine Young modülü (E) denir. Kuvvet altında atomlar arası bağların esnemelerinden oluşur ve esnek bir malzemede uygulanan normal gerilme ve buna karşı elde edilen normal birim deformasyonun birbirine oranıdır. Bir malzemenin elastik deformasyonunda gerilim ve gerinim sınırlı bir etki gösterir ki malzeme geri dönebilir şekilde hareket eder. Bu etki de malzemenin elastik tepkisi Hooke kanunu tarafından tanımlanır ve bilindiği gibi σ çekme gerilimi, gerinim ile doğru orantılıdır.

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (4.13)$$

Aynı zamanda Young modülü, elastiklik modülü, elastik katsayısı, uzama modülü, çekme modülü vb. olarak da adlandırılmaktadır.

Genel olarak herhangi bir çekme veya normal gerilim uygulandığı zaman malzemenin deformasyonu, uygulanan gerilime paralel yöndeki gerinim olmakla birlikte (çekme, eksensel veya boyuna gerinim olarak da adlandırılır) aynı zamanda uygulanan gerilimin yönüne dik bir gerinim de (enine veya yanal gerinim olarak adlandırılır) içerir. Örneğin, Şekil 4.1'de verilen çubuk boyunca çekildiği için silindirik çubuğun çapı da azalma eğilimi göstermektedir (Munro, 2000).

Herhangi bir F dış kuvveti uygulandığında, çubuktaki iç kuvvetler uzunluk değişimine karşı koymaya çalışır ve çubuk dengeye ulaşır. Denge durumunda ise, çubuğun uzunluğu büyümüş ve kesit alanı daralmıştır. Dolayısıyla dış kuvvet, iç

kuvvetler tarafından tam olarak dengelenmiştir. Böyle bir durumda, çubuğun gerilme etkisinde olduğu söylenir. Bu çubuğun Young modülü;

$$E = \frac{F/D_0}{(L_\sigma - L_0)/L_0} \quad (4.14)$$

ile verilir.

Bir yapı içindeki atomlar ve moleküller arasındaki bağlar, yönelimler ve etkileşimler Young modülü ile açıklık kazanır. Malzemenin sağlam olması isteniyorsa Young modülü değerinin yüksek olması gerekir, bu da atomlar arası bağların daha kuvvetli ve daha kararlı olması anlamına gelir. Böyle bir yapı gerilime, basınca ve zorlamaya daha fazla mukavemet gösterir. Young modülü değerinin düşük olması durumunda yapının elastik deformasyonu daha kolaydır (Tagieva and Perelomova, 1983; Dinçer, 2004; Oral 2011). Bir malzemenin Young modülü, ultrases dalga hızlarına (boyuna ve enine) ve yoğunluğuna bağlı olarak da hesaplanabilir:

$$E = \rho V_T^2 \frac{3V_L^2 - 4V_T^2}{V_L^2 - V_T^2} \quad (4.15)$$

Ultrases hızları da Lamé sabitleri cinsinden ifade edilir.

$$V_L = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \quad (4.16)$$

$$V_T = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (4.17)$$

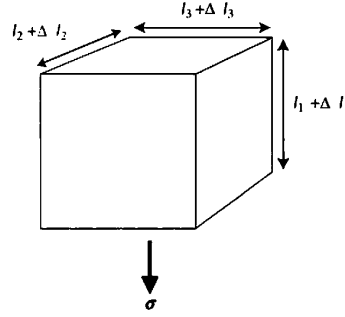
kullanılarak Young modülü;

$$E = \frac{\mu(2\mu + 3\lambda)}{\lambda + \mu} \quad (4.18)$$

şeklinde de ifade edilir.

4. 3. Poisson Oranı

Bir katıya mekanik gerilim uygulandığı zaman, katının boyutları Şekil 4.2’de gösterildiği gibi gerilime dik yönlerde değişebilir.



Şekil 4.2 Poisson oranının tanımlanmasında 3 boyuttaki değişim.

Poisson oranı (ν), paralel değişimle dik değişimin ilişkisi olarak yani serbest yanal yüzeye sahip bir malzemenin, tek-eksenli bir gerilim altında iken kesit çapındaki azalma olarak tanımlanır.

$$\frac{\Delta l_2}{l_2} = \frac{\Delta l_3}{l_3} = -\nu \frac{\Delta l_1}{l_1} = -\nu \varepsilon \quad (4.19)$$

Sadece izotropik katılar tartışıldığında, 2 ve 3 yönlerindeki kesirli değişim aynıdır. Katı, çekme geriliminden dolayı yanlardan kısaldığı için ifadedeki eksi işareti, Poisson oranının normal durumlarda pozitif olmasını sağlar. Poisson oranı, bütün olası değerleri almaz. Çeşitli yöntemlerle (istatistik, dinamik, ultrasonik vb.) ölçülebilen bu büyüklük, oldukça dar bir aralıkta değişen değerler almaktadır. -1 ve +0.5 aralığında sınırlıdır. Örneğin; kauçuk, 0.5'e çok yakın olan bir ν değerine sahiptir yani hemen hemen ideal bir sıkılaştırılamayan katıdır. Birçok malzeme için Poisson oranının tipiksel değerleri 0.2 ve 0.4 arasındadır. Poisson oranı -1 değerine yaklaştıkça malzeme son derece sıkıştırılabilir olurken, kayma gerilmeleri altında şekil değişikliğine karşı direnci aşırı bir şekilde artar. Eğer bir malzeme tek yönde çekme ve basma kuvveti etkisi altında kalırsa sadece kuvvete maruz kalan doğrultuda değil tüm yönlerde deformasyon meydana gelir. Yanal deformasyonların aksenal deformasyona oranı poisson oranını verir (Hofmann, 2008; Brown, 1995; Gerçek, 2004; Nanekar and Shah, 2003). Poisson oranı ultrases hızları cinsinden,

$$\nu = \frac{V_L^2 - 2V_T^2}{2V_L^2 - 2V_T^2} \quad (4.20)$$

eşitliği ile hesaplanır. Lamé sabitleri cinsinden ise

$$\nu = \frac{\lambda}{2\lambda + 2\mu} \quad (4.21)$$

ile bulunur.

4. 4. Hacim Modülü

Hacim (Bulk) modülü, hidrostatik basınç altında bir malzemenin sıkıştırılması durumunda hacminde meydana gelen değişime karşı gösterdiği direnç olarak ifade edilen elastik bir özelliktir ve B ile gösterilir; basıncın hacim değişimine oranı olarak tanımlanır. Tek biçimli dıştan uygulanan basınca maruz kaldığında çoğu maddelerin hacmi azalır. Bu uygulanan gerilme ile hacimsel gerilme arasındaki oran;

$$B = \frac{\sigma}{\Delta V} \quad (4.22)$$

ile verilir. Bulk modülü, kristal yapının sertliği ile doğrudan ilişkili olduğu için basınç ile değişimi önemlidir. Ayrıca var olan negatif hacim modülünün önceden gerilmiş örgü içinde ve çok sayıda kristal malzemede görülmesi mümkündür. Negatif hacim modülü ($B < 0$), seçilen birim hücrelerde olması mümkündür. Poison oranı dayanıklılık limiti altında yeterince küçük olduğunda izotropik katılarda $B < 0$ elde edilebilir. Böyle malzemeler büyük olsalar bile katkılı olarak kullanıldığında band oluşumuna göre önceden kararlı olduğu tahmin edilebilir (Wang and Lakes, 2005). Bir malzemenin hacim modülü, ultrases dalga hızları cinsinden aşağıdaki gibi hesaplanır (Schenck, 1999; Nanekar and Shah, 2003; Flores, 2010).

$$B = \rho \left(\frac{V_L^2 - 4V_T^2}{3} \right) \quad (4.23)$$

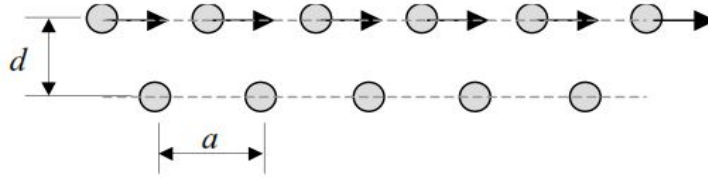
Lamé sabitleri kullanıldığında;

$$B = \lambda + \frac{2}{3}\mu \quad (4.24)$$

halini alır.

4. 5. Kayma Modülü

Malzeme biliminde kayma (Shear) modülü, kayma gerilimi ile kayma geriniminin oranı olarak tanımlanmaktadır. Genelde G olarak gösterilmektedir. Kayma modülü, ters yüzü sürtünme vb. gibi karşı bir kuvvetle karşılaşırken herhangi bir yüzeyi üzerine etki eden yük karşısında malzemenin özelliğine bağlı olarak göstermiş olduğu katının deformasyonu ile ilgilidir. Burada etki eden yüke karşı malzemenin gösterdiği direnç veya deformasyona rijitlik denir. Tahta, kâğıt, plastik gibi ve aynı zamanda özellikle bütün tek kristaller farklı yönlerde test edildiği zaman gerilim veya gerinime karşı farklı tepki gösterirler (Goldstein et al, 2012).



Şekil 4.3. a atomik uzaklığı ve d , düzlemlerarası uzaklık ile atomların iki düzlemi arasında meydana gelen bağlı kayma.

Bağlı kayma söz konusu olduğunda a , atomik uzaklığı ile ve d uzaklığı tarafından ayrılmış atomların iki bitişik düzlemi Şekil 4.3'de gösterilir. Bu herhangi bir yapıda meydana gelen deformasyon işlemindeki atomların düzlemleri arasındaki bağlı hareketin bir gösterimidir (O'Connor, 2002).

Örgüdeki maksimum veya kritik, kayma gerilimi kararsız hale gelir ki bu durum Kittel tarafından aşağıdaki formülle verilen tek yönlü deformasyon meydana gelir.

$$\tau_c = \frac{G_{ij}a}{2\pi d} \quad (4.25)$$

Burada, G_{ij} , hareket yönündeki kayma modülüdür. a , atomik mesafe ve d , kayma düzlemleri arasındaki mesafedir. G_{ij} , kayma modülünün kristalografik

ilişkisinden dolayı kristalografik yönelimin bir fonksiyonu olarak kritik kayma geriliminin değiştiği kolayca görülmektedir. Dolayısıyla kristalografik yönelimlerin bir fonksiyonu olarak elastik modülünü hesaplamak için kullanılan benzer yöntemler kullanılarak kolayca hesaplanabilir (Kittel, 1996).

Metallerin kayma modülü genellikle artan sıcaklıkla azalır. Aynı zamanda yüksek basınçlarda kayma modülü, uygulanan basınç ile artar. Erime sıcaklığı, enerji oluşum boşluğu ve kayma modülü arasındaki ilişkiler birçok metalde gözlemlenmiştir (March, 1996).

Kayma modülü ultrases hızı cinsinden,

$$G = \rho^2 v_s \quad (4.26)$$

ile verilir.

4. 6. Ultrasonik Yutulma

Ultrases dalgasının şiddeti, bir ortam boyunca ilerlerken dalganın ortamdaki parçacıklarla ve boşluklarla etkileşmesinden dolayı enerjisinde azalma meydana gelir. Bu kayıplar, ortamda meydana gelen kırınım, saçılma ve soğurulma olaylarından oluşur. Ultrases dalgasının hem saçılmadan hem de soğurulmadan dolayı oluşan azalması, yutulma (attenuation) olarak ifade edilmektedir. α_A , soğurulma katsayısı ve α_S , saçılma katsayısı olmak üzere yutulma katsayısı

$$\alpha(f) = \alpha_A(f) + \alpha_S(f) \quad (4.27)$$

eşitliği ile verilir. Ortam ile ultrasonik enerjinin absorpsiyonu; dislokasyon sönümü (kusurdan dolayı kayıp), elektron-fonon etkileşimi, fonon-fonon etkileşimi, magnon-fonon etkileşimi, termoelastik kayıplar ve bardoni gevşemesinden dolayı olabilir. Enerjinin saçılma kaybı, katkılar, çökelteler, çatlaklar, boşluklar, taneciklerin birbirinden farklı anizotropik özellikleri ile kristallenmenin rastgele yönelimlerine ve tanecik sınırlarına sahip polikristal katılar olması halinde oluşur (Pandey and Pandey, 2010; Szilard, 1982). Ultrasonik şiddet-enerji-genlik, kaynak ile eksponansiyel olarak azalır. Eğer I_0 , başlangıçta ortama verilen şiddet ise ortam içindeki x uzaklığındaki şiddet

$$I_x = I_0 e^{-\alpha x} \quad (4.28)$$

ile verilir. I_{x_1} ve I_{x_2} , x_1 ve x_2 uzaklığındaki ultrasonik dalgaların şiddeti ise denklem (4.28) göz önünde bulundurularak aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$I_{x_1} = I_0 e^{-\alpha x_1} \quad (4.29)$$

$$I_{x_2} = I_0 e^{-\alpha x_2} \quad (4.30)$$

Denklem (4.29) ve denklem (4.30)'un çözülmesi ile ultrasonik yutulmanın ifadesi kolayca elde edilir.

$$\alpha = \frac{1}{(x_2 - x_1)} \log_e \frac{I_{x_1}}{I_{x_2}} \quad (4.31)$$

Katılardaki ultrases dalgasının yutulmasının farklı sebepleri vardır. Bunların her biri, ilgili ortamın fiziksel özelliklerinin karakteristiğidir. Buna rağmen yutulmanın sebebinin tam içeriği her zaman tam anlamıyla anlaşılammıştır. Bununla birlikte yutulma, termoelastik gevşemeden dolayı kayıplardan, elektron-fonon etkileşiminden, fonon-fonon etkileşiminden, magnon-fonon etkileşiminden, örgü kusurlarından dolayı kayıplardan, tanecik sınır kayıplarından ve bardoni gevşemesi ve iç uyuşmazlıktan dolayı oluşan kayıplardan oluşmaktadır.

4. 6. 1. Elektron-Fonon etkileşiminden oluşan yutulma

Öz ısının Debye teorisi, örgü titreşimi ve serbest elektronlar arasındaki metallerde meydana gelen enerji değişimlerini ve aynı zamanda örgü titreşimleri, fonon olarak adlandırılan kuantum ve elektromanyetik titreşimler olarak aynı şekilde mümkün olan niceliklerin tahmin edilebilir olduğunu gösterir. Düşük sıcaklıklardaki elektronun ortalama serbest yolu, akustik fononun dalgaboyu ile karşılaştırıldığında elektro-fonon etkileşiminden dolayı ultrasonik absorpsiyon, düşük sıcaklıklarda meydana gelir. Böylece, etkileşimin çoğunluğu serbest elektronlar ve akustik fononlar arasında meydana gelir. Fermi enerji düzeyi, denge durumundaki elektron gazı için bütün yönler boyunca aynıdır yani fermi yüzey şekli küreseldir. Elektron gazı, düzenli olarak sıkıştırıldığı zaman, fermi yüzeyi küresel kalır. Elektron gazı boyunca boyuna

ultrasonik dalganın akışı, dalga yönünde aniden bir sıkışmaya (veya basıncını azaltma) neden olur ve bu yönde elektron hız bileşenleri ani tepki gösterir. Sonuç olarak fermi yüzeyi elipsoidal olur. Küresel dağılımı eski haline getirmek için elektron ve örgü arasında çarpışma meydana gelir. Ultrasonik dalganın sürekli değişen fazı, dağılımı bozduğu için bu bir gevşeme olayıdır. Bu yeni yaklaşımda normal durumdaki elektronların enerjisi, momentum transferi ile yani artan viskoz aracılığıyla örgü titreşimlerinden taşınır. Böylelikle mekanizma aynı zamanda elektron akışkanlık mekanizması olarak adlandırılır. Boyuna $(\alpha)_{long}$ ve enine dalgalar $(\alpha)_{shear}$ için elektron gazının kayma ve sıkışma viskozitesinden dolayı enerji kaybına sebep olan ultrasonik attenuation aşağıdaki gibi verilir (Pandey and Pandey; 2010).

$$(\alpha)_{Long} = \frac{\omega^2}{2dV_L^3} \left(\frac{4}{3} \eta_e + \chi \right) \quad (4.32)$$

$$(\alpha)_{Shear} = \frac{\omega^2}{2dV_S^3} \left(\frac{4}{3} \eta_e \right) \quad (4.33)$$

Burada η_e ve χ elektron gazının elektronik kayma (shear) ve sıkışma viskozitesini temsil eder.

4. 6. 2. Fonon- Fonon etkileşiminden oluşan yutulma

Fonon mekaniksel dalganın enerji kuantumu olarak adlandırılır. Ultrasonik dalgalarının (akustik fononlar) akışı ile katıdaki termal fononların denge dağılımı bozuldu. Termal fononların denge durumunun yeniden kazanılması, gevşeme işlemi tarafından devam ettirildi. İşlem, soğurulma sonucu ile üretilen entropi'dir. Modüle edilmiş termal fononlar kavramı, ultrasonik dalganın soğurulma katsayısı için katılardaki fonon-fonon etkileşiminden dolayı aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$\alpha_{Akh} = \alpha_{PP} = \frac{\omega^2 \tau \Delta C}{2dV^3 (1 + \omega^2 \tau^2)} \quad (4.34)$$

Burada τ , termal gevşeme zamanıdır (termal fononların yeniden kazanılması için gerekli olan zaman) ve V , boyuna veya enine dalga hızıdır. ΔC , gerilim ile oluşan elastik modülündeki değişimdir ve aşağıdaki gibi verilir.

$$\Delta C = 3E_0 \langle (\gamma_i^j)^2 \rangle - \langle \gamma_i^j \rangle^2 C_v T \quad (4.35)$$

Burada E_0 , termal enerji yoğunluğudur. ΔC , akustik bağlayıcı sabiti (D) ile ilgilidir ki gevşeme işleminden dolayı termal enerjiyi akustik enerjiye dönüştüren ölçümdür ve aşağıdaki ifade ile verilir (Pandey and Pandey, 2010; Sing and Pandey, 2009).

$$D = \frac{3\Delta C}{E_0} = 9 \langle (\gamma_i^j)^2 \rangle 3 \langle \gamma_i^j \rangle^2 \frac{C_v T}{E_0} \quad (4.36)$$

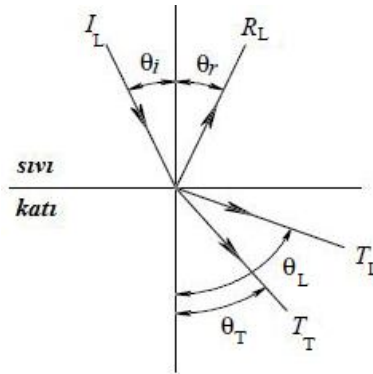
(4.36) denklemi ve (4.34) denklemi kullanılarak $\omega\tau \ll 1$ şartı altında aşağıdaki şekli alır.

$$\alpha_{Akh} = \alpha_{pp} = \frac{\omega^2 \tau E_0 D}{6dV^3} \quad (4.37)$$

4. 7. Ultrases Dalgalarının Yansıma ve Kırılması

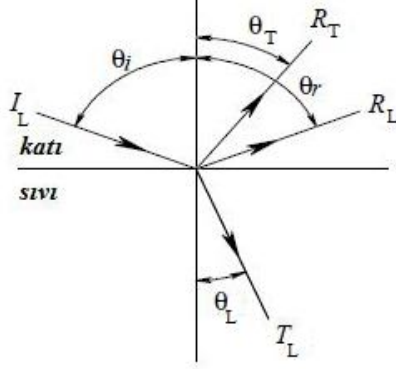
Ultrases dalgalarının katı-SIVİ ortamı için üç farklı durumun her bir olası yönelimi düşünülmelidir: sıvı-katı ara kesitine gelen (i) boyuna dalga, katı-sıvı ara kesitine gelen (ii) boyuna (iii) enine dalga.

a) Sıvı-Katı



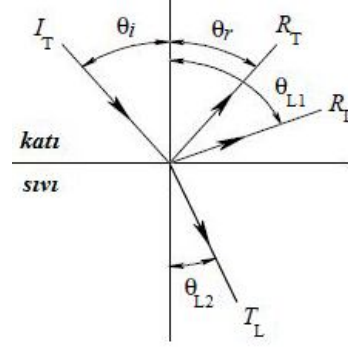
b) Katı-sıvı

(Boyuna geliş açısı)



c) Katı-sıvı

(Enine geliş açısı)



Şekil 4.4. Sıvı-katı ve katı-sıvı arayüzeydeki yansıyan ve kırılan dalgaları (Nagy, 1999).

Sıvı ortamdan katı ortama geçen boyuna dalga (I_L), yansıyan boyuna dalga (R_L) ve geçen boyuna dalga (T_L) olmak üzere ikiye ayrılır. Ancak ikinci ortamın katı olmasından dolayı geçen dalgalar boyuna ve enine dalga olarak ikiye ayrılır. θ_T ve θ_L sırasıyla enine ve boyuna dalganın normalle yapmış oldukları açıdır.

Katı ortamdan sıvı ortama gelen boyuna dalga (I_L) ve enine dalgalar (I_T), iki tanesi yansıyan ve iki tanesi geçen olmak üzere dört kola yararılır. “ R_L ” gelen dalganın boyuna yansıyan dalganın da boyuna olduğunu, “ R_T ” gelen dalganın enine, yansıyan dalganın enine olduğunu gösterir. Geçen dalgalara baktığımızda ise “ T_L ” gelen dalganın boyuna, geçen dalganın da boyuna olduğunu, “ T_T ” ise gelen dalganın enine, geçen dalganın da enine olduğunu gösterir (Şekil 4.4). Bu dalgaların yansıma ve kırılma açıları Snell kanunu ile optikte olduğu gibi hesaplanır.

Deneyimizde daldırma yöntemi için bu üç durumda kullanılacaktır.

BÖLÜM 5

MATERYAL VE METOT

Bu bölümde deneysel çalışmalarda kullanılan metotlar ele alınarak bu metotlar kapsamında kullanılan seramik ve metalik tozların özellikleri ile deneysel ekipmanlar açıklanmıştır.

Deneysel aşama üç bölümden oluşmaktadır. İlk bölümde numune oluşturulması, ikinci bölümde ultrases ölçümleri ve üçüncü bölümde termal iletkenlik ölçümleri yapılmıştır. Bu aşamalarda kullanılan yöntemler ve cihazlar aşağıda özetlenmiştir.

5. 1. Numune Oluşturulması

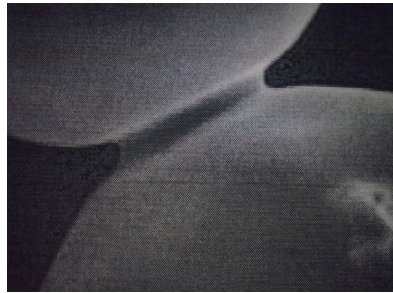
Numune oluşturma işleminde toz metalurjisi yöntemi kullanılmıştır. Toz metalurjisi, metal tozların ya da alaşımlanmış tozların bağlayıcılar ve yağlayıcılarla birlikte harmanlanarak uygun yöntemler ve sıcaklıklar kullanılarak istenilen şekillerde üretilmelerini içeren bir malzeme üretim yöntemidir. Toz metalurjisinin amacı, metal ve metalik alaşım tozlarından mekanik ve fiziko-kimyasal yöntemlerle, basınç ve sıcaklık yardımı ile malzeme üretmektir (Erdoğan, 2011).

Malzeme üretimi toz metalurjisi yöntemi ile genel olarak üç aşamada gerçekleştirilir: tozların karıştırılması, preslenmesi ve sinterlemesi. Tozların karıştırılmasında ilk yapılması gereken üretilecek malzemenin bileşimini oluşturan tozların seçilmesidir. Toz seçiminde ise tozların şekli, yapısı, boyutu, saflığı ve diğer özellikleri önemli yer tutmaktadır. Bu özellikler, presleme işlemini ve sinterleme işlemini oldukça etkilemektedir. Hazırlanan toz karışımları daha sonra bir mukavemet kazanacak şekilde kalıp yardımı ile sıkıştırılarak preslenirler (German, 1996).

Preslenmiş olan toz taneciklerinin sıcaklık yardımıyla birleştirilmesi işlemine sinterleme denir. Sinterleme işlemi sırasında toz parçacıkların yüksek yüzey enerjileri

aşılarak, parçacıkların tam, kararlı ve mükemmel bağlar oluşturması sağlanır. Böylelikle numunenin iç yapısındaki gözeneklilik sifıra yaklaşır. Toz parçacık çapının tersiyle hacim başına düşen yüzey enerjisi doğru orantılı olduğundan dolayı küçük toz parçacıkları daha kolay sinterlenmektedir (Boz, 2003).

Sinterleme esnasında bazı olaylar meydana gelir. Bunlar; oksit indirgenmesi, bağlayıcıların kaldırılması veya kimyasal reaksiyondur. Sinterleme işlemi, birbirine temas eden parçacıkların yüksek sıcaklıklarda birbirlerine daha çok bağlanmasını sağlar. Sinterleme şekillerinin hepsinde var olan ortak bir özellik ise tane yüzey alanında meydana gelen bir azalma ve buna bağlı olarak parçacık mukavemetinin artmasıdır. Bu durum sinterleme sıcaklığındaki atomik hareketlerin neden olduğu parçacıklar arası bağların oluşumu ile meydana gelir. Çoğu durumda sıvı faz oluşumu ile birlikte gerçekleşir. Sinterleme işlemi sırasında hızlı bir yoğunlaşmanın olabilmesi için partikül boyutu göreceli olarak küçük seçilmesine dikkat edilmelidir. Seçilen bu küçük boyuttaki partiküllerle bağlanma, temas eden parçacıklar arasında boyunlaşma ile kendini gösterir. Boyunlaşma, dayanıklılığın ham dayanıklılığa oranla artmasını ve diğer birçok faydalı özelliğin gelişmesini sağlar. Şekil 5.1’de sinterleme esnasında birbirine temas eden parçacıkların temas ettiği noktada boyun oluşumunun ilk safhası görülmektedir (Erdoğan, 2011).



Şekil 5.1. Metal tozunun sinterlenmesi sırasında boyun oluşumunun ilk safhaları (Erdoğan, 2011).

Malzeme karakterizasyonunda ultrases kullanılarak numune boyutlarının belirlenmesi, numune yüzey genişliğinin tespit edilmesi, numune kalınlığı ve numune yüzeyinin pürüzsüzlüğü dikkat edilmesi gereken önemli unsurlardandır. Kullanılan numunenin çok kalın ya da çok ince olması ultrases ölçümlerinde istenmeyen bir durumdur. Numune yüzeyinin yeterince geniş olmaması durumunda elde edilecek olan spektrumda aynı ölçüde istenmeyen ve bilinmeyen pikler gözlemleneceğinden bu özellikler dikkate alınarak seramik ve metal tabanlı kompozit numuneler hazırlandı. Seramik tabanlı numuneler için WC-Co-Ni, WC-Co-Ti ve WC-Fe-Ti kompozitleri, metal tabanlı numuneler için Fe-Co-Ni, Fe-Cr-Ni ve Fe-Ti-Ni kompozitleri üretilmiştir.

5. 1. 1. Kullanılan kimyasal tozlar

Deneysel çalışmalarda seramik tabanlı kompozit numuneleri hazırlamak için WC tozu, metal tabanlı kompozit numuneleri hazırlamak için de Fe tozu taban malzemesi olarak ve bağlayıcı faz olarak Fe, Co, Ni, Cr ve Ti tozlarından iki tanesi seçilerek kullanılmıştır.

5. 1. 1. 1. Tungsten karbür (WC)

Bu çalışmada 10µm tane boyutunda ve %99,5'lik saflıkta seramik toz olarak tungsten karbür (WC) tozu kullanılmıştır. Kompozit üretiminde kullanılan bu toz Alfa Easer firmasından sağlanmıştır. Alfa Easer'dan alınan malzemelerin özellikleri Çizelge 5.1 de verilmiştir.

WC tozları köşeli, düzgün açılı ve keskin kenarlı partiküllerdir. Tungsten karbür, yüksek ısıda tungsten ve hidrokarbonun karışımı sonucu oluşmaktadır (Kosolapova, 1971).

Çizelge 5.1. Tungsten Karbür tozunun malzeme özellikleri (Alfa Easer, 2012; MEMSnet, 2012).

Malzeme	WC
Molekül Ağırlığı (gr/mol)	195.851
Yoğunluk(g/cm ³)	15.63
Ergime Sıcaklığı (° C)	2870
Kaynama Sıcaklığı (° C)	6000
Kristal Yapısı	Hegzagonal
Termal İletkenlik (20° C) (W/m.K)	84.02

5. 1. 1. 2. Demir (Fe)

%97 saflıkta ve tane boyutu -325 mesh olan demir tozu Sigma Aldrich Materials firmasından sağlanmıştır. Malzeme ile ilgili özellikler Çizelge 5.2’de verilmiştir.

Çizelge 5.2. Demir tozunun özellikleri (Sigma Aldrich, 2012; MEMSnet, 2012).

Malzeme	Fe
Molekül Ağırlığı (gr/mol)	55.85
Yoğunluk(g/cm ³)	7.860
Ergime Sıcaklığı (° C)	1535
Kaynama Sıcaklığı (° C)	2750
Kristal Yapısı	Cisim merkezli kübik (bcc)
Termal İletkenlik (20° C) (W/m.K)	80.4

5. 1. 1. 3. Kobalt (Co)

Alfa Easer firmasından %99,5 saflıkta ve tane boyutu-325 mesh olan kobalt tozu alınmıştır. Kobalt tozunun özellikleri Çizelge 5.3’te verilmiştir.

Çizelge 5.3. Kobalt tozunun özellikleri (Alfa Easer, 2012).

Malzeme	Co
Molekül Ağırlığı (gr/mol)	58.933195
Yoğunluk(g/cm ³)	8.92
Ergime Sıcaklığı (° C)	1495
Kaynama Sıcaklığı (° C)	2927
Kristal Yapısı	Hegzagonal
Termal İletkenlik (20 ° C) (W/m.K)	100

5. 1. 1. 4. Nikel (Ni)

%99,8 saflıkta ve -325 mesh boyutuna sahip olan nikel tozu kullanılmış ve Alfa Easer firmasından temin edilmiştir. Özellikleri Çizelge 5.4'te verilmiştir.

Çizelge 5.4. Nikel tozunun özellikleri (Alfa Easer, 2012; MEMSnet, 2012).

Malzeme	Ni
Molekül Ağırlığı (gr/mol)	58.6934
Yoğunluk(g/cm ³)	8.908
Ergime Sıcaklığı (° C)	1455
Kaynama Sıcaklığı (° C)	2732
Kristal Yapısı	Yüzey merkezli kübik (fcc)
Termal İletkenlik (20 ° C) (W/m.K)	90.9

5. 1. 1. 5. *Krom (Cr)*

Alfa Easer firmasından alınan krom tozu %99 saflıkta ve -325 mesh tane boyutundadır. Malzeme ile ilgili özellikler yine aynı firma tarafından Çizelge 5.5'te verilmiştir.

Çizelge 5.5. Krom tozunun özellikleri (Alfa Easer, 2012).

Malzeme	Cr
Molekül Ağırlığı (gr/mol)	51.9961
Yoğunluk(g/cm ³)	7.19
Ergime Sıcaklığı (° C)	1907
Kaynama Sıcaklığı (° C)	2671
Kristal Yapısı	Cisim merkezli kübik (bcc)
Termal İletkenlik (20° C) (W/m.K)	93.9

5. 1. 1. 6. *Titanyum (Ti)*

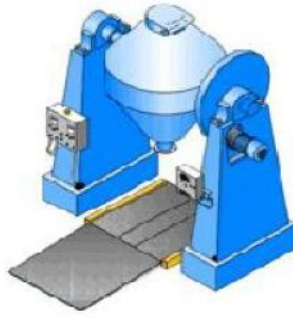
% 99 saflıkta ve -325 mesh tane boyutuna sahip titanyum tozu kullanılmıştır. Toz, Alfa Easer firmasından sağlanmıştır ve Çizelge 5.6'de malzemenin özellikleri verilmiştir.

Çizelge 5.6. Titanyum tozunun özellikleri (Alfa Easer, 2012).

Malzeme	Ti
Molekül Ağırlığı (gr/mol)	47.88
Yoğunluk(g/cm ³)	4.506
Ergime Sıcaklığı (° C)	1668
Kaynama Sıcaklığı (° C)	3277
Kristal Yapısı	Hegzagonal
Termal İletkenlik (20° C) (W/m.K)	21.9

5. 1. 2. Karıştırıcı

Kompozit numunelerin üretimi için kullanılacak olan kimyasal tozlar ilk önce mekanik olarak harmanlayıcıda karıştırılmıştır. Belirlenen miktarlarda alınan tozlar 20 dv/dk. hız da dönen karıştırıcıda 24 saat süre ile homojen karışım elde edebilmek için karıştırılmıştır.



Şekil 5.2. İki konili karıştırıcı.

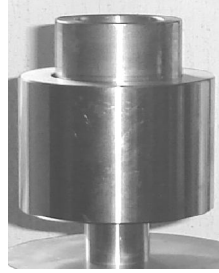
5. 1. 3. Hidrolik pres

Oda sıcaklığında ve özel olarak hazırlanmış olan çelik kalıp kullanılarak presleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan toz karışımları oda sıcaklığında hidrolik preste 20MPa basınçta preslenmiştir.

Çalışmalarda kullanılmak üzere, Şekil 5.3'de görüldüğü gibi 50mm x 80mm boyutlarında silindirik kalıp yaptırılmıştır. Silindir kalıpta tozların konulacağı kısım 15mm çapında silindir şeklindedir ve kullanılacak transdüserler için en uygun minimum çaptır.

5. 1. 4. Tüp fırın sinterleme

Sinterlenecek tozlar kalıpta 3-5mm yüksekliğinde silindir şekline getirilerek tüp fırına (Şekil 5.4) yerleştirilmiştir. Preslenen numuneler akan Argon gazı ile atmosfer ortamında dakikada 10°C artırılarak ısıtılıp hedeflenen sıcaklık değeri olan 1000°C’de 2 saat bekletilerek sinterlenmiş ve doğal olarak soğumaya bırakılmıştır. Numune silindirik tablet olarak üretilmektedir. Çapı 15mm, yüksekliği ise malzeme yoğunluğuna bağlı olarak 3–5 mm arasında değişmektedir.



Şekil 5.3. Numune hazırlamada kullanılan silindir biçimindeki çelik kalıp.



Şekil 5.4. Argon gazı atmosferinde sinterleme işlemi için kullanılan tüp fırın.

5. 1. 5. Hassas terazi

Sinterleme öncesi ve sinterleme sonrası numunelerin ağırlıkları, elastik özelliklerin hesaplanmasında kullanılacak numune yoğunluklarını hesaplamak amacıyla Precisa marka elektronik hassas terazi ile ölçülmüştür (Şekil 5.5).



Şekil 5.5. Elektronik hassas numune tartım cihazı.

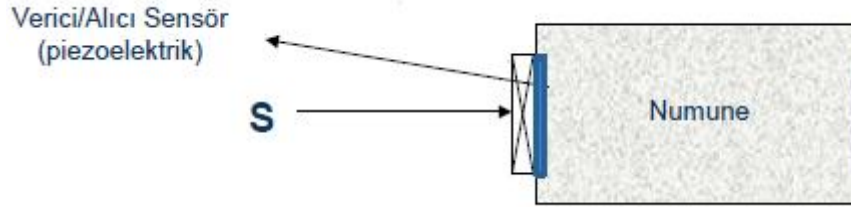
5. 2. Ultrases Ölçümleri

Yapılan çalışmada Ultrases ölçümleri için iki önemli yöntem kullanılmıştır: Darbe-yankı yöntemi ve İmmersiyon yöntemi.

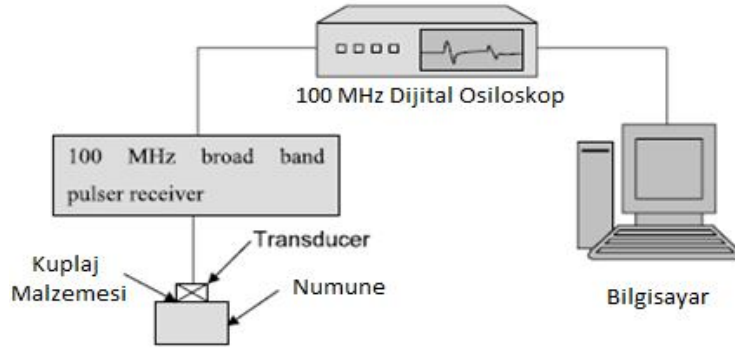
5. 2. 1. Darbe-yankı yöntemi

Darbe-yankı yöntemi malzemelerin ultrases muayenesinde en çok tercih edilen yöntemlerden biridir. Bu yöntemde bir transdüser hem alıcı hem de verici olarak görev yapar. Çok kısa elektrik sinyallerinin transdüserine uygulanmasıyla elde edilen ultrases dalgası malzeme içine gönderilir. Ultrases dalgası malzeme içinde ilerlerken aynı transdüser alıcı olarak çalışmaya başlar. Numunenin arka cidarından yansıyan ultrases dalgası transdüserine ulaştığında mekanik titreşimler elektrik sinyallerine dönüştürülür. Böylelikle ultrases dalgalarının azalan genlikte malzeme içinde yansımalarıyla ekranda bir dizi ardışık arka cidar yankıları meydana gelir (Güzel, 1996).

Verici sensöre çok kısa aralıkla darbe sinyalleri gönderilir ve bu darbe sinyalleri malzeme içerisinde giderek ve gelerek zamana bağlı olarak sönümlenir. Alıcı sensör yüzeyine gelen darbe sinyalleri ölçülerek darbelerin hangi alıcı üzerine geldiği süresi ölçülür. Sesin gönderildiği yüzeyin mesafesi de ölçülerek buradan malzeme içerisindeki sesin hızı hesaplanabilir. Malzeme yüzeyleri birbirine paraleldir. Yüzeyler sensörler ile tam temas halinde olabilmesi için yeterince temiz ve pürüzsüz olmalıdır. Alıcı ve verici sensörler malzeme yüzeyine bir bağlayıcı eleman kullanılarak monte edilir (Şekil 5.6). Şekil 5.7’de darbe-yankı yönteminin deneysel kurulumu verilmiştir.



Şekil 5.6. Darbe-Yankı yönteminin şematik gösterimi.



Şekil 5.7. Darbe-yankı yönteminin deneysel kurulumunun şematik gösterimi (Kumar, 2003).

Hız ölçümleri, transdüser ile numuneye gönderilen ultrases dalgasının ekrandaki A-Tarama görüntüsünde ön ve arka yüzeyden gelen yansıma pikleri ile elde edildi. Dalgaların malzemenin diğer yüzüne gidip gelmesi ile elde edilen bu pikler için geçen zaman $\Delta t(\mu s)$ cinsinden osiloskop ekranından tespit edilmiştir. Her bir malzeme

yüzeyi için bu işlem 5'er kez tekrarlanarak ortalama geçiş süresi belirlenmiştir. Malzemelerin kalınlıkları dijital kumpas yardımıyla farklı farklı yönlerde ölçüm alınarak ortalama kalınlıkları ölçülmüştür. Malzemelerin kalınlıkları, boyuna ve enine dalgaların malzemelerden geçiş süreleri tespit edildikten sonra denklem (5.1)' de yerine konularak ultrasonik boyuna dalga hızları, enine dalga hızları *m/s* biriminden hesaplanmıştır.

$$V = \frac{2d}{t} \quad m/s \quad (5.1)$$

5. 2. 2. Daldırma yöntemi

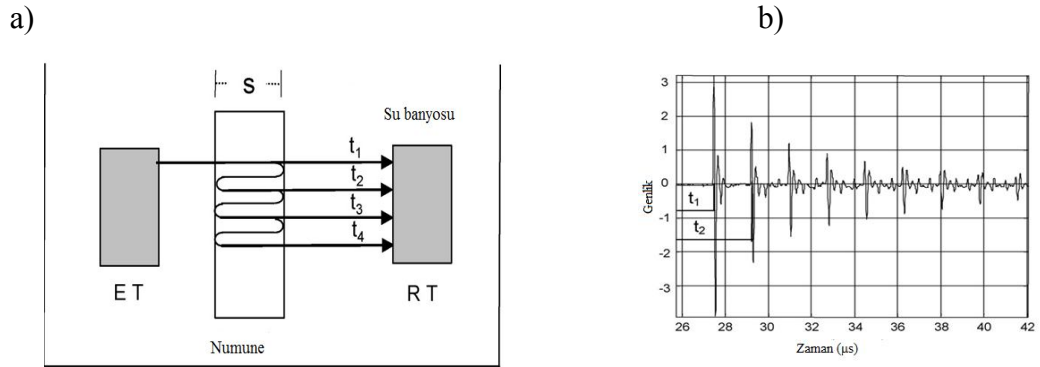
Üretilen kompozit numunelerin boyuna ve enine ultras hızları yeni bir teknik olarak daldırma (immersion) yöntemi ile de aynı anda ölçülmüştür. Daldırma deney sisteminde incelenen numune ve transdüser bir su tankı içinde bulunmaktadır. Bu yolla, transdüser malzemeyi doğrudan temas olmaksızın tarayabilir ve saf su da bağlayıcı olarak görev yapar. Transdüser, numuneden birkaç cm uzaklıkta yerleştirilir. Ultras hız dalgası bileşene gelmeden önce su içinde hareket eder.



Şekil 5.8. Daldırma yönteminin deneysel kurulumu.

Bu çalışmada numunelerde “Daldırma” ve “Darbe-yankı” metodunu birleştiren bir sistem geliştirilerek numunelerin su içinden geçiş sürelerine ve ultras hız dalgasının

numune içine açılı gelmesi durumunda numune içinde kip değişimine dayanan ve bu verilen yöntem ile kendi laboratuvarımızda bulunan cihazla numunelerin hem boyuna hem de enine ultrases hızları ölçülmüştür. Daldırma tekniği tarafından yapılan ölçümlerde numuneye dik gelen dalgalarla boyuna hız ve normale göre eğik gelen dalgalarla enine hız hesaplanmıştır. Bütün ölçümler ~15mm çaplı ve 5 MHz merkez frekanslı geniş bantlı iki transdüser ile yapılmıştır. Boyuna hız ölçümlerinin ve enine hız ölçümlerinin belirlenmesi için deneysel kurulum Şekil 5.8’de gösterilmiştir.

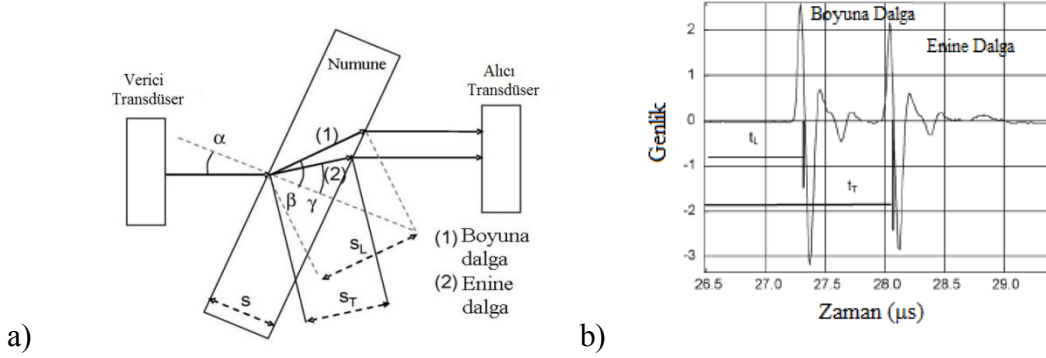


Şekil 5.9. Boyuna hız ölçümü için daldırma yönteminde (a) ultrases dalgalarının izlediği yollar ve (b) iletilen boyuna dalgaların çeşitli ekoları (Bueno et al., 2008).

Ultrases dalgası ilk olarak numuneye dik açı ile iletilir ve daha sonra numunenin iki yüzeyi arasında ard arda yansıtılır. Şekil 5.9’da gösterilen t_1 geçiş süresi, numune boyunca iletilen dalganın yayılım zamanıdır ve t_2 , t_3 ve t_4 ise ilk üç geri yansımanın geçiş süresidir. İki ardışık yansıma arasında ölçülen ortalama gecikme süresi, $\Delta t = t_n - t_{n-1}$ ve bilinen bir s numune kalınlığı ile numunenin boyuna hızı $V_L = 2s/\Delta t$ ’dir.

Deneysel düzende kullanılan su içerisinde yayılan bir ultrases dalgası normalle belirli bir geliş açısı yapacak şekilde katı cisme eğik olarak çarptığında gelen dalga numune içerisinde enine ve boyuna dalga olarak ayrılır. Böylece elde edilen enine ve boyuna dalga üzerinden gerekli ölçümler yapılmıştır. Numune, transdüserlerin her ikisi

arasına yerleştirildiğinde parçadan geçen dalganın aldığı yol ve geçiş süresi kullanılarak transdüserler arasındaki su içinde hareket eden dalga için geçen süre alınıp ve sudaki hız tespit edilmiştir. Şekil 5.10'da enine hız ölçümünün deneysel kurulumu gösterilmiştir.



Şekil 5.10. Enine hız ölçümü için daldırma yönteminde (a) ultrases dalgalarının izlediği yollar ve (b) enine ve boyuna dalgaların iletimi (Bueno et al., 2008).

Ultrasonik dalga bu çalışmada kullanılan su gibi bir sıvı ile iletildiği zaman dik bir geliş açısı ile katı cisme eğik olarak çarpar ve gelen dalga boyuna ve enine dalga olarak ikiye ayrılır. Bu iki dalga katı malzeme ve sıvı arasındaki karşı arayüze ulaştığında iki boyuna ses dalgası oluşur. Dolayısı ile cisim yüzeye paralel ise bu boyuna dalgalarda paraleldir. Şekil 5.10 sadece iletilen dalgalar gösterilmiştir. Kolaylık olsun diye yansıyan dalgalar dikkate alınmamıştır. Burada enine hız ölçümleri için genel bir denklem kullanılmıştır.

$$V_T = \frac{d}{t - t_w + (d/V_w)} \quad (5.2)$$

Burada d , numune içinde dalganın aldığı yol, t , her iki transdüser arasında numune yerleştirildiği zaman iletimin süresi, t_w , transdüserler arasındaki su boyunca hareket eden dalga için alınan süre ve V_w , ise su içindeki hızıdır.

5. 2. 3. Bilgisayar kontrollü pulser/receiver

Ultrases ölçümlerinde Olympus marka bilgisayar kontrollü pulser-receiver 5800 model Panametrics NDT kullanılmıştır (Şekil 5.11).

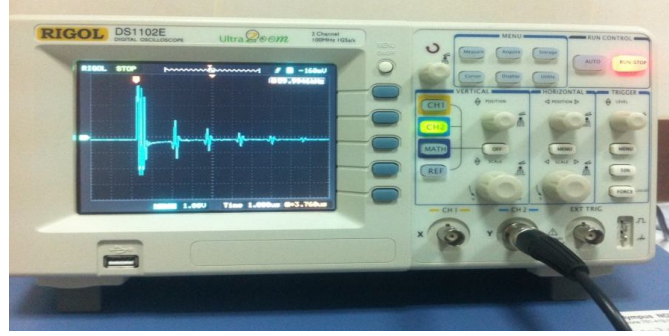


Şekil 5.11. Ultrases ölçümlerinde darbe-yankı yöntemi için kullanılan pulser-receiver.

Şekil 5.11’de verilen 0,1-150 MHz (M/s. Olympus) geniş bantlı pulser/receiver, ultrases dalgaları oluşturmak için ve transdüser’a elektriksel sinyal vermek için kullanılmıştır. 5800 Model Pulser/Receiver’da bilgisayar kontrollü dalga üreteçler hem konvansiyonel hem de yüksek frekans uygulamaları için tasarlanmıştır. Herbir modelde düşük gürültülü alıcı ve yüksek performanslı dalga üretici bulunmaktadır. Uygun prob ve analog veya dijital osiloskop ile kullanıldığında, Panametrics Dalga üreteçleri ile hata tayini, kalınlık ölçümü, malzeme karakterizasyonu ve prob karakterizasyonu yapılabilmektedir.

5. 2. 4. Dijital osiloskop

Ultrases ölçümlerinde pulser/receiver ile birlikte iki kanallı Rigol marka DS1102E 100 MHz dijital osiloskop kullanılmıştır (Şekil 5.12).

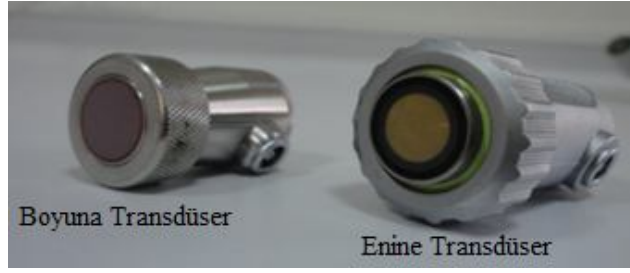


Şekil 5.12. Pulser/receiver ile kullanılan dijital osiloskop.

5. 2. 5. Transdüser

Piezoelektrik kristallerden oluşan transdüser, mekanik dalgalar oluşturur ve kalınlık boyunca elektriksel pulsun uygulanması ile titreşir. Boyuna dalga transdüser için piezoelektrik kristal, elektrik eksenini dik keser (*X-cut* kristalleri) ve burada elektriksel puls, kalınlık yönünde uygulandığından kalınlık yönündeki kristal titreşir (yani numune yüzeyine dik) ve transdüser'e bağlı olan numunede boyuna dalga oluşturur. Enine dalga transdüser için ise, piezoelektrik kristal mekanik eksenini dik keser (*Y-cut* kristal) ve burada elektriksel puls, kalınlık yönünde uygulandığından genişlik yönünde kristal titreşir (yani numune yüzeyine paralel) ve böylece transdüser'a bağlı olan numunede enine dalga oluşur (Kumar, 2003).

Numunelerin darbe-yankı yönteminde boyuna ultrases dalga hızlarının ölçülmesinde 4 MHz alıcı/verici boyuna prob (Sonatest SLH4- 102 T010506) ve enine ultrases dalga hızlarının ölçülmesinde 4 MHz (T/R) alıcı/verici enine prob (GE Inspection Technologies MB 4Y 66100541) kullanılmıştır. Daldırma yönteminde ise boyuna ultrases dalga hızlarının ve enine ultrases dalga hızlarının ölçülmesinde su içinde çalışabilen 5 MHz alıcı/verici prob (GE Inspection Technologies Z4K 53342-2324) kullanılmıştır (Şekil 5.13).



Şekil 5.13. Numune ölçümlerinde kullanılan boyuna ve enine transdüserler.

5. 2. 6. Bağlayıcı sıvı

Transdüserden numuneye sesin geçişini kolaylaştırmak için transdüser ile numune arasına bir sıvı (gliserin, gres yağı, gaz yağı, duvar kâğıdı macunu, ılık ağda, bal ve özel jeller) uygulanır. Bu sıvılara bağlayıcı sıvı denilmektedir. Kullanılan bu sıvıların malzemeye ve problara zarar vermemesi gerekir (Hellier, 2001). Yapılan çalışmada proplarla numune arasında kuplaj sıvısı olarak Sonatest Sonagel-W sıvı jeli kullanılmıştır (Şekil 5.14).



Şekil 5.14. Hız ölçümlerinde kullanılan bağlayıcı sıvı.

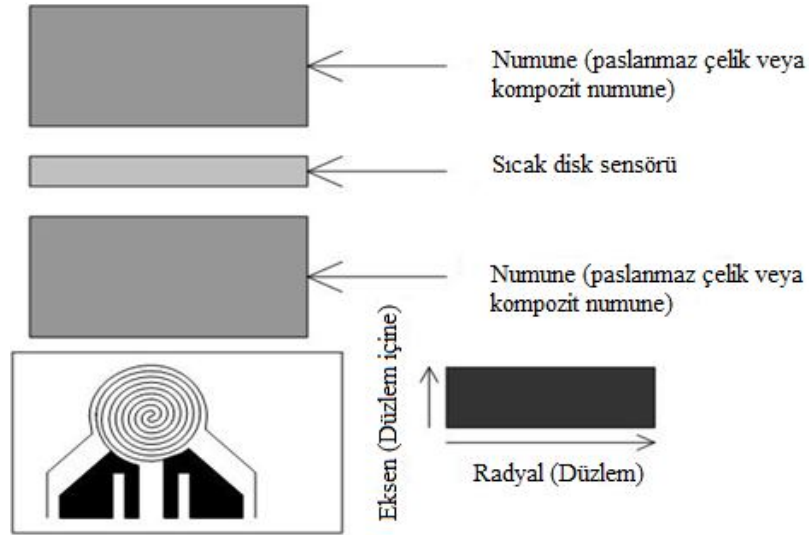
5. 3. Termal İletkenlik Ölçümü

Termal iletkenlik ölçümü için farklı yöntemler bulunmaktadır. Bu yöntemler, sıcak tel yöntemi, lazer puls yöntemi, doğrusal ısı kaynağı yöntemi, DSC (differential scanning calorimeter) ile ölçüm yöntemi ve sıcak disk yöntemi'dir. Bu yöntemlerden sıcak disk yöntemi bu çalışmada kullanılmıştır.

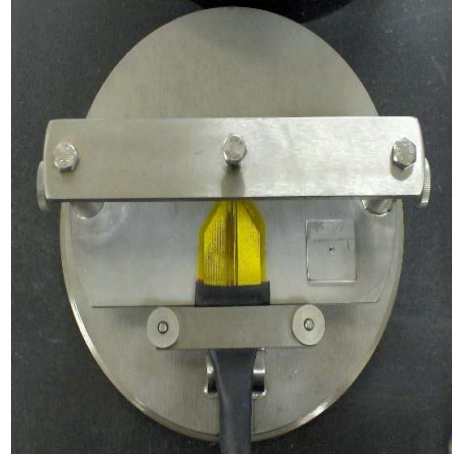
Termal iletkenlik ölçümleri, Hotdisk TPS 500 Termal İletkenlik Cihazı ile Süleyman Demirel Üniversitesi'nde alınmıştır. TPS 500; 100°C ile 200°C sıcaklık aralığında katılar, macunlar, sıvılar ve tozlar üzerinde ısıl iletim özellikleri ölçmektedir. Yöntem tahribatsızdır ve gözenekli, şeffaf numunelerin ölçümleri kolay, anlık ve tamamen tutarlı ısıl iletkenlik ölçümleri söz konusudur. Geçici düzlem kaynak tekniğinin temel alındığı Sıcak disk termal sabit analiz cihazı, çift spiral biçiminde bir sensör elementi ile kullanılır. Bu Sıcak disk sensörü, hem numunenin artan sıcaklığı için bir ısı kaynağı hem de zamana bağlı sıcaklık artışının kaydedilmesi için "direnc termometresi" olarak kullanılır. Sensör içindeki folyo malzemesi, çoğu durumda direncin yüksek sıcaklık durumundaki katsayısından ziyade çok iyi bilinen bir metal olan Nikel'dir. Sensör, sadece ısı kaynağı olarak değil aynı zamanda geçici kayıtlar boyunca sıcaklık sensörü olarak da kullanıldığı için bu çok önemlidir. Çoğu durumda sensör elementi tam olarak tasarlanan boyutları ile 10 μ m kalınlığında Nikel metal çift sarmaldan oluşmaktadır. Bu sarmal, mekanik güç veren ve elektrik yalıtımını tutan kendine özgün şeklini korumaya bilmek için bir malzeme ile desteklenmiştir. Bu malzeme "Kapton" polimid ve 10K ile 500K sıcaklık aralığı boyunca kullanılabilen bir malzemedir. Ayrıca bir Mika malzemesi de sıcaklık aralığının üst sınırı 1000K kadar uzatılması durumunda, desteklenen ve yalıtılan malzeme olarak da kullanılabilir. Yalıtım malzemelerinin ince levha çalışmaları için tasarlanmış sensör, yalıtımsız paralel şeritlerden oluşmaktadır (Şekil 5.15).

Şekil 5.15'te sol alt tarafta iki disk arasına yerleştirilmiş olan çift sarmal ısıtma sensörü gösterilmektedir. Paslanmaz çeliğin iki dikdörtgen bloklar arasına bu sensör sabitlenmeden önce yalın şeritlerin her iki kenarında çalışma yapılacak yalıtım tabakalarını yerleştirmek böylelikle daha kolaydır. Etrafı kapsülle çevrili Ni-sarmal

sensör numune (tozlar, sıvılar) içine yerleştirilmiş olacaktır ya da numunenin ilk yarısı (katı numuneler) arasına daha sonra sıkıştırılmıştır. Bu normal olarak 15 dakikalık bir gevşeme süresi göz önüne alınarak elde edilmiştir. Yalın şeritler ve paslanmaz çelik bloklar arasında herhangi bir şekilde istenmeyen elektriksel bir kontakı önlemek için ince numune parçaları en az $40 \times 50 \text{ mm}^2$ boyutuna sahip olan bloklar ve şeritler arasına yerleştirilmiş olmalıdır. Sıcak disk ölçümü boyunca spiral nikel telden yapılan sıcak disk sensörleri iki yarım metal blok arasına sandviçlenmiş olacak şekilde yerleştirilir. Paslanmaz çelik bloklar ve ince numune parçaları ile sensör parçalarını birleştirmeye başlamadan önce sensörün hassas merkez alanı üzerindeki herhangi bir gerilimden kaçınmak için sensör son konumunda sıkıca sabitlenmiş olmalıdır. Sensöre küçük bir elektrik akımı sağlanır. Numune kısa zaman periyotları için elektrik akımı ile ısıtılır. Dağılan ısı her iki sensörde ve numunede sıcaklık yükselişine sebep olan bir mekanizma ile yayılır. Deneysel çalışmada kullanılan TPS 500 Sıcak Disk Termal Sabit Analiz cihazı ve tutucuları Şekil 5.16 ve Şekil 5.17 gösterilmiştir.



Şekil 5.15. Sıcak disk için sensör ve numunenin şematik gösterimi.



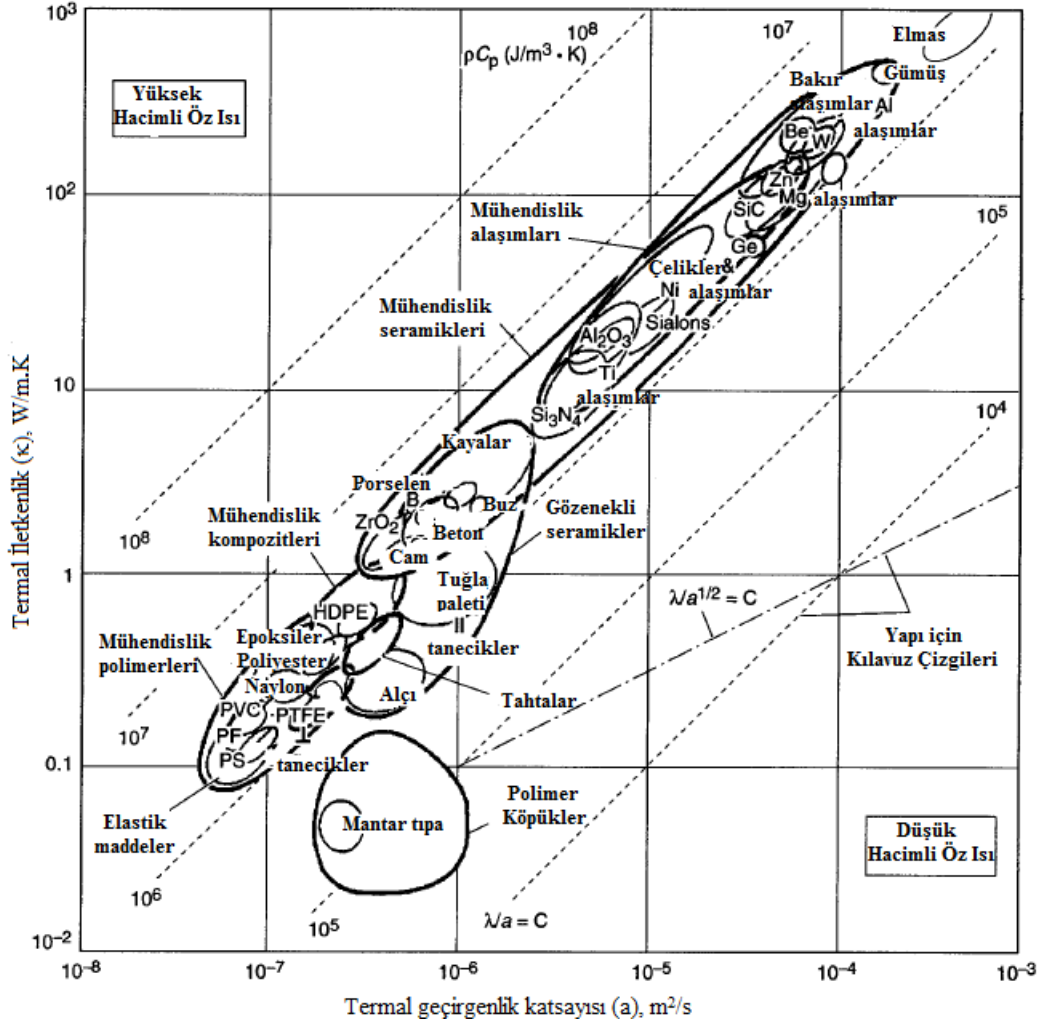
Şekil 5.16. Sıcak disk termal iletkenlik cihazı ve numune sensörü.



Şekil 5.17. Sıcak disk numune tutucuları ve sensörü.

Termal iletkenlik; çalışılacak olan malzemenin sıcaklık aralığını belirlemede, termal özelliklerin belirlenmesinde, durgun halde ısı transferi içeren bazı problemlerin çözümünde, yüksek sıcaklık uygulamalarında malzemelerin performansları hakkında bilgi edinmek istediğimizde önemli bir özelliktir ve ölçümü oldukça zor olan bir fiziksel büyüklüktür (Sampaio et. al., 1998; Wilson et. al., 2005; Yi, 2005).

Karalı bir durumda malzemenin ısı akışı belirten malzeme özelliği ısı iletkenliği (κ) ve geçici ısı akışını belirten özellik ise termal geçirgenlik katsayısı (a)'dır. Geniş aralıkta çeşitli malzemelerin termal iletkenlik değerleri Şekil 5.18 'de verilmiştir.



Şekil 5. 18. Farklı malzemelerin termal iletkenlik-termal geçirenlik değerleri (ASM handbook, 2002).

Grafikte görüldüğü gibi en yüksek termal iletkenlik değerine elmas, gümüş, bakır ve alüminyum sahipken, tuğla, mantar tıpa ve köpük gibi yüksek gözenekli malzemeler ise en düşük termal iletkenlik değerine sahiptir. Ayrıca grafikteki bütün değerler oda sıcaklığında ölçülmüştür. Malzemelerin termal iletkenliği malzeme içinde ısının ne kadar hızlı aktığının ölçüsüdür. Yapmış olduğumuz ölçümlerde elde etmiş olduğumuz termal iletkenlik değerleri grafikteki değerlerle uyuşmaktadır

BÖLÜM 6

DENEYSEL SONUÇLAR

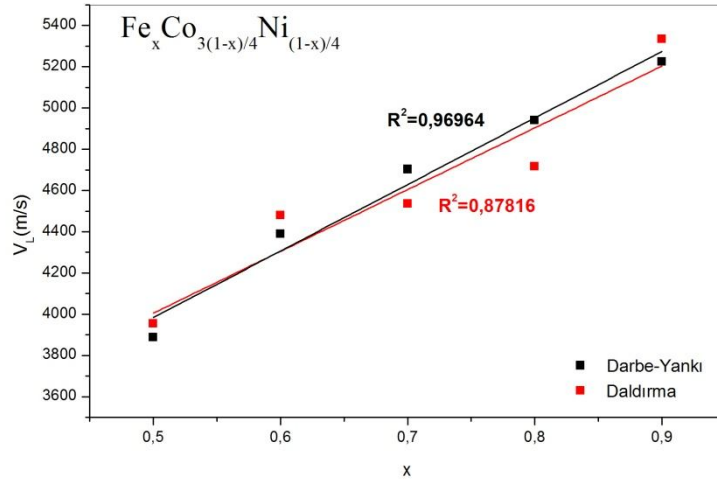
Deneysel çalışmada Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü Ultrases Laboratuvarındaki darbe-yankı ve daldırma sistemleri kullanılmıştır. Bu tekniklerin diğer yöntemlere göre avantajları Bölüm 1 ve Bölüm 5’de ayrıntılı olarak anlatılmıştır. Çalışma kapsamında farklı oranlarda kompozit malzemeler üretilmiş olup bu kompozitlerin bazı fiziksel özellikleri araştırılmış ve kullanılan ölçüm teknikleri ile bu fiziksel özelliklerin grafikleri çizilmiştir. Çizelgelerdeki herbir kompozit için elde edilen deneysel sonuçlar bazı çalışmalarla karşılaştırılmış ve Bölüm 7’de açıklanmıştır. Oluşturulan kompozitlerin kendi grubu içinde farklı oranlarda alınması ve termal özellik ile elastik özelliklerinin kıyaslanması ilk defa bu çalışmada gerçekleştirilmiştir.

6. 1. Fe-Co-Ni Kompozit Numunesi

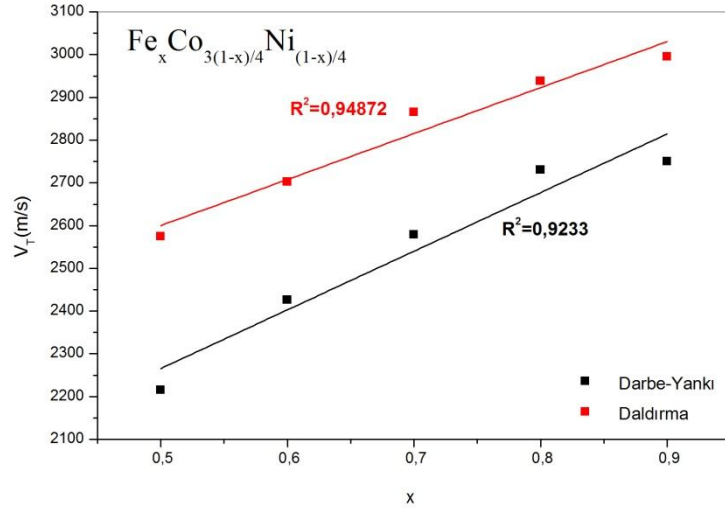
Çizelge 6.1. Fe-Co-Ni kompozit numunesine ait ultrases hızları, elastik modülü, termal iletkenlik ve yoğunluk değerleri

Numune	Darbe-yankı Tekniği			Daldırma Tekniği			Termal İletkenlik (W/mK)	Yoğunluk (kg/m ³)
	V _L (m/s)	V _T (m/s)	E (GPa)	V _L (m/s)	V _T (m/s)	E (GPa)		
Fe _{0,5} Co _{0,375} Ni _{0,125}	3887,16	2215,59	79,13	3955,36	2575,05	96,10	17,98	6,4
Fe _{0,5} Co _{0,25} Ni _{0,25}	3810,35	2125,00	70,20	3663,99	2393,99	78,84	19,18	6,1
Fe _{0,5} Co _{0,125} Ni _{0,375}	4560,00	2328,13	87,53	4705,26	2438,41	95,49	17,43	6,1
Fe _{0,6} Co _{0,3} Ni _{0,1}	4390,00	2425,79	93,41	4479,59	2702,57	109,90	17,48	6,2
Fe _{0,6} Co _{0,2} Ni _{0,2}	4060,18	2281,92	85,91	4353,34	2495,65	101,63	18,00	6,5
Fe _{0,6} Co _{0,1} Ni _{0,3}	4661,69	2576,00	110,21	4718,68	2603,35	114,62	16,98	6,6
Fe _{0,7} Co _{0,225} Ni _{0,075}	4702,32	2579,27	112,83	4536,19	2865,22	126,58	19,07	6,6
Fe _{0,7} Co _{0,15} Ni _{0,15}	4587,18	2565,00	108,84	4467,94	2518,80	104,50	20,93	6,5
Fe _{0,7} Co _{0,075} Ni _{0,225}	4932,90	2790,68	130,00	4923,59	2718,28	124,92	18,23	6,6
Fe _{0,8} Co _{0,15} Ni _{0,05}	4940,48	2730,00	127,85	4715,91	2938,29	136,83	17,53	6,7
Fe _{0,8} Co _{0,1} Ni _{0,1}	4897,99	2631,00	120,33	4690,81	2675,86	120,78	18,43	6,7
Fe _{0,8} Co _{0,05} Ni _{0,15}	5247,04	2921,83	148,07	5049,38	3093,83	156,14	15,93	6,8
Fe _{0,9} Co _{0,075} Ni _{0,025}	5225,00	2750,00	130,61	5334,43	2995,17	150,37	20,02	6,6
Fe _{0,9} Co _{0,05} Ni _{0,05}	5060,98	2730,00	129,31	5000,00	2699,51	126,39	20,45	6,7
Fe _{0,9} Co _{0,025} Ni _{0,075}	5346,00	3066,18	158,09	5132,31	3261,65	165,54	19,10	6,7

Şekil 6.1, Şekil 6.2 ve Şekil 6.3 'te $Fe_xCo_{3(1-x)/4}Ni_{(1-x)/4}$, $Fe_xCo_{(1-x)/2}Ni_{(1-x)/2}$ ve $Fe_xCo_{(1-x)/4}Ni_{3(1-x)/4}$ kompozit numunelerin yüzde oranları ile ultrases boyuna dalga hızı ve ultrases enine dalga hızı arasındaki ilişki verilmiştir. Grafiklerin hepsi incelendiğinde boyuna dalga hızında her iki metotta hacimsel olarak artan Fe oranlarında daha birbirine yakın sonuçlar vermektedir. Numunelerdeki Fe oranı arttıkça iki metot arasında farklılıklar oluşmaktadır. Verilen grafikte fit edilen doğrunun R^2 (doğruluk faktörü) yaklaşık olarak 1'e yakındır. Darbe-yankı yöntemi ile ölçülen boyuna ve enine hızın en yüksek R^2 değeri 0,96964 ve 0,97418 iken daldırma yöntemi ile ölçülen boyuna ve enine hızın en yüksek R^2 değeri ise 0,93586 ve 0,95425'dir. Korelasyon katsayısı, bağımsız değişkenler arasındaki ilişkinin yönü ve büyüklüğünü belirten katsayı ifadesi olduğundan dolayı korelasyon katsayısı (R^2), tam bir artan doğrusal ilişkinin var olduğunu gösterir. Enine hız değerlerine bakıldığında daha dağınık sonuçlar verdiği görülmektedir.

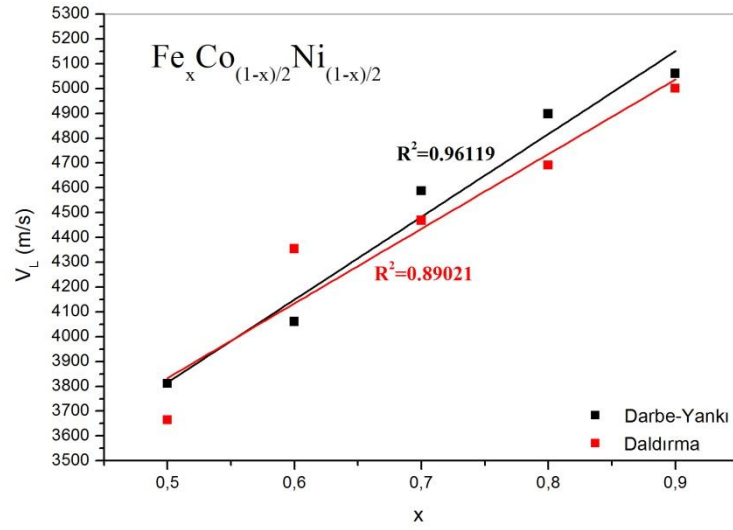


(a)

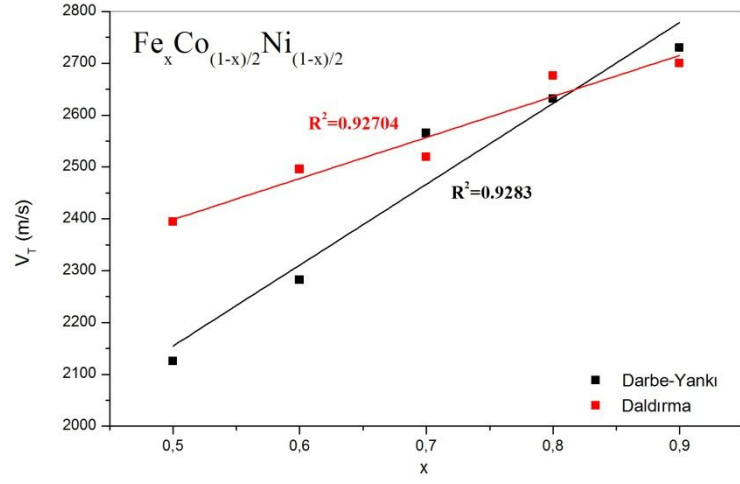


(b)

Şekil 6.1. $\text{Fe}_x\text{Co}_{3(1-x)/4}\text{Ni}_{(1-x)/4}$ kompozit numunesinin yüzde oranlarının ultrases (a) boyuna ve (b) enine hızı olan grafiği

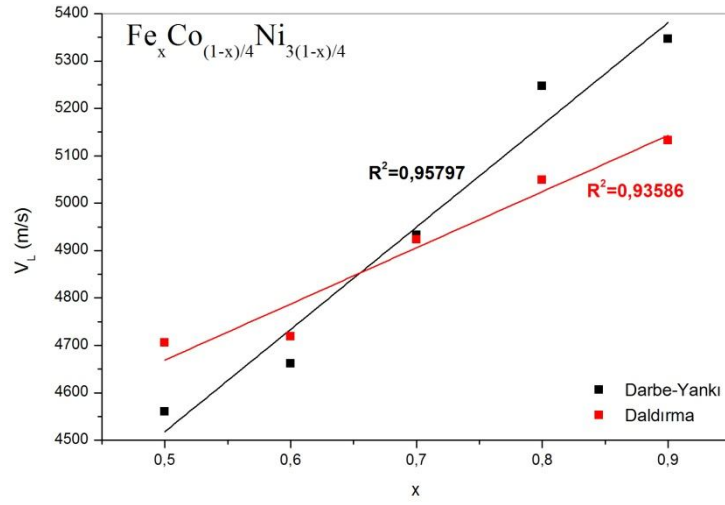


(a)

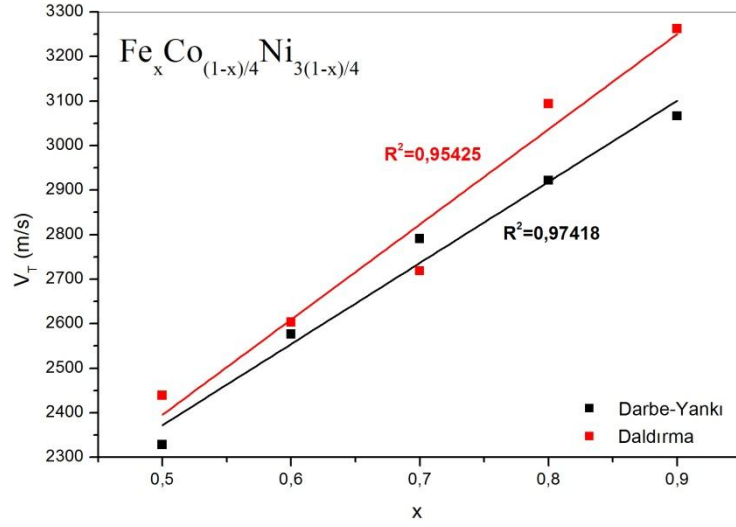


(b)

Şekil 6.2. $\text{Fe}_x\text{Co}_{(1-x)/2}\text{Ni}_{(1-x)/2}$ kompozit numunesinin yüzde oranlarının ultrases (a) boyuna ve (b) enine hızına olan grafiği



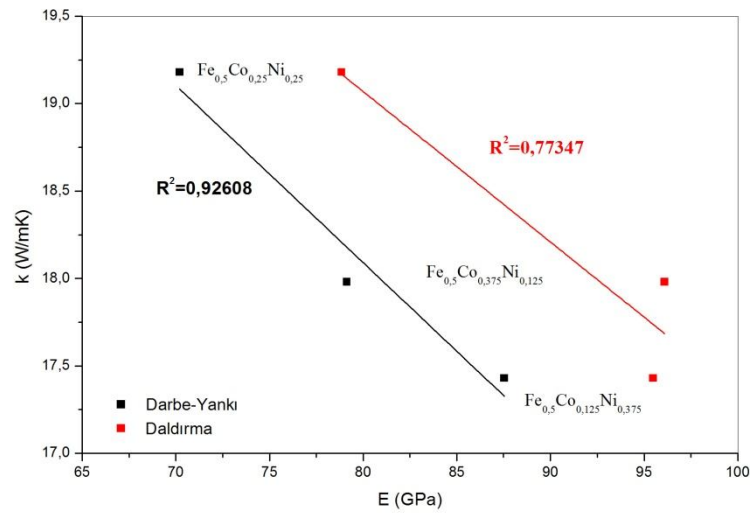
(a)



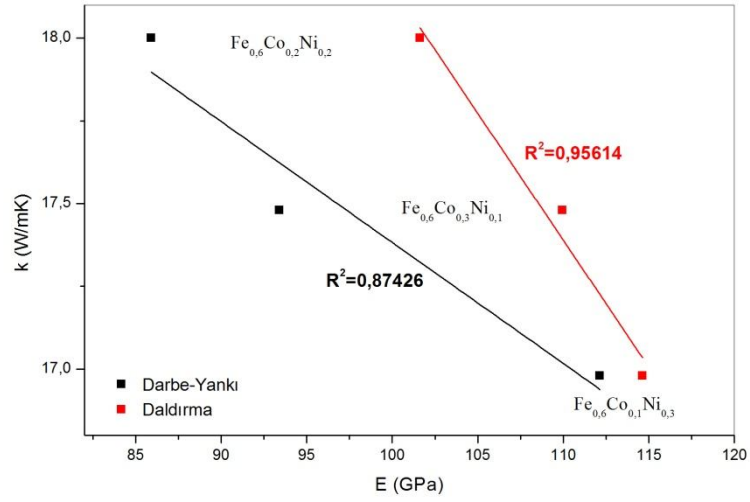
(b)

Şekil 6.3. $Fe_xCo_{(1-x)/4}Ni_{3(1-x)/4}$ kompozit numunesinin yüzde oranlarının ultrases (a) boyuna ve (b) enine hıza olan grafiği

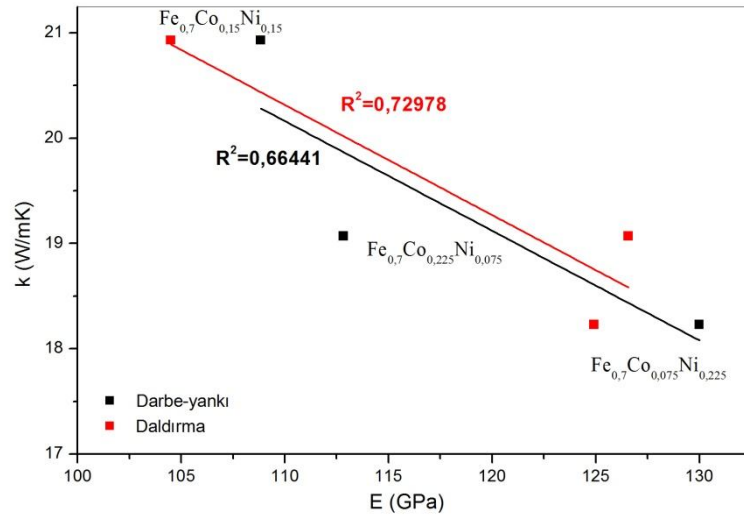
Şekil 6.4, Şekil 6.5, Şekil 6.6, Şekil 6.7 ve Şekil 6.8’de ise FeCoNi kompozit numunesinin termal iletkenlik ile Young modülü arasındaki ilişki gözlemlenmiştir. Her iki yöntemle alınan ölçümlerde Young modülü artarken termal iletkenlik değerinin azaldığı açık bir şekilde görülmektedir.



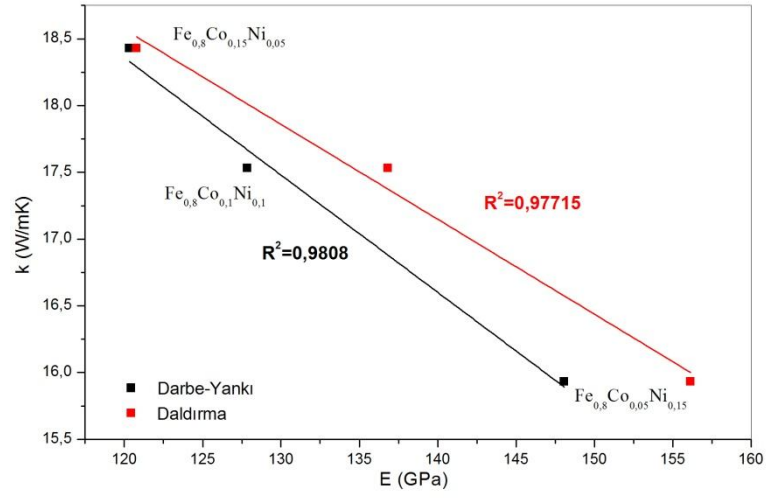
Şekil 6.4. $Fe_{0.5}$ -Co-Ni kompozit numunesinin termal iletkenlik ile Young modülü grafiği



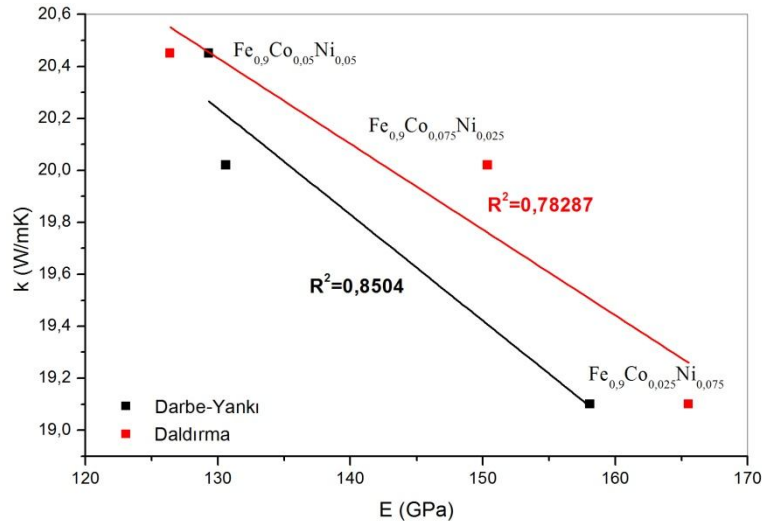
Şekil 6.5. Fe_{0.6}-Co-Ni kompozit numunesinin termal iletkenlik ile Young modülü grafiği



Şekil 6.6. Fe_{0.7}-Co-Ni kompozit numunesinin termal iletkenlik ile Young modülü grafiği



Şekil 6.7. $Fe_{0,8}$ -Co-Ni kompozit numunesinin termal iletkenlik ile Young modülü grafiği



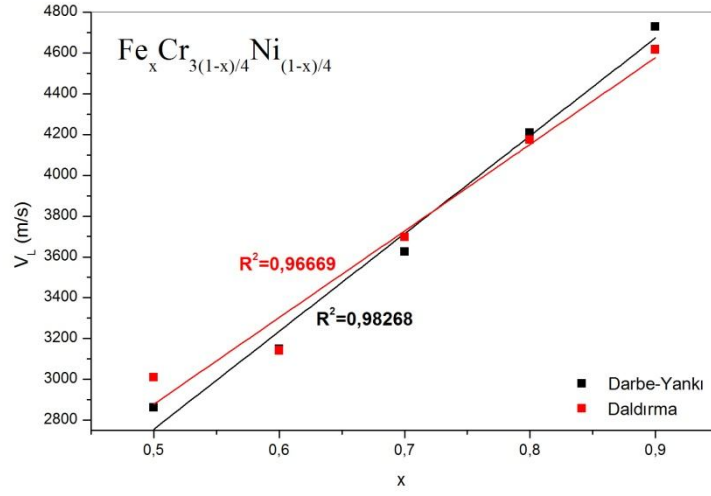
Şekil 6.8. $Fe_{0,9}$ -Co-Ni kompozit numunesinin termal iletkenlik ile Young modülü grafiği

6. 2. Fe-Cr-Ni Kompozit Numunesi

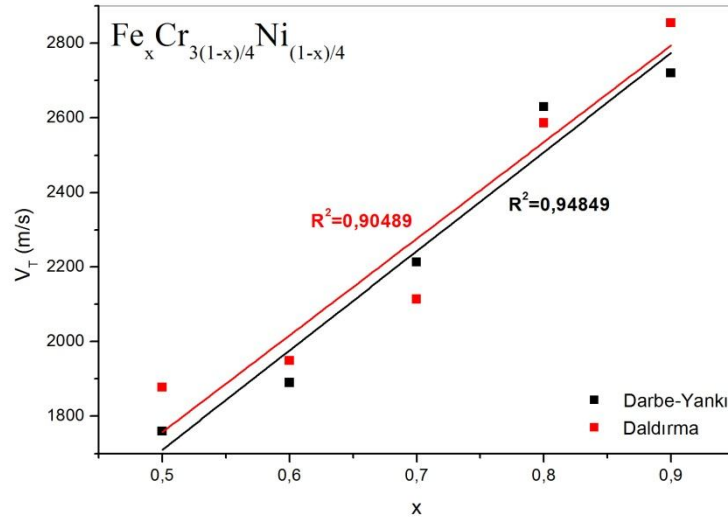
Çizelge 6.2. Fe-Cr-Ni kompozit numunesine ait ultrases hızları, elastik modülü, termal iletkenlik ve yoğunluk değerleri

Numune	Darbe-yankı Tekniği			Daldırma Tekniği			Termal İletkenlik (W/mK)	Yoğunluk (kg/m ³)
	V _L (m/s)	V _T (m/s)	E (GPa)	V _L (m/s)	V _T (m/s)	E (GPa)		
Fe _{0,5} Cr _{0,375} Ni _{0,125}	2861,86	1759,74	42,96	3008,58	1877,39	48,29	11,16	5,8
Fe _{0,5} Cr _{0,25} Ni _{0,25}	3246,00	2019,93	60,87	3459,59	2101,35	67,19	11,59	6,3
Fe _{0,5} Cr _{0,125} Ni _{0,375}	3919,60	2335,81	86,86	4033,71	2567,07	99,35	12,06	6,5
Fe _{0,6} Cr _{0,3} Ni _{0,1}	3147,23	1890,02	51,34	3140,64	1948,77	45,32	11,80	5,9
Fe _{0,6} Cr _{0,2} Ni _{0,2}	3515,60	2142,90	66,75	3468,21	2180,05	68,04	11,90	6,1
Fe _{0,6} Cr _{0,1} Ni _{0,3}	4076,92	2470,59	95,99	4147,07	2767,99	109,39	12,41	6,5
Fe _{0,7} Cr _{0,225} Ni _{0,075}	3625,00	2212,87	71,87	3697,27	2113,54	68,52	14,71	6,1
Fe _{0,7} Cr _{0,15} Ni _{0,15}	3763,79	2341,17	81,80	3815,29	2691,74	91,70	14,00	6,3
Fe _{0,7} Cr _{0,075} Ni _{0,225}	4231,70	2588,24	104,61	4190,48	2802,67	111,85	13,58	6,5
Fe _{0,8} Cr _{0,15} Ni _{0,05}	4209,05	2629,60	101,17	4173,56	2586,26	98,56	18,37	6,2
Fe _{0,8} Cr _{0,1} Ni _{0,1}	4313,73	2669,12	106,80	4290,26	2845,97	112,98	17,76	6,3
Fe _{0,8} Cr _{0,05} Ni _{0,15}	4468,75	2750,00	117,51	4317,04	2973,87	120,54	16,69	6,5
Fe _{0,9} Cr _{0,075} Ni _{0,025}	4728,26	2719,88	118,62	4616,19	2854,53	124,16	19,06	6,4
Fe _{0,9} Cr _{0,05} Ni _{0,05}	4784,09	2771,02	124,53	4757,67	3003,83	137,07	18,10	6,5
Fe _{0,9} Cr _{0,025} Ni _{0,075}	4860,50	2805,75	127,94	4793,40	3363,52	149,28	17,01	6,5

Şekil 6.9, Şekil 6.10 ve Şekil 6.11 'de Fe-Co-Ni kompozit numunesinde olduğu gibi hacimsel olarak Fe yüzdeleri ile doğru orantılı bir şekilde artmıştır. Şekil 6.12, Şekil 6.13, Şekil 6.14, Şekil 6.15 ve Şekil 6.16'da Fe-Cr-Ni kompozit numunesinin termal iletkenlik ve Young modülü grafiği verilmiştir. Şekil 6.12 ve Şekil 6.13'te lineer bir artış gözlemlenirken Şekil 6.14, Şekil 6.15 ve Şekil 6.16'da da lineer bir şekilde azalma söz konusudur. Fe_{0,5}CrNi ve Fe_{0,6}CrNi kompozit numunelerinde Ni miktarı arttıkça ve Cr miktarı azaldıkça Young modülü artarken termal iletkenlik değeri de artmaktadır. Fe_{0,7}CrNi, Fe_{0,8}CrNi ve Fe_{0,9}CrNi kompozitlerinde ise Ni miktarı arttıkça ve Cr miktarı azaldıkça Young modülü artarken termal iletkenlik değerinin azaldığı grafiklerden görülmektedir. R² değerlerine bakıldığında hemen hemen 1'e yakındır. Fe-Co-Ni kompozit malzemesi ile kıyaslandığında yapılarda daha birbirine yakın sonuçlar vermektedir.

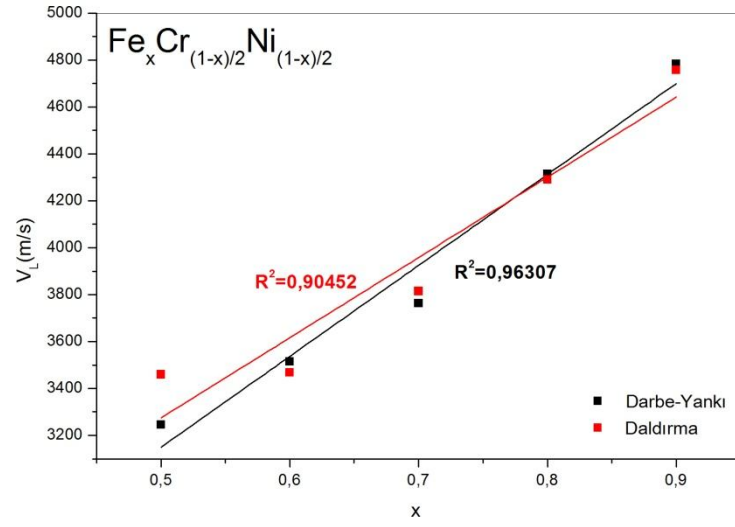


(a)

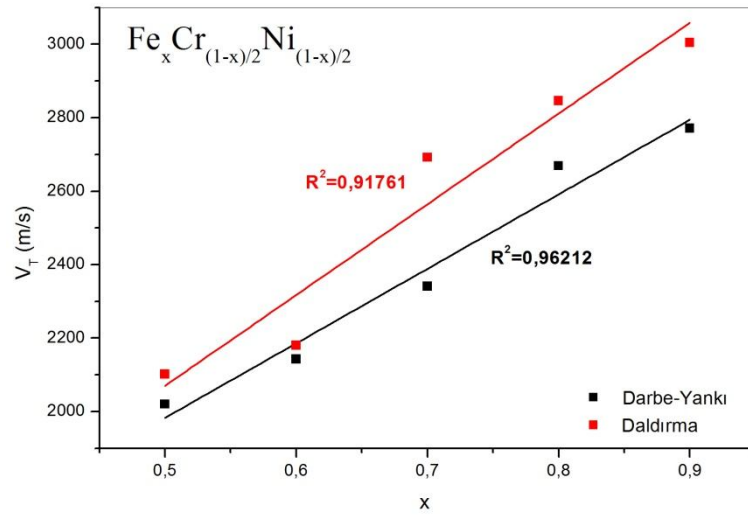


(b)

Şekil 6.9. $\text{Fe}_x\text{Cr}_{3(1-x)/4}\text{Ni}_{(1-x)/4}$ kompozit numunesinin yüzde oranlarının ultrases (a) boyuna ve (b) enine hıza olan grafiği

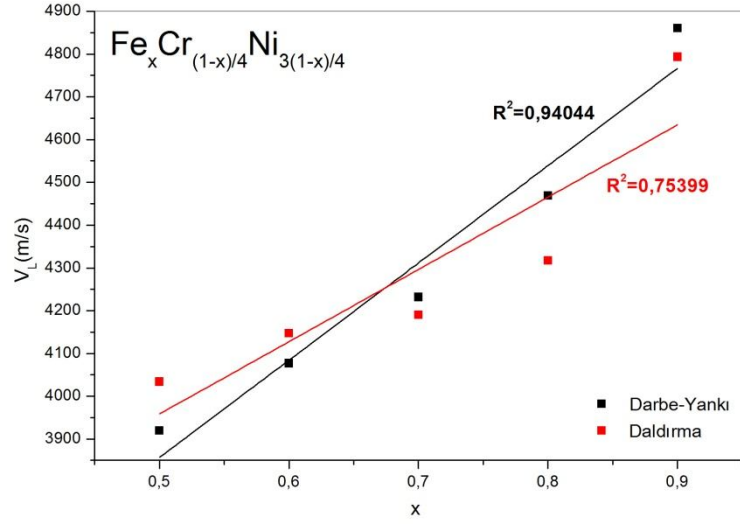


(a)

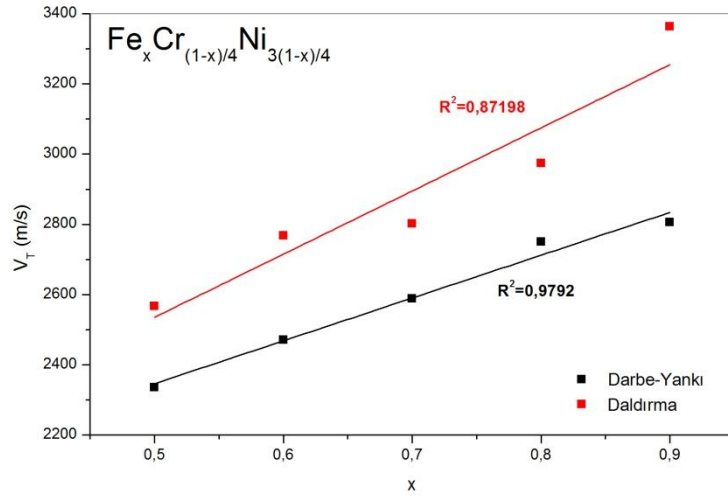


(b)

Şekil 6.10. $\text{Fe}_x\text{Co}_{(1-x)/2}\text{Ni}_{(1-x)/2}$ kompozit numunesinin yüzde oranlarının ultrases (a) boyuna ve (b) enine hıza olan grafiği

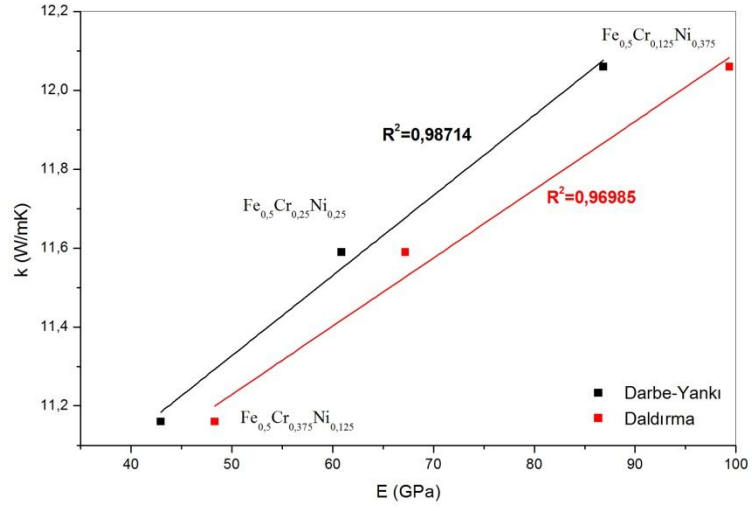


(a)

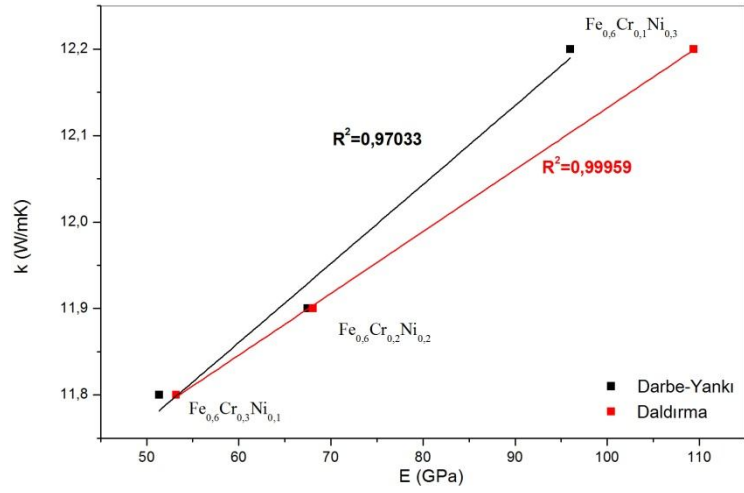


(b)

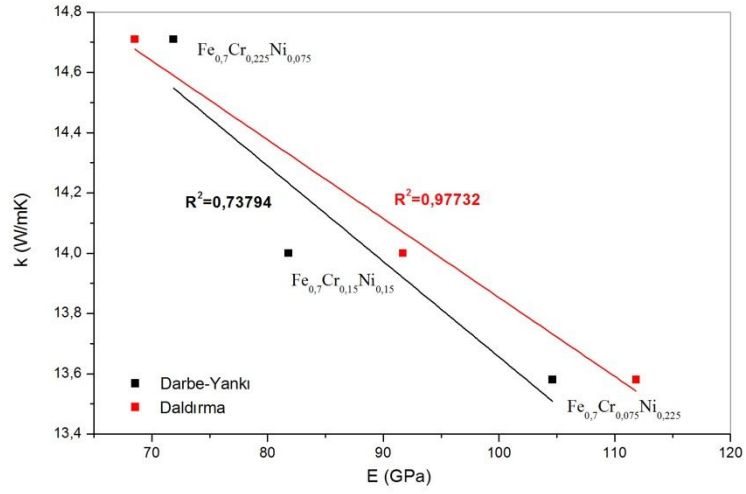
Şekil 6.11. $Fe_xCr_{(1-x)/4}Ni_{3(1-x)/4}$ kompozit numunesinin yüzde oranlarının ultrases (a) boyuna ve (b) enine hıza olan grafiği



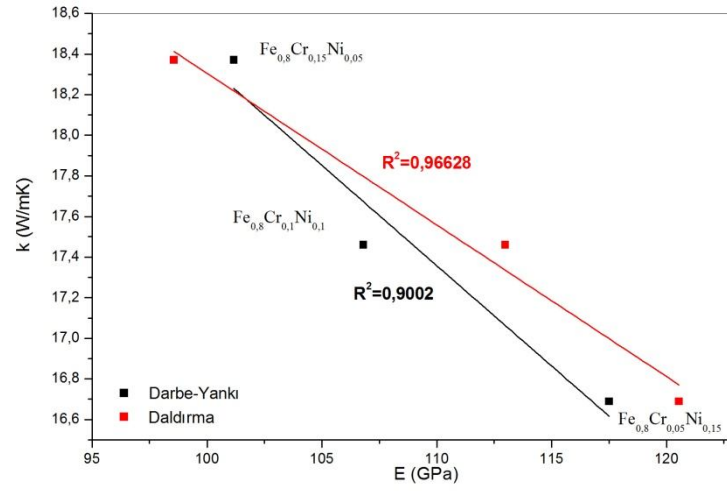
Şekil 6.12. $Fe_{0.5}$ -Cr-Ni kompozit numunesinin termal iletkenlik ile Young modülü grafiği



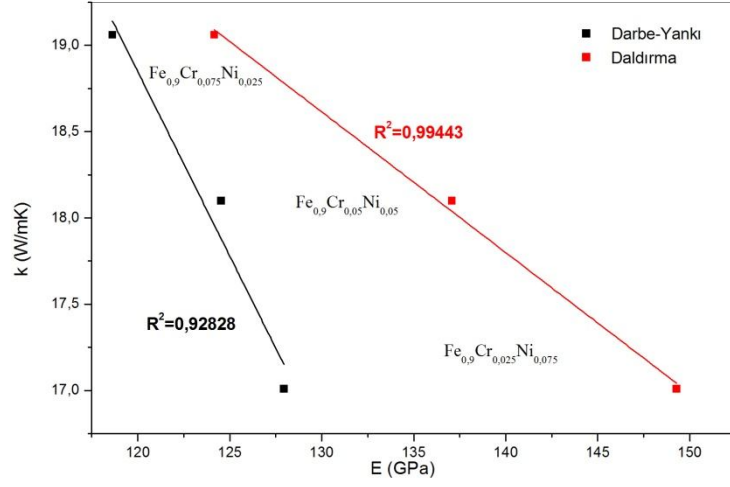
Şekil 6.13. $Fe_{0.6}$ -Cr-Ni kompozit numunesinin termal iletkenlik ile Young modülü grafiği



Şekil 6.14. Fe_{0,7}-Cr-Ni kompozit numunesinin termal iletkenlik ile Young modülü grafiği



Şekil 6.15. Fe_{0,8}-Cr-Ni kompozit numunesinin termal iletkenlik ile Young modülü grafiği



Şekil 6.16. Fe_{0,9}-Cr-Ni kompozit numunesinin termal iletkenlik ile Young modülü grafiği

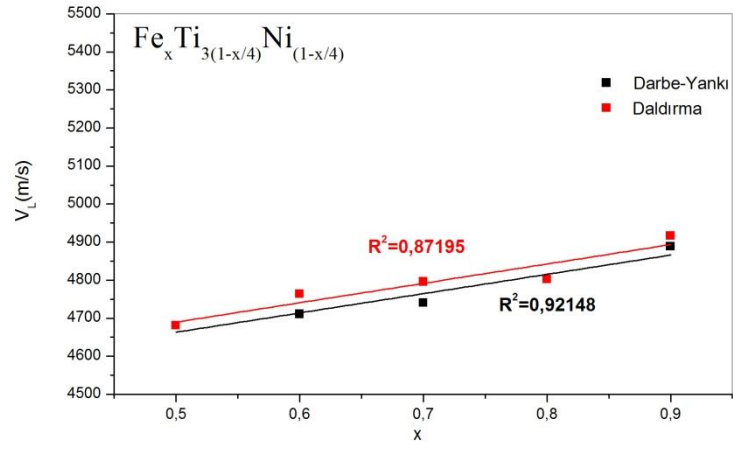
6. 3. Fe-Ti-Ni Kompozit Numunesi

Çizelge 6.3. Fe-Ti-Ni kompozit numunesine ait ultrases hızları, elastik modülü, termal iletkenlik ve yoğunluk değerleri

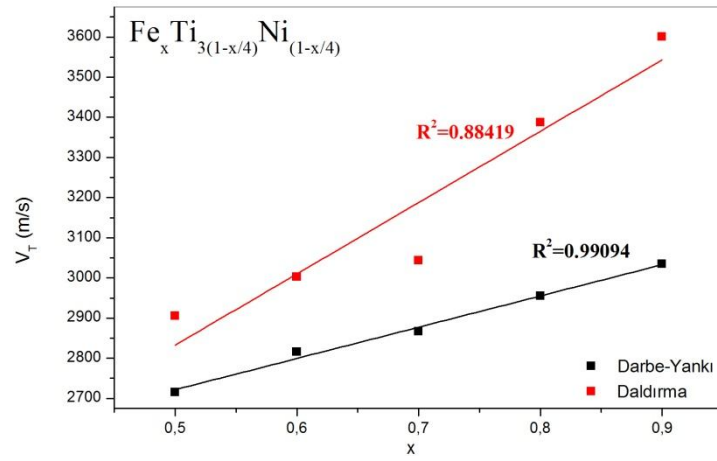
Numune	Darbe-yankı Tekniği			Daldırma Tekniği			Termal İletkenlik (W/mK)	Yoğunluk (kg/m ³)
	V _L (m/s)	V _T (m/s)	E (GPa)	V _L (m/s)	V _T (m/s)	E (GPa)		
Fe _{0,5} Ti _{0,375} Ni _{0,125}	4681,00	2715,00	88,21	4681,03	2904,76	96,14	6,591	4,8
Fe _{0,5} Ti _{0,25} Ni _{0,25}	4500,00	2746,20	99,82	4606,64	2659,52	97,26	7,879	5,5
Fe _{0,5} Ti _{0,125} Ni _{0,375}	4645,83	2719,51	113,66	4694,74	2838,79	121,10	9,825	6,2
Fe _{0,6} Ti _{0,3} Ni _{0,1}	4710,65	2815,00	96,86	4763,22	3002,44	105,50	7,272	5,0
Fe _{0,6} Ti _{0,2} Ni _{0,2}	4586,54	2908,54	105,14	4699,51	2682,94	101,44	9,078	5,6
Fe _{0,6} Ti _{0,1} Ni _{0,3}	4725,54	2775,00	118,10	4761,39	3211,33	138,46	11,04	6,2
Fe _{0,7} Ti _{0,225} Ni _{0,075}	4740,38	2866,00	107,51	4795,72	3043,09	116,31	9,378	5,4
Fe _{0,7} Ti _{0,15} Ni _{0,15}	4610,00	2955,13	110,32	4752,58	2773,49	110,80	11,38	5,8
Fe _{0,7} Ti _{0,075} Ni _{0,225}	4760,87	2881,58	126,69	4880,22	3265,90	147,09	12,60	6,3
Fe _{0,8} Ti _{0,15} Ni _{0,05}	4802,08	2955,00	121,07	4802,08	3386,99	133,74	12,35	5,8
Fe _{0,8} Ti _{0,1} Ni _{0,1}	4666,67	3028,50	123,81	4977,78	3063,48	136,84	13,47	6,1
Fe _{0,8} Ti _{0,05} Ni _{0,15}	4822,20	2932,43	132,81	4960,00	3577,99	156,91	15,32	6,4
Fe _{0,9} Ti _{0,075} Ni _{0,025}	4888,80	3034,48	135,49	4916,20	3601,00	148,12	16,12	6,2
Fe _{0,9} Ti _{0,05} Ni _{0,05}	4829,54	3125,00	142,48	5120,48	3248,84	157,14	17,97	6,4
Fe _{0,9} Ti _{0,025} Ni _{0,075}	4906,98	3246,15	152,18	5084,34	3807,85	162,35	18,53	6,5

Şekil 6.17, Şekil 6.18 ve Şekil 6.19 'da Fe tozunun hacimsel oranı arttığında boyuna ve enine ultrases dalga hızı da artmaktadır. Fe-Co-Ni ve Fe-Cr-Ni kompozitlerinde boyuna dalga hızında birbirlerine yakın sonuçlar verirken Fe-Ti-Ni kompozit numunesinde ise daha uzak sonuçlar söz konusudur. Genel olarak bakıldığında darbe-yankı yönteminin daldırma yöntemine göre iyi sonuçlar verdiği, R^2 değerlerine bakılarak söylenebilir.

Termal iletkenlik ve Young modülü arasındaki korelasyona bakıldığında en iyi sonucun darbe-yankı yöntemi ile elde edildiği görülmektedir ($R^2=0,9912$). Young modülünün artmasıyla termal iletkenlik değeri de artmıştır. Ti oranının azaldığı ve Ni oranının arttığı durumda bu artış gözlemlenmiştir (Şekil 6.20, Şekil 6.21, Şekil 6.22, Şekil 6.23 ve Şekil 6.24). Termal iletkenlik ve Young modülü değerinin en yüksek olduğu yapı, $Fe_xTi_{(1-x)/4}Ni_{3(1-x)/4}$ kompozit malzemesidir.

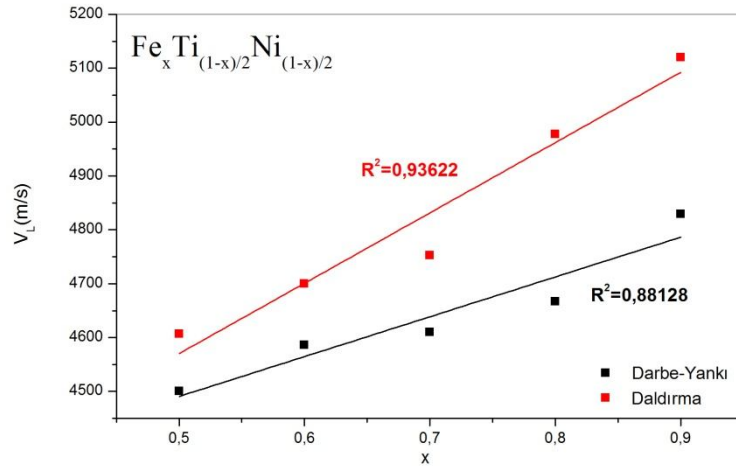


(a)

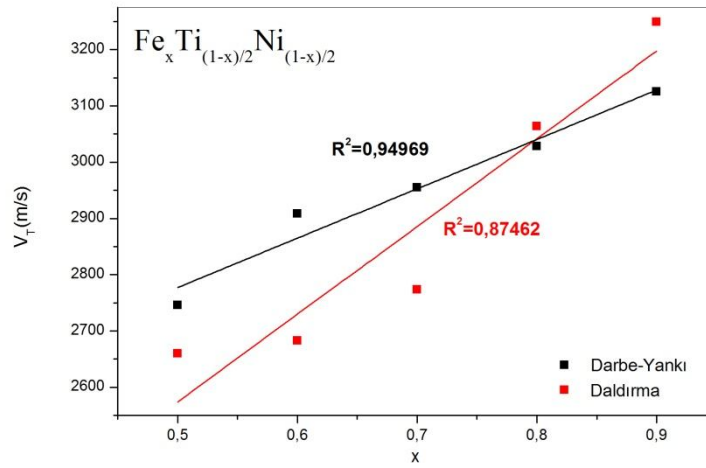


(b)

Şekil 6.17. $\text{Fe}_x\text{Ti}_{3(1-x)/4}\text{Ni}_{(1-x)/4}$ kompozit numunesinin yüzde oranlarının ultrases (a) boyuna ve (b) enine hıza olan grafiği

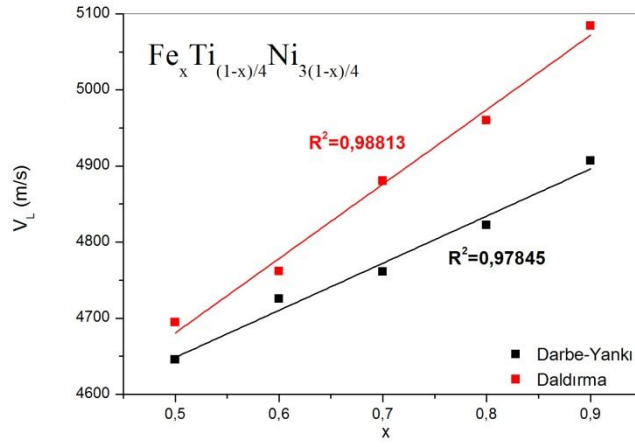


(a)

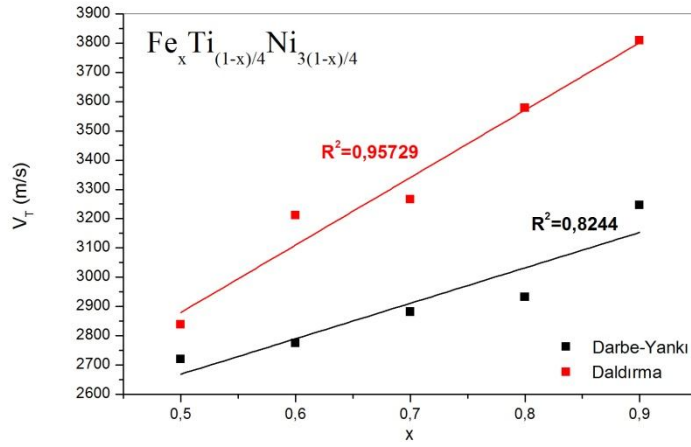


(b)

Şekil 6.18. $\text{Fe}_x\text{Ti}_{(1-x)/2}\text{Ni}_{(1-x)/2}$ kompozit numunesinin yüzde oranlarının ultrases (a) boyuna ve (b) enine hıza olan grafiği

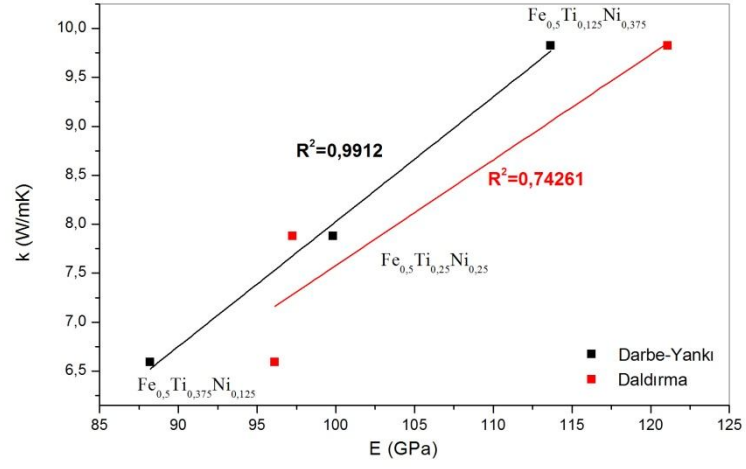


(a)

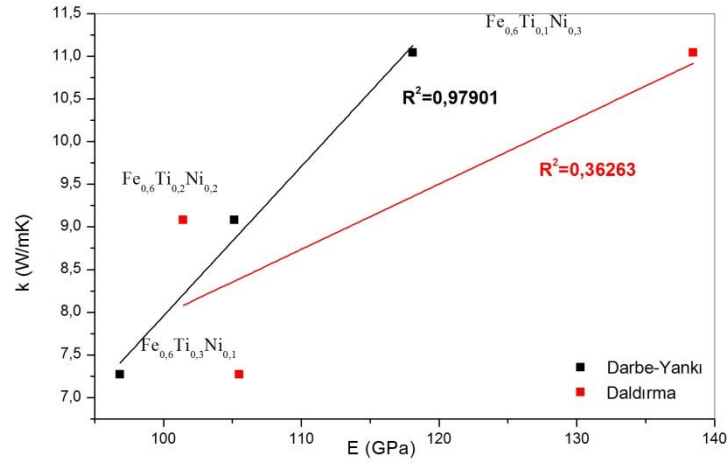


(b)

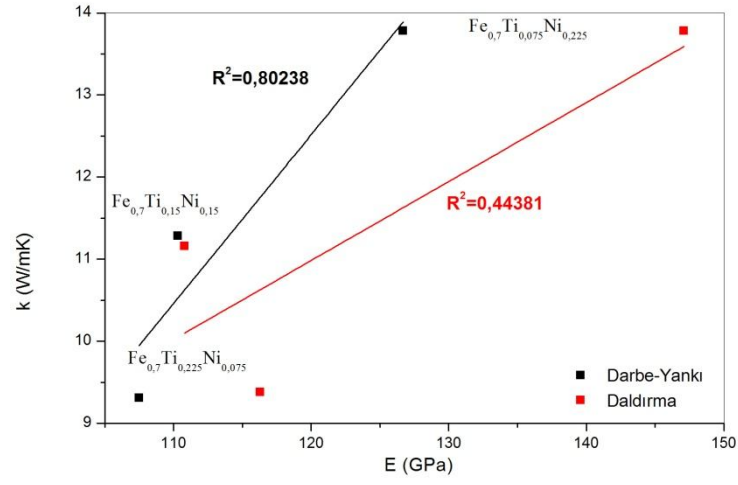
Şekil 6.19. $Fe_xTi_{(1-x)/4}Ni_{3(1-x)/4}$ kompozit numunesinin yüzde oranlarının ultrases (a) boyuna ve (b) enine hıza olan grafiği



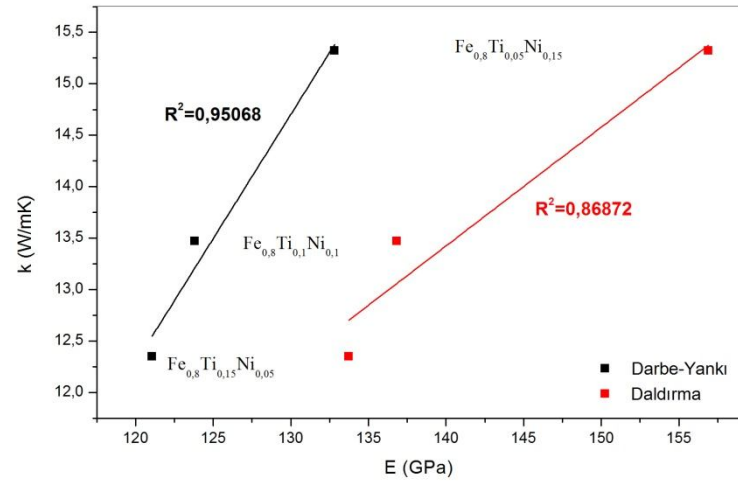
Şekil 6.20. Fe_{0.5}-Ti-Ni kompozit numunesinin termal iletkenlik ile Young modülü grafiği



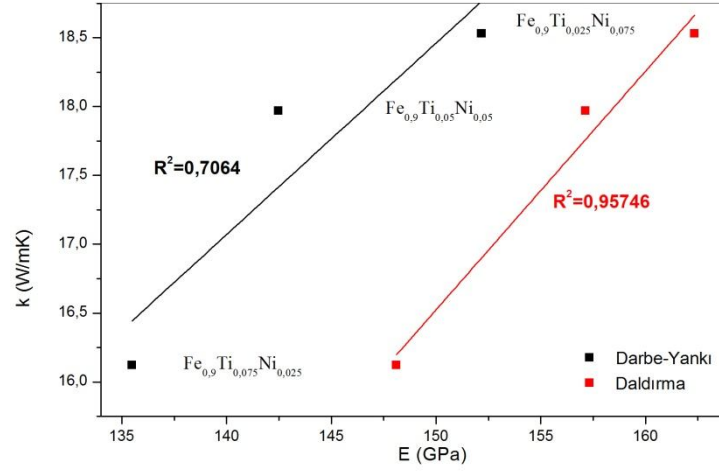
Şekil 6.21. Fe_{0.6}-Ti-Ni kompozit numunesinin termal iletkenlik ile Young modülü grafiği



Şekil 6.22. Fe_{0.7}-Ti-Ni kompozit numunesinin termal iletkenlik ile Young modülü grafiği



Şekil 6.23. Fe_{0.8}-Ti-Ni kompozit numunesinin termal iletkenlik ile Young modülü grafiği



Şekil 6.24. Fe_{0,9}-Ti-Ni kompozit numunesinin termal iletkenlik ile Young modülü grafiği

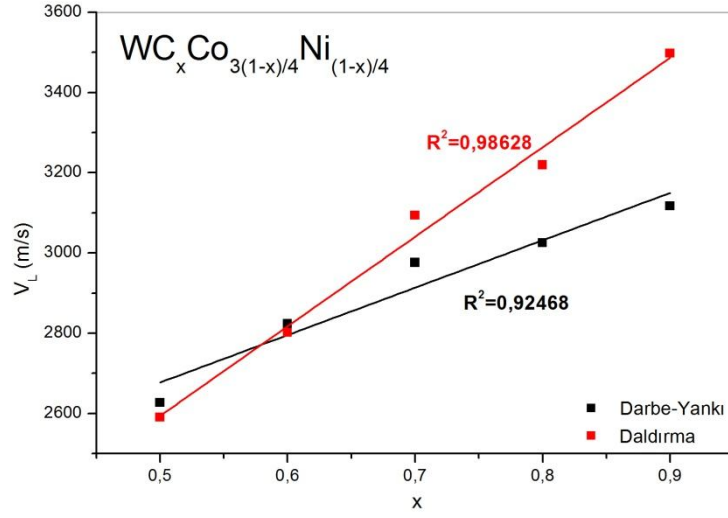
6. 4. WC-Co-Ni Kompozit Numunesi

Çizelge 6.4. WC-Co-Ni kompozit numunesine ait ultrases hızları, elastik modülü, termal iletkenlik ve yoğunluk değerleri

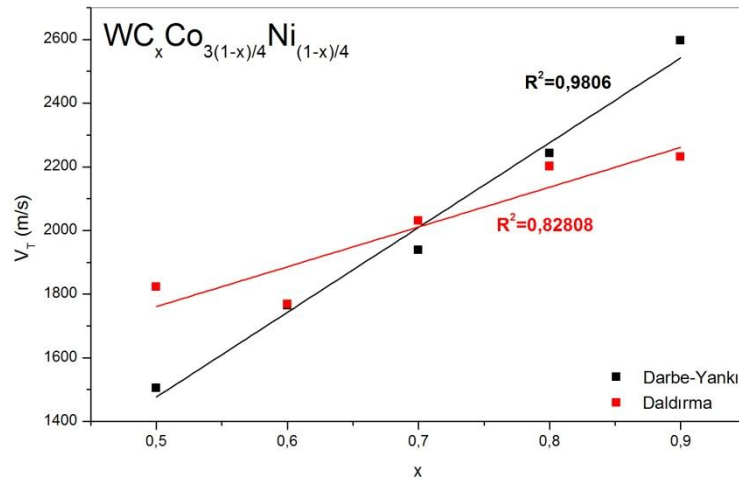
Numune	Darbe-yankı Tekniği			Daldırma Tekniği			Termal İletkenlik (W/mK)	Yoğunluk (kg/m ³)
	V _L (m/s)	V _T (m/s)	E (GPa)	V _L (m/s)	V _T (m/s)	E (GPa)		
WC _{0,5} Co _{0,375} Ni _{0,125}	2626,76	1504,29	40,93	2590,28	1822,24	48,29	8,505	7,2
WC _{0,5} Co _{0,25} Ni _{0,25}	2931,12	1839,24	57,25	2824,86	2002,89	57,45	10,54	7,2
WC _{0,5} Co _{0,125} Ni _{0,375}	3354,49	1870,00	63,61	3129,71	1848,10	61,45	13,22	7,3
WC _{0,6} Co _{0,3} Ni _{0,1}	2823,08	1764,86	54,36	2801,53	1768,76	54,11	7,362	7,4
WC _{0,6} Co _{0,2} Ni _{0,2}	2982,28	1867,35	59,81	2916,33	2080,34	62,90	9,625	7,4
WC _{0,6} Co _{0,1} Ni _{0,3}	3318,18	1983,69	71,16	3303,17	2108,58	76,08	11,02	7,4
WC _{0,7} Co _{0,225} Ni _{0,075}	2976,00	1938,06	62,07	3093,56	2030,85	67,52	3,204	7,3
WC _{0,7} Co _{0,15} Ni _{0,15}	3142,86	2046,51	72,06	3236,78	2149,71	77,65	4,616	7,6
WC _{0,7} Co _{0,075} Ni _{0,225}	3453,70	2275,29	84,40	3485,98	2250,24	84,49	6,231	7,3
WC _{0,8} Co _{0,15} Ni _{0,05}	3025,00	2242,45	66,24	3219,09	2201,09	76,08	4,113	7,4
WC _{0,8} Co _{0,1} Ni _{0,1}	3219,30	2294,71	76,65	3233,48	2343,93	76,95	4,988	7,4
WC _{0,8} Co _{0,05} Ni _{0,15}	3471,15	2474,93	90,32	3565,43	2317,7	91,38	6,715	7,5
WC _{0,9} Co _{0,075} Ni _{0,025}	3116,67	2597,22	35,32	3497,44	2231,19	82,93	8,969	7,2
WC _{0,9} Co _{0,05} Ni _{0,05}	3272,60	2664,28	53,61	3434,62	2394,64	85,99	8,595	7,3
WC _{0,9} Co _{0,025} Ni _{0,075}	3552,09	2664,06	93,68	3597,44	2462,18	98,90	4,086	7,7

Toz metalurjisi yöntemiyle sıkıştırma işlemi yapılarak üretilen kompozitlerden alınan numuneler üzerindeki boyuna ve enine ultrasonik dalga hızı ölçümleri sonucunda, artan WC partikül oranı ile dalga hızlarının arttığı gözlemlenmiştir (Şekil 6.24, Şekil 6.25 ve Şekil 6.26). Grafiklerde genelde %60 ile %70 arasında her iki eğrinin çakıştığı görülmektedir.

Seramik tabanlı WC-Co-Ni kompozit numunesinin Şekil 6.27, Şekil 6.28, Şekil 6.29 ve Şekil 6.30'daki grafikler incelendiğinde lineer bir artış görülmektedir. Her grafikte termal iletkenlik değerinin ve Young modülünün en yüksek olduğu değerdeki kompozit yapı, $WC_xCo_{(1-x)/4}Ni_{3(1-x)/4}$ 'dır. Sadece $WC_{0,9}CoNi$ kompozit numunesinde artan Young modülüne karşın termal iletkenlik değeri düşüktür.

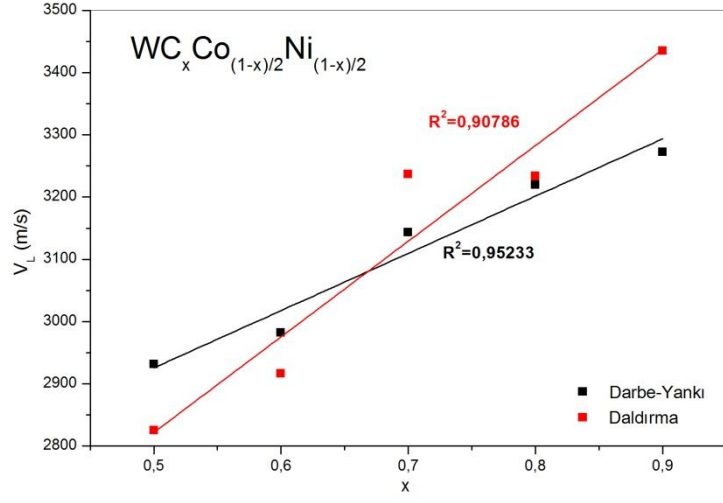


(a)

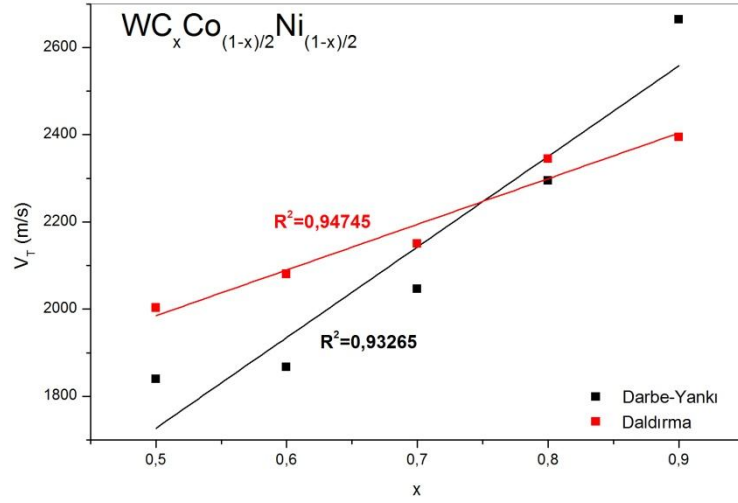


(b)

Şekil 6.25. WC_xCo_{3(1-x)/4}Ni_{(1-x)/4} kompozit numunesinin yüzde oranlarının ultrases (a) boyuna ve (b) enine hıza olan grafiği

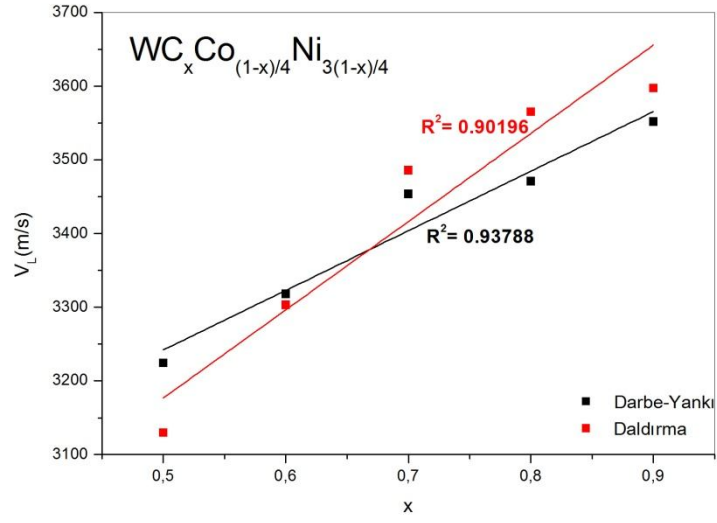


(a)

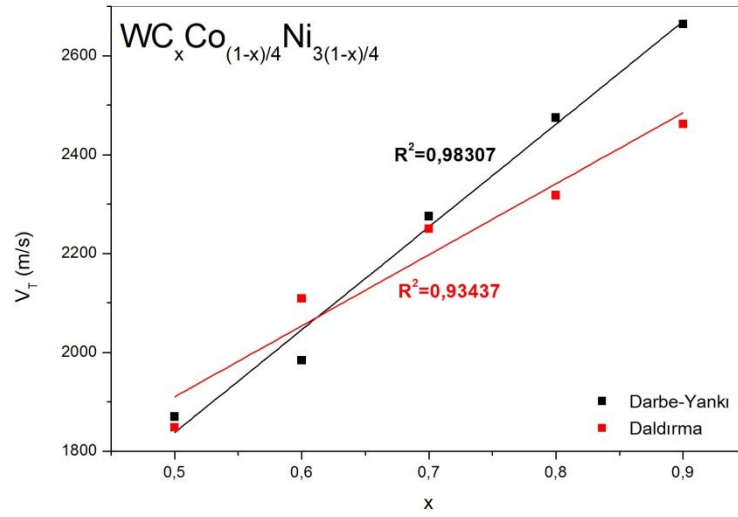


(b)

Şekil 6.26. $WC_xCo_{(1-x)/2}Ni_{(1-x)/2}$ kompozit numunesinin yüzde oranlarının ultrases (a) boyuna ve (b) enine hıza olan grafiği

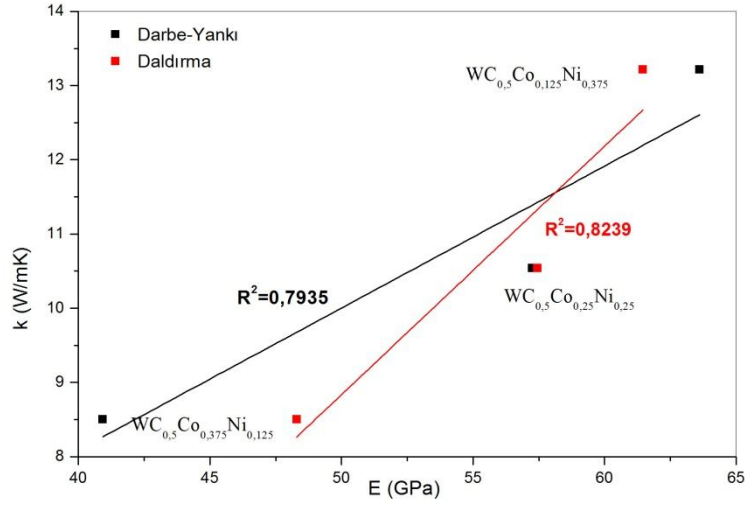


(a)

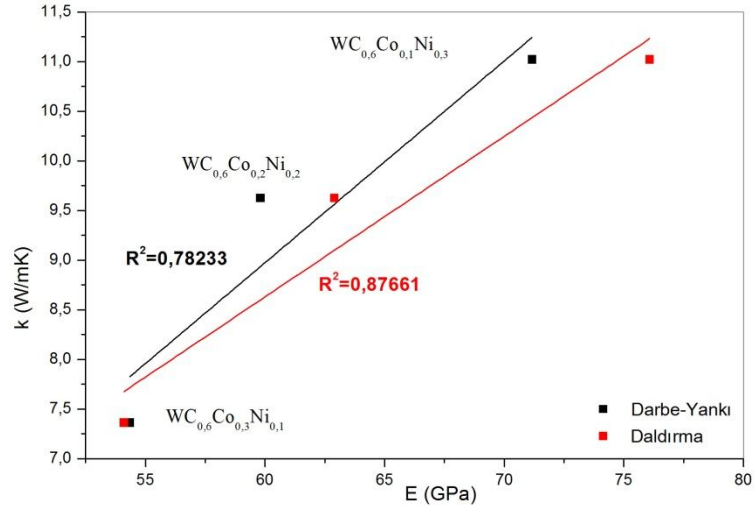


(b)

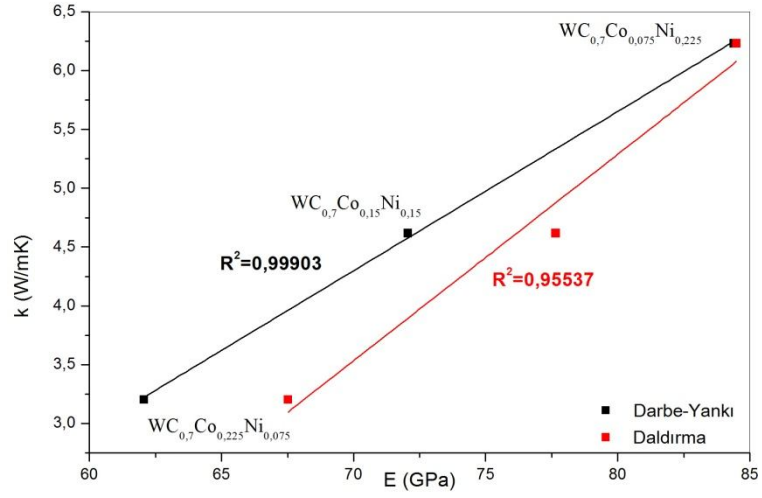
Şekil 6.27. WC_xCo_{(1-x)/4}Ni_{3(1-x)/4} kompozit numunesinin yüzde oranlarının ultrases (a) boyuna ve (b) enine hıza olan grafiği



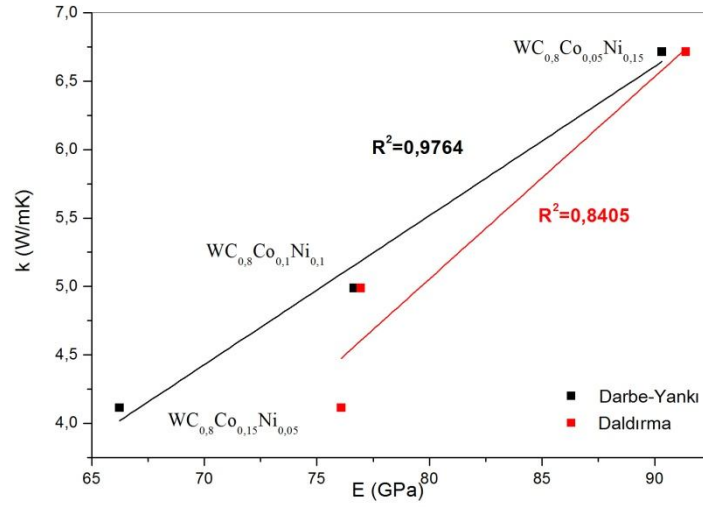
Şekil 6.28. $WC_{0,5}$ -Co-Ni kompozit numunesinin termal iletkenlik ile Young modülü grafiği



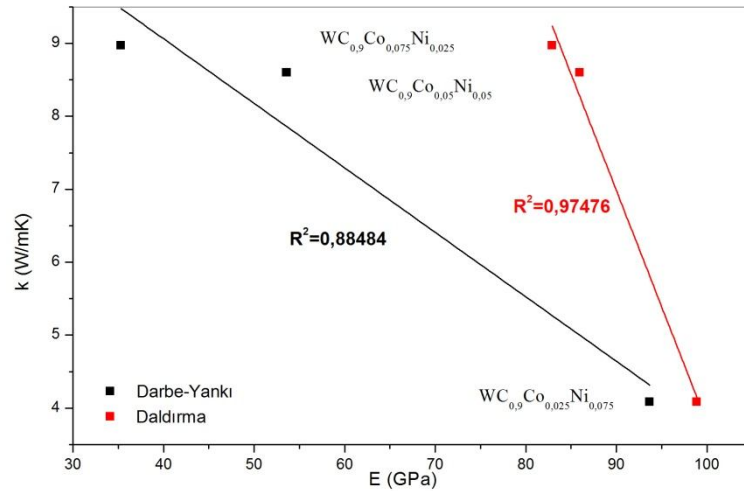
Şekil 6.29. $WC_{0,6}$ -Co-Ni kompozit numunesinin termal iletkenlik ile Young modülü grafiği



Şekil 6.30. $WC_{0.7}$ -Co-Ni kompozit numunesinin termal iletkenlik ile Young modülü grafiği



Şekil 6.31. $WC_{0.8}$ -Co-Ni kompozit numunesinin termal iletkenlik ile Young modülü grafiği



Şekil 6.32. WC_{0,9}-Co-Ni kompozit numunesinin termal iletkenlik ile Young modülü grafiği

6. 5. WC-Co-Ti Kompozit Numunesi

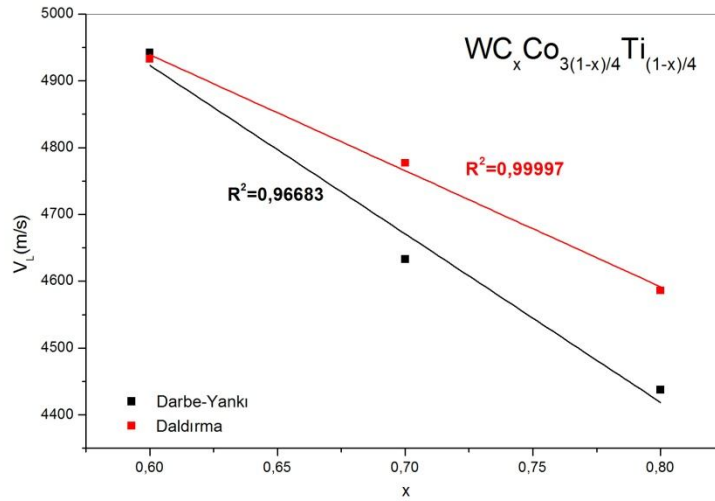
Seramik tabanlı WC tozuna Co ve Ti bağlayıcı fazları ilave edilerek kompozit malzeme oluşturulmuştur. Çizelge 6.5'te WC-Co-Ti kompozit numunesinin darbe-yankı ve daldırma tekniği ile elde edilen ultrases hızları, elastik modülü, termal iletkenlik ve yoğunluk değerleri verilmiştir.

Çizelge 6.5. WC-Co-Ti kompozit numunesine ait ultrases hızları, elastik modülü, termal iletkenlik ve yoğunluk değerleri

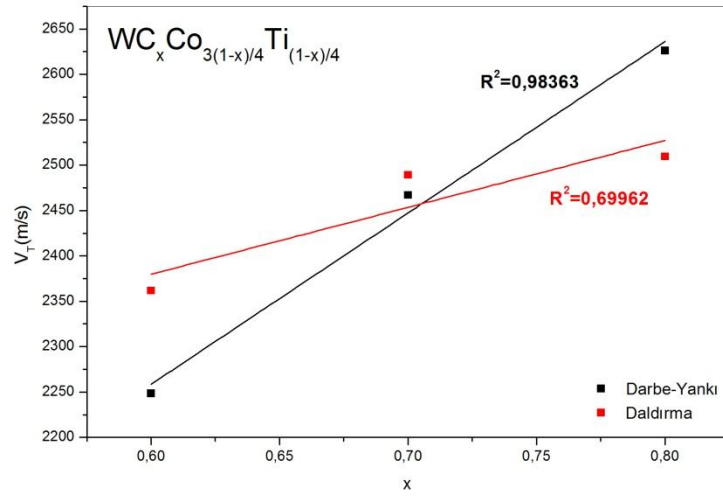
Numune	Darbe-yankı Tekniği			Daldırma Tekniği			Termal İletkenlik (W/mK)	Yoğunluk (kg/m ³)
	V _L (m/s)	V _T (m/s)	E (GPa)	V _L (m/s)	V _T (m/s)	E (GPa)		
WC _{0,6} Co _{0,3} Ti _{0,1}	4942,04	2248,61	94,17	4933,29	2361,90	102,52	6,819	6,8
WC _{0,6} Co _{0,2} Ti _{0,2}	5312,69	2500,90	110,39	5103,86	2532,29	111,43	6,978	6,5
WC _{0,6} Co _{0,1} Ti _{0,3}	5871,13	2720,59	133,19	5839,05	2870,37	145,81	7,591	6,6
WC _{0,7} Co _{0,225} Ti _{0,075}	4633,16	2467,12	112,54	4777,07	2489,29	115,59	3,479	7,1
WC _{0,7} Co _{0,15} Ti _{0,15}	5137,50	2635,77	123,01	4981,82	2682,99	124,99	4,399	6,7
WC _{0,7} Co _{0,075} Ti _{0,225}	5652,57	2823,67	140,37	5281,25	3076,19	155,29	5,294	6,6
WC _{0,8} Co _{0,15} Ti _{0,05}	4437,72	2626,21	113,72	4586,21	2509,33	108,54	3,198	6,7
WC _{0,8} Co _{0,1} Ti _{0,1}	4934,21	2758,94	139,49	4746,84	2870,37	143,77	3,379	7,2
WC _{0,8} Co _{0,05} Ti _{0,15}	5379,95	2940,62	140,22	4915,25	3306,77	149,71	3,678	6,3

Şekil 6.33, Şekil 6.34 ve Şekil 6.35'te ultrases boyuna dalga hızı ve ultrases enine dalga hızı ile WC'ün hacimsel oranının grafiği çizilmiştir. Grafiklerde WC tozunun hacimsel olarak artırılması ile boyuna ultrases dalgası azalırken enine ultrases dalgası artmaktadır. Eksene paralel olarak yapılan boyuna dalga ölçümünde örgüdeki atomların dizilimleri, yapı içinde WC partiküllerinin diğer bağlayıcı fazlardan daha küçük boyutta olması homojen dağılımı etkileyebileceği düşünülerek matris elemanında boyuna dalga hızının düşmesi gözlemlenmiş olabilir.

Şekil 6.36, Şekil 6.37 ve Şekil 6.38'te daha önce açıklandığı gibi ultrases hızlarına ve yoğunluğa bağlı olarak hesaplanan Young modülü ile termal iletkenlik lineer olarak artmaktadır. Şekil 6.38'de fit doğrusunun R^2 değeri diğerlerine göre düşüktür. $WC_{0,8}Co_{0,1}Ti_{0,1}$ ve $WC_{0,8}Co_{0,05}Ti_{0,15}$ kompozisyonlarının Young modülü değerlerinin her iki ultrases yönteminde de birbirlerine çok yakın olmasından kaynaklanmaktadır.

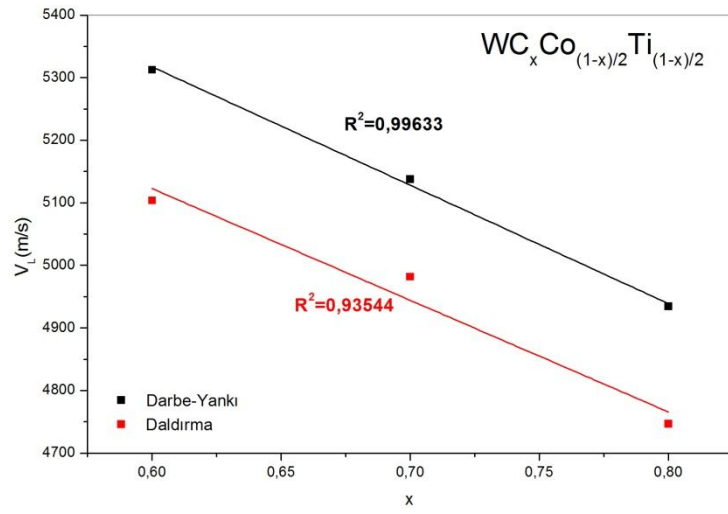


(a)

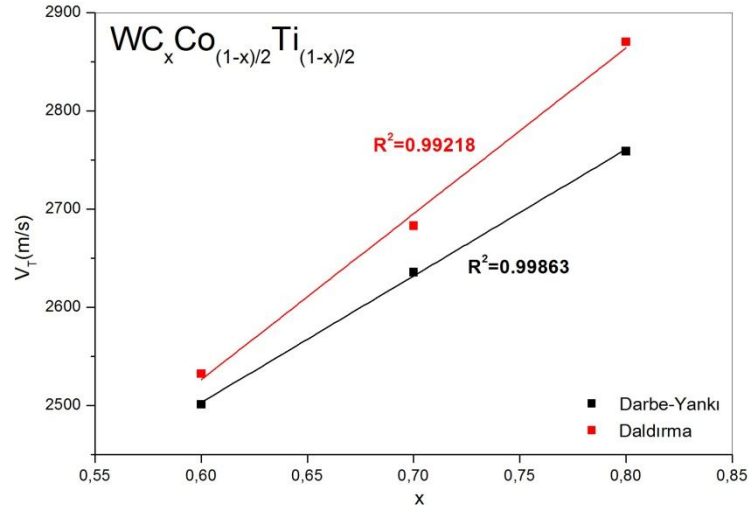


(b)

Şekil 6.33. WC_xCo_{3(1-x)/4}Ti_{(1-x)/4} kompozit numunesinin yüzde oranlarının ultrases (a) boyuna ve (b) enine hıza olan grafiği

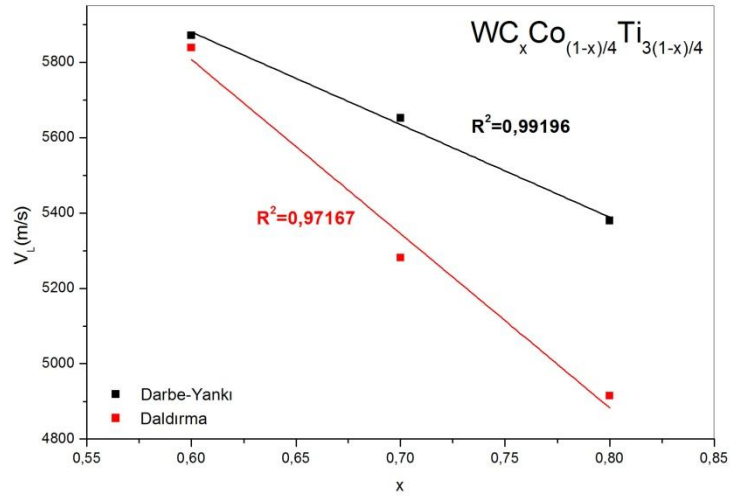


(a)

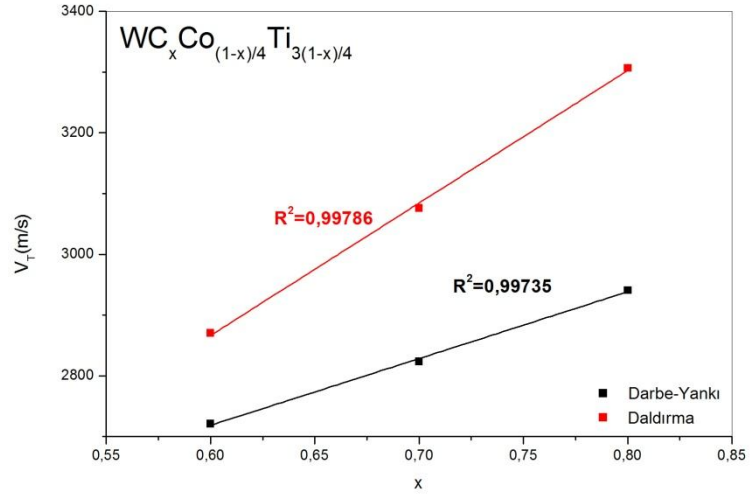


(b)

Şekil 6.34. WC_xCo_{(1-x)/2}Ti_{(1-x)/2} kompozit numunesinin yüzde oranlarının ultrases (a) boyuna ve (b) enine hızı olan grafiği

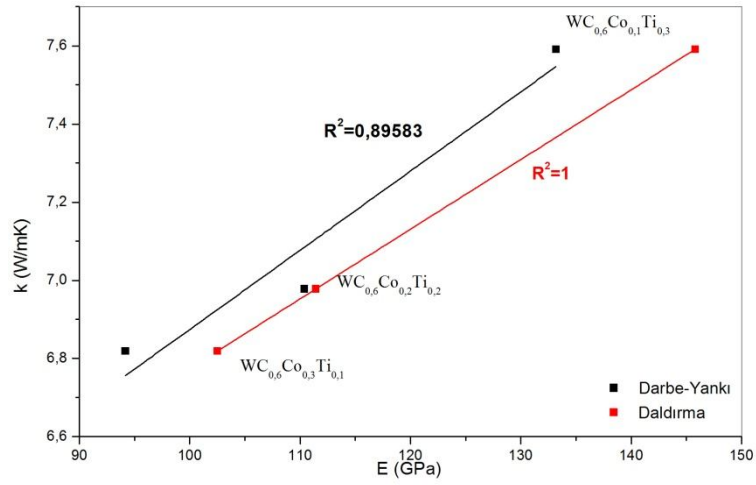


(a)

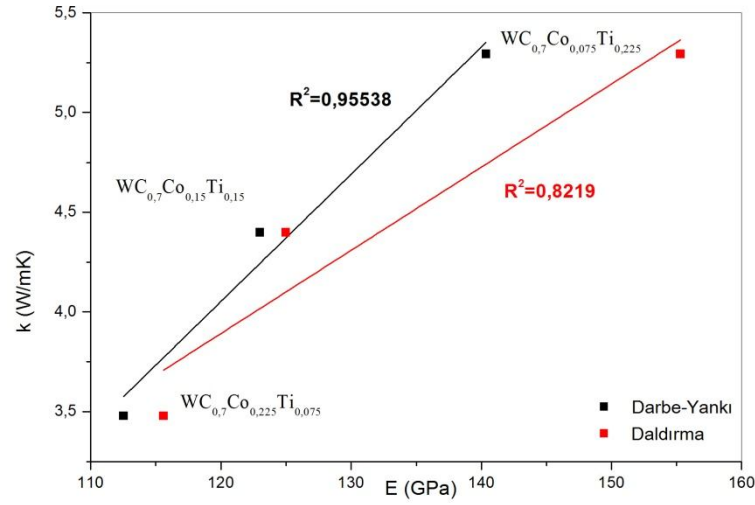


(b)

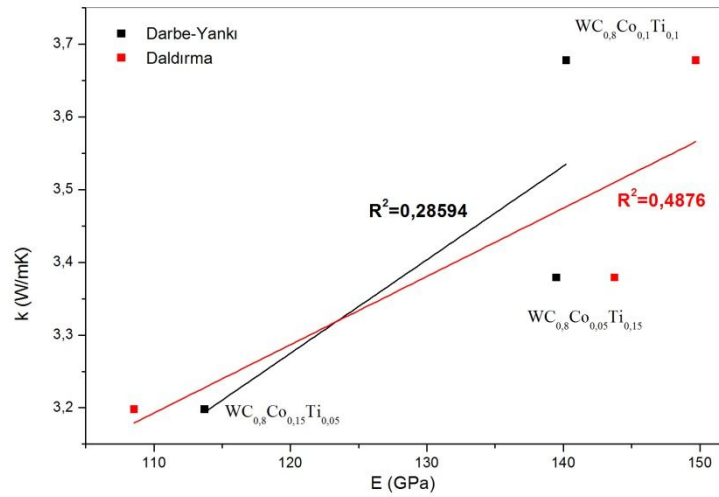
Şekil 6.35. WC_xCo_{(1-x)/4}Ti_{3(1-x)/4} kompozit numunesinin yüzde oranlarının ultrases (a) boyuna ve (b) enine hıza olan grafiği



Şekil 6.36. WC_{0,6}-Co-Ti kompozit numunesinin termal iletkenlik ile Young modülü grafiği



Şekil 6.37. WC_{0,7}-Co-Ti kompozit numunesinin termal iletkenlik ile Young modülü grafiği



Şekil 6.38. WC_{0,8}-Co-Ti kompozit numunesinin termal iletkenlik ile Young modülü grafiği

6. 6. WC-Fe-Ti Kompozit Numunesi

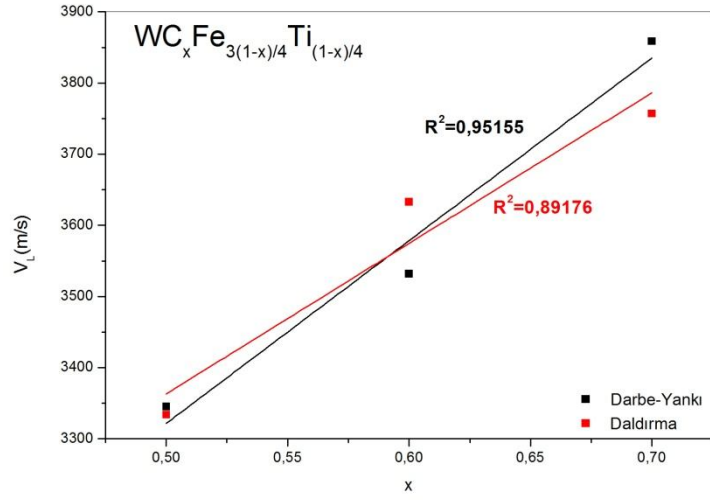
Yapılan çalışmada WC seramik partiküllerin sinterleme sonrası kuvvetli bağ oluşturdukları bilinerek bağlayıcı faz olarak kuvvetli Fe tozu ve sünek olan Ti tozu takviye edilerek fiziksel özellikleri incelenmiştir. WC-Co-Ni, WC-Co-Ti ile farklılıkları araştırılmıştır.

Çizelge 6.6. WC-Fe-Ti kompozit numunesinin darbe-yankı ve daldırma tekniği ile elde edilen ultrases hızları, elastik modülü, termal iletkenlik ve yoğunluk değerleri

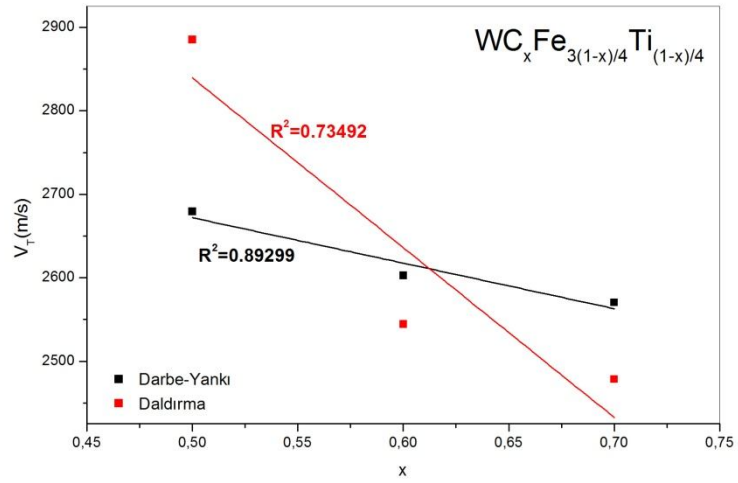
Numune	Darbe-yankı Tekniği			Daldırma Tekniği			Termal İletkenlik (W/mK)	Yoğunluk (kg/m ³)
	V_L (m/s)	V_T (m/s)	E (GPa)	V_L (m/s)	V_T (m/s)	E (GPa)		
WC _{0,5} Fe _{0,375} Ti _{0,125}	3345,07	2679,49	55,58	3483,33	2885,39	43,36	7,294	6,4
WC _{0,5} Fe _{0,25} Ti _{0,25}	3573,23	2813,67	67,15	3701,62	2897,57	73,79	8,748	6,2
WC _{0,5} Fe _{0,125} Ti _{0,375}	3958,33	3006,81	93,17	4319,61	3293,22	110,14	9,815	6,3
WC _{0,6} Fe _{0,3} Ti _{0,1}	3531,77	2602,56	82,22	3633,11	2544,19	88,37	4,958	6,7
WC _{0,6} Fe _{0,2} Ti _{0,2}	4049,46	2774,64	105,84	4061,19	2717,93	105,09	6,606	6,5
WC _{0,6} Fe _{0,1} Ti _{0,3}	4326,92	2884,62	118,99	4358,35	3096,99	123,45	8,756	6,5
WC _{0,7} Fe _{0,225} Ti _{0,075}	3858,63	2570,51	98,94	3756,96	2478,48	93,13	2,413	6,8
WC _{0,7} Fe _{0,15} Ti _{0,15}	4526,02	2738,11	119,88	4239,49	2549,76	104,41	3,764	6,6
WC _{0,7} Fe _{0,075} Ti _{0,225}	4602,55	2768,04	121,19	4855,56	2900,63	133,72	4,727	6,5

WC_xFe_{3(1-x)/4}Ti_{(1-x)/4}, WC_xFe_{(1-x)/2}Ti_{(1-x)/2} ve WC_xFe_{(1-x)/4}Ti_{3(1-x)/4} kompozit numunesinin yüzde oranlarının ultrases boyuna (V_L) ve enine (V_T) hıza olan grafiğinde boyuna hız hacimsel oranla doğrusal olarak artarken enine hız ise azalmaktadır. R² değerlerine bakıldığında darbe-yankı yöntemi ile alınan ölçümdeki en yüksek değeri 0,99963; daldırma yöntemi ile alınan ölçümdeki en yüksek değeri 1 iken darbe-yankı yönteminde en düşük değeri 0,89299; daldırma yöntemi ile alınan ölçümdeki en düşük değeri 0,60782'dir.

Yapılan çalışmada WC-Fe-Ti kompozit numunesinin kendi seramik gurubu içinde WC bağlı olarak termal iletkenlik değerinin Young modülüne oranı artmaktadır. Termal iletkenlik ve Young modülünün yüksek olduğu yapı WC_xFe_{(1-x)/4}Ti_{3(1-x)/4} kompozit numunesidir.

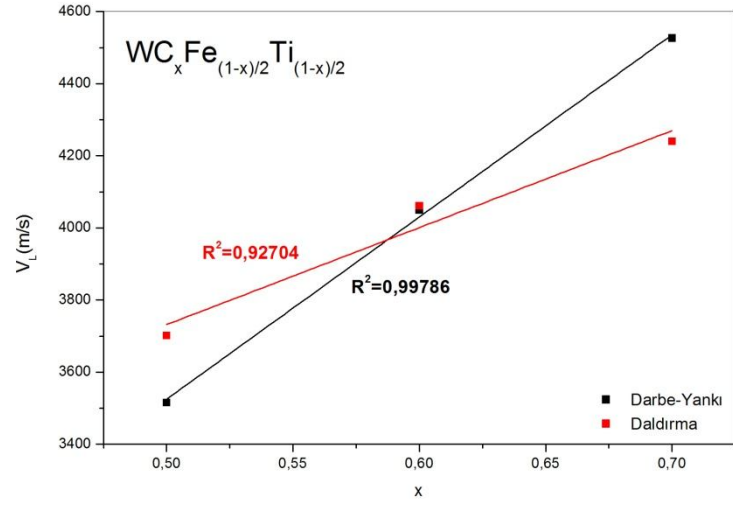


(a)

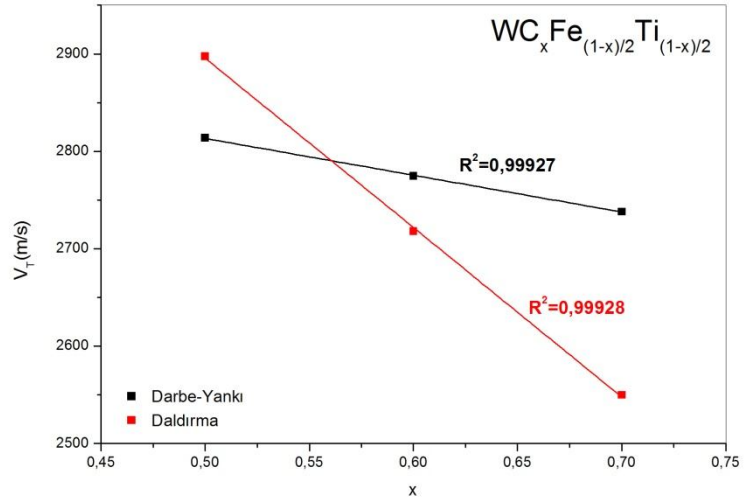


(b)

Şekil 6.39. $WC_xFe_{3(1-x)/4}Ti_{(1-x)/4}$ kompozit numunesinin yüzde oranlarının ultrases (a) boyuna ve (b) enine hıza olan grafiği

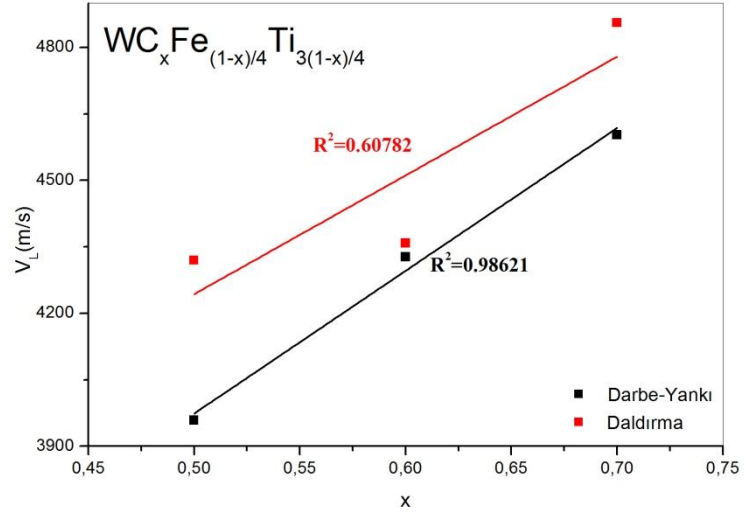


(a)

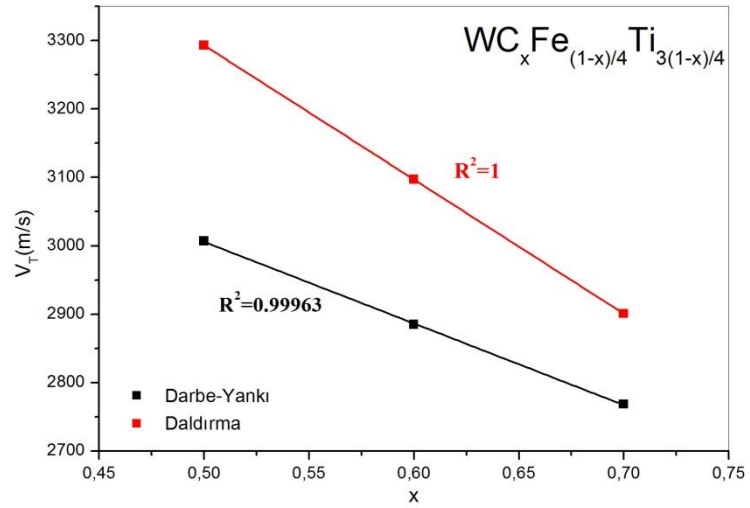


(b)

Şekil 6.40. $WC_xFe_{(1-x)/2}Ti_{(1-x)/2}$ kompozit numunesinin yüzde oranlarının ultrases (a) boyuna ve (b) enine hıza olan grafiği

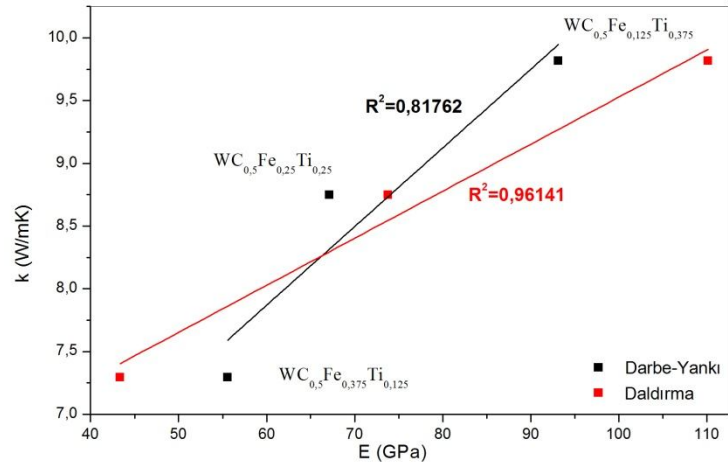


(a)

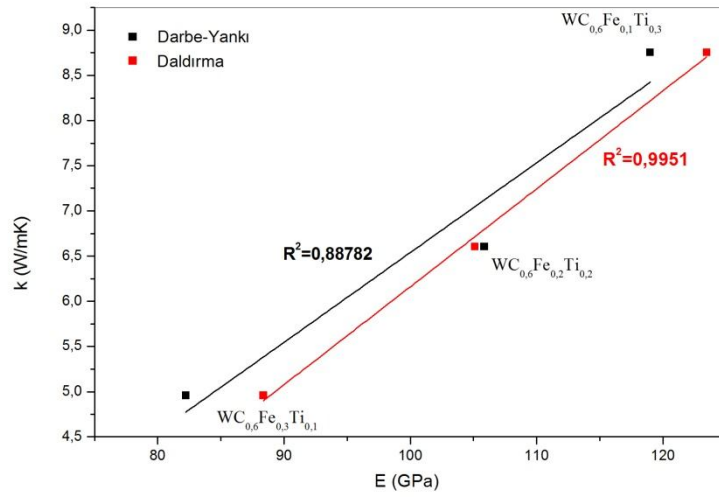


(b)

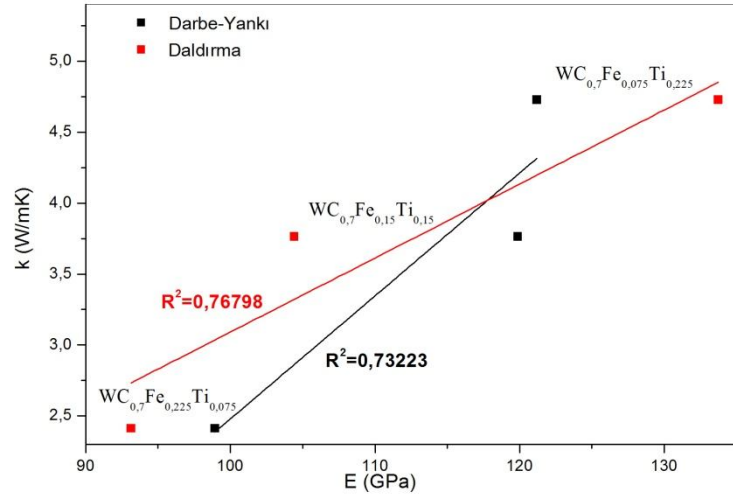
Şekil 6.41. $WC_xFe_{(1-x)/4}Ti_{3(1-x)/4}$ kompozit numunesinin yüzde oranlarının ultrases (a) boyuna ve (b) enine hıza olan grafiği



Şekil 6.42. WC_{0.5}-Fe-Ti kompozit numunesinin termal iletkenlik ile Young modülü grafiği



Şekil 6.43. WC_{0.6}-Fe-Ti kompozit numunesinin termal iletkenlik ile Young modülü grafiği



Şekil 6.44. WC_{0.7}-Fe-Ti kompozit numunesinin termal iletkenlik ile Young modülü grafiği

BÖLÜM 7

TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu tez çalışmasıyla ilk defa literatürde pek fazla değinilmemiş olan yeni üretilen kompozitlerin kendi grubu içindeki dağılımları dikkate alınarak fononların etkili olduğu malzemelerin termal ve elastik özellikleri arasındaki ilişki incelenmiştir.

Bu çalışmada toz metalürjisi yöntemiyle farklı oranlarda üretilen bazı seramik-metal kompozit malzemeler (Fe-Co-Ni, Fe-Cr-Ni, Fe-Ti-Ni, WC-Co-Ni, WC-Co-Ti, WC-Fe-Ti) hazırlanmıştır. Oluşturulan kompozitler tahribatsız test tekniği olan darbe-yankı ve daldırma yöntemi ile ultrases boyuna dalga hız ve ultrases enine dalga hız değerleri ölçülmüştür. Sinterleme öncesi ve sinterleme sonrası ağırlık kayıpları dikkate alınarak Arşimet prensibinden yararlanılarak yoğunlukları hesaplanmıştır. Bu kompozitlerin ultrases dalga hızı ölçümleri Bölüm 5.2’de ifade edilen iki farklı yöntemle farklı transdüserler kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Toz metalürjisi yöntemiyle üretilen kompozitlerin tahribatsız muayene yöntemlerinden olan darbe-yankı ve daldırma metodu kullanılarak ultrases ve elastik özellikler için gerekli analizler yapılmıştır. Ayrıca termal iletkenlik için sıcak disk yöntemi kullanılarak analizler yapılmış ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Yapılan çalışma da her bir grup kendi içinde incelenip sonra genel bir yorum yapılmıştır. Çizelgelerdeki deneysel sonuçlar literatürle karşılaştırılmıştır. Şahin ve Eker (2009), yapmış oldukları çalışmada %5, %10 ve %15 SiC partikül içeren AlSi₇Mg₂ matrisli kompozit malzemelerin, takviye oranına göre ultrasonik dalga hızlarının değişimini incelemiş ve Young modülünü hesaplamışlardır. Hesaplamış oldukları Young modülü değerleri, yoğunluk değerleri bizim değerlerimizle uyumaktadır. Gür (2001), yapmış olduğu çalışmadaki değerler ve Jiang et. al (2001) çalışmalarında sıkıştırma döküm olarak SiC_w/6061Al alaşımlı kompozitin ultrases hızları ile Young modülünü hesaplamışlardır ve değerlerimizle uyumludur. Bu konu ile yapılmış birçok çalışma vardır.

Toz metalurjisi yöntemi ile üretilen, hacimsel olarak %50, %60, %70, %80 ve %90 Fe katkısı için Fe-Co-Ni kompozit malzemesi ile ultrases boyuna ve enine dalga hızları arasındaki ilişkiyi incelenmiştir. Fe-Co-Ni kompozit numunesinde ultrases boyuna ve enine dalga hız değerleri hem kendi grubu içinde de artmaktadır. Grafiklerde her iki yöntemle ölçülen ultrases dalga hızlarının Fe oranının artışı ile artış gösterdiği belirlenmiştir. Fit edilen doğrunun R^2 (doğruluk faktörü) yaklaşık olarak 0,9'dur. $Fe_xCo_{3(1-x)/4}Ni_{(1-x)/4}$, $Fe_xCo_{(1-x)/2}Ni_{(1-x)/2}$ ve $Fe_xCo_{(1-x)/4}Ni_{3(1-x)/4}$ kompozit numunelerinin Young modülü değerlerine bakıldığında artma gözlemlenmektedir. Young modülü değeri arttıkça, termal iletkenlik değerinin ise azaldığı görülmektedir. Bu durumda Young modülüne bakılarak $Fe_{0,9}Co_{0,025}Ni_{0,075}$ kompozit numunesinin en yüksek Young modülüne sahip olduğunu söyleyebiliriz.

- Fe-Cr-Ni kompozit numunesi toz metalurjisi yöntemi ile üretilmiş ve ultrases dalga hızlarına ve yoğunluğuna bağlı olarak Young modülü hesaplanmıştır. Ultrases hızları, Young modülü, termal iletkenlik ve yoğunluk değerleri verilmiştir. Bir malzemede Young modülünün arttıkça yapı içindeki gözenekliliğin azalmış olduğu ön görülmektedir. Bu sonuç doğrultusunda yapı içindeki gözenekliliğin azalmış olmasına bağlı olarak termal iletkenliğinde artma olmalı diyebiliriz. Gadzhiev (2003), yapmış olduğu çalışmasında ZnO-tabanlı seramik yapının yüksek sıcaklıklardaki termal ve elastik özelliklerini incelemiştir. Çalışmasında artan gözeneklilik yüzde oranlarına karşı termal iletkenliğin azalmış olduğunu gözlemiştir. Bu durum grafiklerdeki lineer artışı açıklamaktadır. Lineer azalmanın sebebi ise Fe-Cr-Ni kompozit numunesinde Fe tozunun yüzde miktarının artırılması ile yapı içindeki atomlararası bağ kuvvetinin daha kararlı olduğu düşünülmektedir. Bilindiği üzere artan sıcaklıkla malzemelerde görülen iletkenlikte düşme gerçekleşmektedir. Bunun sebebi, dalga hareketi şeklinde hareket eden elektronların hareketliliğinin artan sıcaklıkla titreşimleri artan atomlar arasındaki etkileşimdir.

- Fe-Ti-Ni kompozit numunesi, metal tabanlı Fe-Co-Ni, Fe-Cr-Ni kompozit numuneleri gibi aynı yöntemle üretilmiş, gerekli ölçümler ve hesaplamalar yapılmıştır. $Fe_xTi_{3(1-x)/4}Ni_{(1-x)/4}$, $Fe_xTi_{(1-x)/2}Ni_{(1-x)/2}$, $Fe_xTi_{(1-x)/4}Ni_{3(1-x)/4}$

kompozit numunelerin yüzde oranları ile lineer bir artış gözlemlenmiştir. Bu yüzde oranları ile gözlemlenen lineer artış literatürdeki değerlerle ve yapılan çalışmalarla kıyaslandığında uyum içindedir. Gür ve Ogel (2001) yapmış oldukları çalışmada SiC partiküllerin hacimsel oranı, boyutu ve dağılımı gibi mikro yapı parametrelerinin, Al matrisli kompozit malzemelerdeki ultrasonik dalga yayılımına etkisinin nasıl olduğunu belirlemek istemişlerdir. Bu Al-SiC kompozit malzemesinde ultrasonik dalga hızının, SiC oranının artışı ile artış gösterdiğini belirlemişlerdir. Bu da bizim sonucumuzu doğrulamaktadır. Termal iletkenlik ile Young modülü arasındaki ilişki incelenmiştir. Her bir grafikte $Fe_xTi_{(1-x)/4}Ni_{3(1-x)/4}$ kompozisyonunda hem termal iletkenlik hem de Young modülü en yüksek değere sahiptir. Bu bize, yapının daha kararlı, gözenekliliğinin az olduğunu ve mukavemetinin daha fazla olduğunu ifade edebilir.

- Seramik tabanlı WC-Co-Ni kompozit numunesinin grafikleri incelendiğinde hacimsel olarak WC miktarı ile ultrases hızları ve termal iletkenlik-Young modülü grafiklerinde bir artış görülmektedir. Grafiklerde de görüldüğü gibi %Co miktarı arttıkça üretilen kompozitlerin yoğunluk, Young modülü ve termal iletkenlik değerlerinde düşüş gözlenmektedir. Upadhaya ve arkadaşları (1998), Zhu ve Manthiram (1996) kompozit malzeme içerisindeki Co bileşim oranının mekaniksel özelliklere etkilerini çalışmışlardır. Kompozit malzeme üretiminde ağırlıkça Co miktarının artması mukavemet değerlerini de düşürmüştür. Yapılan deneysel çalışmaların sayısal verileri, literatür bilgileri ile doğrulanmaktadır. Buna bağlı olarak Zhang ve Sun (1996) çalışmalarında WC-Co-Ni kompozit malzeme içindeki Ni oranının artması ile ilgili olarak termal iletkenlik değerinde arttığını gözlemlemişlerdir. Bu literatür bilgisi deneysel çalışmamızdaki ve grafikteki sonuçlarımızı doğrulamaktadır. Şekil 6.32’de ise $WC_{0,9}$ katkılı olduğunda termal iletkenlikte azalma meydana gelmiştir. Üretilen kompozitlerde bağlayıcı olarak Co ve Ni tozları çok fazla miktarda tungsten tozunu sarmaladığı (bağ dokusu yaptığı) için ve yapı içinde farklı fazların oluştuğu düşünüldüğü için sinterlenen kompozitlerin mekaniksel özelliklerin düşmesine neden olduğu söylenebilir. Gözenekliliğin artması, mukavemeti düşüreceğinden dolayı termal iletkenlik değerinin de düşebileceği ifade edilebilir.

- WC-Co-Ti kompozit numunesinin WC_x hacim oranına bağı olarak boyuna ultrases dalga hız değerleri azalırken enine ultrases dalga hız değerlerinde ise artma söz konusudur. WC-Fe-Ti kompozit numunesinde ise durum tam tersidir. WC_x hacim oranına bağı olarak boyuna ultrases dalga hız değerleri artış gösterirken enine ultrases dalga hız değerlerinde ise azalma söz konusudur. Bunun sebebi, eksene dik olarak yapılan enine dalga ölçümünde atomik yerleşimlerden ve daha iç kısımdan sinyallerin alındığı göz önüne alındığında moleküller veya atomlar arası mesafe çok büyük olduğunda çekme kuvveti birinin diğerini hareket ettirmesi için yeterli gelmeyeceğinden dolayı dalga hızı zayıflayacaktır. Ayrıca, Gür'ün (2001) yapmış olduğu diğer bir çalışmada farklı oranlarda SiC partikül takviyeli Al tozlarından kompozit malzeme üretmiştir. Yüksek bir Al/SiC partikül boyut oranının Al tozlarının sınırları boyunca SiC segregasyona (birikme, yığılma) sebep olduğu ve böylece takviyenin homojen dağılımıyla ilgili olarak düşük ultrasonik hızlar elde edilmesine sebebiyet verdiğini ifade etmiştir. Bu fiziksel durumda dikkate alınırsa enine dalga hızlarındaki ve boyuna dalga hızlarındaki azalma açıklanabilir. WC-Fe-Ti ve WC-Co-Ti kompozitlerinde de çalışmada kullanılan diğer seramik tabanlı kompozit malzemelerde de olduğu gibi termal iletkenlik ile Young modülü arasında doğrusal bir ilişki vardır. Bu durumun önceden yapılan çalışmalarda metal tabanlı kompozit malzemelerle ve alaşımlarla uyumlu olduğu görülmüştür.

Sonuç olarak bu çalışmada farklı oranlarda üretilen kompozitler ilk defa üretilmişlerdir. Elde edilen sonuçlara bakıldığında üretilen kompozitlerin literatürle uyum içinde olduğu gözlenmekle birlikte, diğer tekniklerine göre üretim süresinin çok kısa olduğu gözlenmiştir. Kullanılan ultrases yöntemleride yapıya zarar vermeden, daha kolay ve daha yüksek doğrulukta sonuçlar veren yöntemlerdir. Grafıklere bakıldığında üretimi yapılan kompozitler içinde termal iletkenlik-Young modülü grafiklerinde genelleme yapılırsa düzenli bir artış elde edilmiştir. Varolan farklılıklar sebepleri ile açıklanmaya çalışılmıştır. Bu çalışma ile üretilen kompozitlerin termal özellikleri ile elastik özellikleri arasında ilişki incelenmiş olup her iki yapı içinde fononların etkili olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca bu çalışmada ilk defa üretilen kompozit malzemelerin termal

iletkenlik ve elastik modülü değerinin malzeme hakkında bilgi edinilmesinde önemli iki parametre olduğu sonucuna varılmıştır.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Aggelis, D.G., Tsinopoulos, S.V. and Polyzos, D., 2004, An iterative effective medium approximation (IEMA) for wave dispersion and attenuation predictions in particulate composites, suspensions and emulsions. *J. Acoust. Soc. Am.*, 116, 3443–3452 p.
- Ahmad, F., and Rahman A., 2000, Acoustic scattering by transversely isotropic cylinders, *Int. J. Eng. Sci.*, 38, 325–335 p.
- Aldridge, E.E., 1969, The estimation of grain size in metals, *Non-destructive Testing*, X. Egerton (Ed.), Oxford U.P., 31-45 p.
- Amirthan, G., Kumar A.U., Balasubramanian, M., 2011, Thermal conductivity studies on Si/SiC ceramic composites, *Ceramics International*, 37, 423–426 p.
- Anderson, M.F. and Brown, D.G., 1998, The direct estimation of sound speed using pulse-echo ultrasound, *Journal of the Acoustical Society of America*, 104, 3099-3106 p.
- Andria, G., Attivissimo, F., Giaquinto, N., 2001, Digital signal processing techniques for accurate ultrasonic sensor measurement, *Measurement*, 30, 105–114 p.
- Angström, A.J., 1861, A new method of determining the thermal conductivity of solids, *Ann. Physik*, 2, 114, 513-530 p.
- Ashcroft, N.W. and Mermin, D., 1976, *Solid state physics*, Holt, Rinehart and Winston, New York.
- ASM Handbook 17, 1989, *Nondestructive evaluation and quality control*, 17, 9.
- ASM Handbook, 2002, *Thermal properties of metals*, 543 p.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Aydoğan, B., 2006, 1950 yıl sonrası görsel sanatlar ve müzik arasındaki etkileşim, İstanbul Teknik Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 101 s.
- Aygün, S.Ç., 2006, Bilimsel öncüler ve çalışmaları (Galileo Galilei), Ankara Üniversitesi Eğitim Enstitüsü, Yüksek Lisans Araştırma Yöntemleri Ders Notu, 8 s.
- Barnett, E. and Morley P., 1974, Abdominal echography, Butterworths, London.
- 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, Newyork, 1483-1490 p.
- Beecham, D., 1966, Ultrasonic scatter in metals: Its properties and its application to grain size determination, Ultrasonics, 4, 67-76 p.
- Bernabè, A., Prieto, C., Gonzalez, Y. And Every, A.G., 1999, Elastic constants of $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P}$ determined using surface acoustic waves, Journal of Physics: Condensed Matter, 11, 28, L323-L327 p.
- Beyer, R. T., 1999, Sounds of our times: two hundred years of acoustics, Springer-Verlag New York Inc., Berlin, Heidelberg.
- Bonnin, A., Huchon, R. and Deschamps, M., 2000, Ultrasonic wave propagation in absorbing thin plates application to paper characterization, Ultrasonics, 37, 555-563 p.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Boz, M., 2003, Seramik takviyeli bronz esaslı toz metal fren balata üretimi ve sürtünme-aşınma özelliklerinin araştırılması, Doktora Tezi, Ankara.
- Bridge, B. and Merikh, K., 1996, 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 p.
- Brown, A.E., 1995, Rationale and summary of methods for determining ultrasonic properties of materials at Lawrence Livermore National Laboratory.
- Bruls, R.J., 2000, The thermal conductivity of magnesium silicon nitride and related materials, Doctoral Dissertation, Eindhoven University of Technology.
- Bueno, S., Herna'ndez, M.G., Sa'nchez, T., Anaya, J.J. and Baudí'n, C., 2008, Non-destructive characterisation of alumina/aluminium titanate composites using a micromechanical model and ultrasonic determinations Part I. Evaluation of the effective elastic constants of aluminium titanate, Ceramics International 34, 181-188 p.
- Cauchy, A., 1822, Mémoires de l'académie des sciences, Tome V, 47 p.
- Chen, Y., Xu, H., Kibble, K.A.T. and Hall R., 2000, Materials and Design, 21,453-459 p.
- Chen, G., 2005, Nanoscale energy transport and conversion: a parallel treatment of electrons, molecules, phonons and photons, Oxford University Press.
- Chimenti, D.E. and Nayfeh, A.H., 1985, J. Appl. Phys., 58, 12, 4351-4538 p.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Curie J. and Curie P., 1880, Contraction et dilatations produites par des tensions dans les cristaux h mi dres   faces inclin es, C. R. Acad Sci. Gen., 93, 1137-1140 p.
- Davis, L.C. and Artz, B.E., 1995, Thermal conductivity of metal-matrix composites, J Appl. Phys. 77, 10, 4954-4960 p.
- Despretz, C., 1822 , On the conductivity of several solid substances, Ann. Chim. Phys., 19, 97-106 p.
- Dinçer, N., 2004, Hegzagonal kristallerin esneklik özellikleri üzerine bir araştırma, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İzmir.
- Durlu, T.N., 1992, Katıhal Fiziğine Giriş, Bilim Yayınevi.
- Embrechts, J.J, 2000, Simulation of first and second order scattering by rough surfaces with a sound ray formalism, Journal of Sound and Vibration, 229, 1, 65-87 p.
- Erdoğan M., 2011, Toprak işleme endüstrisinde kullanılan çizici kalemelerin mikrodalga toz sinterleme tekniği ile üretimi ve karakterizasyonu, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Afyonkarahisar, 219 s.
- Erkişi, A., 2007, Bazı bileşiklerin elektronik ve titreşim özelliklerinin yoğunluk fonksiyonel teorisi ile incelenmesi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara, 106 s.
- Fay, B., Brendel, K. and Ludwig, G., 1976, Studies of inhomogeneous substances by ultrasonic backscattering, Ultrasound in Medicine and Biology, 2, 195-198 p.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Flores, C.E., Fraudita, F., Gonzalez, C. and Pereira, D., 2010, Estudio del comportamiento de las señales obtenidas de un ensayo ultrasónico de contacto en la aleación de aluminio aa5052 homogenizada, 5th Pan American Conference For NDT, Cancun, Mexico.
- Forbes, J.D., 1851, On the progress of experiments on the conduction of heat, Undertaken at the Meeting of the British Association at Edinburgh, in 1850”, Brit. Assoc. Adv. Sci. Rept. Ann. Meeting, 21, 7-8 p.
- Fourier, J.B.J., 1822, The analytical theory of heat, Fauthier-Villars, Paris, English translation by A. Freeman (1878), Cambridge University Press, 466 p., new edition of the English translation, Dover Publications, New York, (1955).
- Franklin, B., Meteorological observations (written in reply to Cadwallader Colden, Nov. 19, 1753 and read at the Royal Society of London, Nov, 4, 1756), in The Writings of Benjamin Franklin, A. H. Smyth (Ed.), III, 1750-1759 p., The Macmillan Co., New York, 1905, 186-8 p.
- Gadzhiev, G.G., 2003, The thermal and elastic properties of Zinc Oxide-based ceramics at high temperatures, High Temperature, 41:6, 778-782 p.
- Gerçek, H., 2004, Classification of rocks based on their Poisson's ratio, ROCKMEC'2004-VIIth Regional Rock Mechanics Symposium, Sivas, Türkiye.
- German, R.M., 1996, Sintering Theory and Practice, John Wiley&Sons, New York, 8-13 p.
- German, R.M., 1996, Sintering Theory and Practice, John Wiley&Sons, New York, 3-20 p.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- 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 p.
- Goldstein, R.V., Gorodtsov, V.A., Lisoenko, D.S., 2012, Shear modulus of cubic crystals, Письма о материалах т.2, 21-24 p.
- Graff, K.F., 1982, A history of ultrasonics in physical acoustics, Academic Press, New York, 15, 297 p.
- Greenslade, T.B., 1992, The acoustical apparatus of Rudolph Koeing, The Physics Teacher, 30, 9, 518 p.
- Griffin, D., Cohen-Overbeek, T. and Campbell, S., 1983, Fetal and utero placental blood flow, Clinical Obstetrics and Gynecology, 10, 3, 565-602 p.
- Gruber, A., 1970, Mersenne and evolving tonal theory, Journal of Music Theory, 14, 1, 36-67 p.
- Gür, C.H. and Ogel, B., 2001, Non-destructive microstructural characterization of aluminium matrix composites by ultrasonic techniques, Materials Characterization, 47, 227-233 p.
- Gür, C.H., 2001, Investigation of SiC_p reinforced aluminium matrix composites by shear and longitudinal ultrasonic waves, INSIGHT, British Journal of NDT, 43, 11, 748-750 p.
- Güzel, H., 1996, Transduser tasarımı ve sıvı gıdalarda ultrasonik hız ölçümleri, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Hamouda, A.M.S., Sulaiman, S., Vijayaram T.R., Sayuti, M. and Ahmad M.H.M., 2007, Processing and characterisation of particulate reinforced aluminium silicon matrix composite, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 25, 2, 11-16 p.
- Hazewinkel, M., 2001, Stokes Formula, *Encyclopedia of Mathematics*, Springer.
- Hellier, C., 2001, *Handbook of nondestructive evaluation*, McGraw-Hill Professional Publishing, Blacklick, OH, USA.
- Hill, R., 1952, The elastic behaviour of crystalline aggregate, *Proc. Phys. Soc. A65*, 349-354 p.
- Hilliard, J.E., 1963, Grain size estimation by the intercept method, Northwestern University, Department of Materials Science and Materials Research Center, Internal Report.
- Hirse Korn, S., 1982, The scattering of ultrasonic waves by polycrystals, *Journal of the Acoustical Society of America*, 72, 1021-1031 p.
- Hirse Korn, S., 1990, Elastic properties of polycrystals, *Textures and Microstructures*, 12, 1-14 p.
- Hofmann, P., 2008, *Solid state physics: An introduction*, WILEY-VCH, Weinheim.
- Holland, M.G., 1968, Thermal conductivity and ultrasonic attenuation, *IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics*, 15, 1 p.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Hook, J.R. and Hall, H.E., 2006, Katılmal fiziki (KF), (Çev. F. Köksal, M. Altuntaş, M. Dinçer, E. Başaran), Literatür Yayıncılık, İstanbul.
- Hui, C.H., 1998, Heat and Mass Transfer, 40, 943-949 p.
- Ilcan, S., 1995, Ultrases ile betonun bazı fiziksel özelliklerinin tayini, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 78 s.
- Ingen-Hausz, J., 1789, On metals as conductors of heat, J. de Phsique, 34, 68, 380 p.
- Jacoboni, C., 2010, Theory of electron transport in semiconductors, Springer Series in Solid-State Sciences, Springer Heidelberg Dordrecht London, New York.
- Jiang, C., Wu, J. and Wang, D., 2001, Elastic modulus of SiC_w/6061Al alloy composites as-squeeze-cast, Trans. Nonferrous Met. Soc., 11, 6, 900-904 p.
- Jouppila, P., Kirkinen, P., Eik-Nes, S. and Koivula, A., 1981, Fetal and intervillous blood flow measurements in late pregnancy, In Recent Advances in Ultrasound Diagnosis, A., Kurjak and A. Kratochwil (Ed.), Excerpta Medica, Amsterdam, 226-233 p.
- Kittel, C., 1996, Introduction to solid state physics, John Wiley and Sons, New York.
- Koç, R., 1992, Ultrasonic techniques and equipment for material testing, Gaziantep Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, 93 s.
- Kröner, E., 1958, Berechnung der elastischen konstanten des vielkristalls aus den konstanten des einkristalls, Z. Phys. 151, 504-518 p.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- 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.
- Kumar, A., Jayakumar T., Raj, B. and Ray, K.K., 2003, Characterization of solutionizing behavior in VT14 titanium alloy using ultrasonic velocity and attenuation measurements, *Materials Science and Engineering: A*, 360,1–2, 58–64 p.
- Kuşhan, Ş.R., 2006, SiAlON seramiklerinde ısı iletkenliğin incelenmesi, Doktora Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 185 s.
- Kosolapova, T.Y., 1971, Carbides properties, Production and Applications, Plenum Pres, New York-London.
- Ladd, A.J.C, Moran, B. and Hoover, W.G., 1986, Lattice thermal conductivity: A comparison of molecular dynamics and an harmonic lattice dynamics, *Phys Rev B*, 34, 5058-5064 p.
- Lawless, W.N., Rytz, D. and Höchli, U.T., 1981, Thermal and elastic properties of $\text{KTa}_{0,988}\text{Nb}_{0,012}\text{O}_3$ at low temperatures, *Ferroelectrics*, 38, 1, 809-812 p.
- Li, Y., and Thompson, R.B., 1990, Influence of anisotropy on the dispersion characteristics of guided ultrasonic plate modes, *J. Acoust. Soc. Am.*, 87, 1911-1931 p.
- Liang, M.T., Wu, J., 2002, Theoretical elucidation on the empirical formulae for the ultrasonic testing method for concrete structures, *Cement and Concrete Research*, 32, 1763–1769 p.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Liao, Y., Wu, X., Liu, H., Chen, Y., 2011, Thermal conductivity of powder silica hollow spheres, *Thermochimica Acta*, 526, 178- 184 p.
- Lipmann, G., 1881, Principe de conservation de l'électricité, *Ann. Chim. Phys.*, 24, 145-178 p.
- Loosvelt, M., Lasaygues, P., 2011, A wavelet-based processing method for simultaneously determining ultrasonic velocity and material thickness, *Ultrasonics*, 51, 325-339 p.
- Malecki, I., 1969, *Physical foundation of technical acoustic*, Pergamon Press.
- March, N.H., 1996, *Electron correlation in molecules and condensed phases*, Springer, 363 p.
- Mase, G.T., Wong, T.E. and Johnson, G.C., 1990, Acousto-elasticity in layered composites, *Journal of Engineering Materials and Technology*, 112, 226-270 p.
- Mason, W.P. and McSkimin, H.J., 1947, Attenuation and scattering of high frequency sound waves in metals and glasses, *Journal of the Acoustical Society of America*, 19, 464-473 p.
- Mathew, A., 2006, *Lattice Vibrations: Phonons in Solid State*, University of Rochester.
- McIvor, S.D., Darby, M.I., Wostenholm, G.H., Yates, B., Banfield, L., King, R. and Webb, A., 1990, Thermal conductivity measurements of some glass fibre- and carbon fibre-reinforced plastics, *Journal of Materials Science*, 25, 3127-3132 p.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- McSkimin, H.J., 1961, Pulse superposition method for measuring ultrasonic wave velocities in solids, *J. Acoust. Soc. Amer.*, 33, 12-16 p.
- McSkimin, H.J. and Andreatch, P., 1962, Analysis of pulse superposition method for measuring ultrasonic wave velocities as a function of temperature and pressure, *J. Acoust. Soc. Amer.*, 34, 609-615 p.
- Miller, N.R. and Bamber, J.C., 2000, Thresholds for visual detection of Young's modulus contrast in simulated ultrasound image movies, *Physics in Medicine and Biology*, 45, 8, 2057-2079 p.
- Munro, R.G., 2000, Mechanical properties, *Handbook of superconductivity*, 569-624 p.
- Murakawa, H., Kikura, H., Aritomi, M., 2005, Application of ultrasonic doppler method for bubbly flow measurement using two ultrasonic frequencies, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 29, 843-850 p.
- Mutnuri, B., 2006, Thermal conductivity characterization of composite materials, Master of Science in Mechanical Engineering, West Virginia University, Morgantown, West Virginia.
- Nagy, P.B., 1999, Ultrasonic Nondestructive Evaluation, Ders Notları, University of Cincinnati, Dept. Aerospace Eng. and Eng. Mech., 3.12-3.27 p.
- Nakano, H., Watari, K., Kinemuchi, Y., Ishizaki, K., Urabe, K., 2004, Microstructural characterization of high-thermal-conductivity SiC ceramics, *Journal of the European Ceramic Society*, 24, 3685-3690 p.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Nanekar, P.P., Shah, B.K., 2003, Characterization of material properties by ultrasonics atomic fuels division, Bhabha Atomic Research Center, 25-29 p.
- Navier C.L.M.H., 1821, Sur les lois des mouvement des fluides, en ayant egart a l'adhesion des molecules, Ann. Chimie, 19, 244-260 p.
- Nayfeh, A.H. and Chimenti, D.E., 1988, Ultrasonic wave reflection from orthotropic plates with application to fibrous composites, J. Appl. Mech., 55, 863-870 p.
- Nayfeh, A.H. and Taylor, T. W., 1990, Dynamic distribution of displacement and stress considerations on the ultrasonic immersion nondestructive evaluation of multilayered plates, Journal of Engineering Materials and Technology, 57, 7-11 p.
- Nicoletti, D.W., Bilgutay, N. and Onaral, B., 1990, Scaling properties of attenuation and grain size, IEEE Ultrasonics Symposium, 1119-1122 p.
- O'Brien, W.D., Sagar, K.B., Warltier, D.C. and Rhyne, T.L., 1995, Acoustic propagation properties of normal, stunned and infarcted myocardium: Morphologic and Biochemical determinants, Circulation, 91, 154-160 p.
- O'Connor, B.P., 2002, The effect of crystallographic orientation on ductile material removal in silicon, The Pennsylvania State University, The Graduate School College of Engineering.
- Onaran, K., 1995, Malzeme Bilimi, Bilim Teknik Yayınevi.
- Ohozama, M., Katamine, A. and Ishii, Y., 1987, Ultrasonic testing of near surface flaws of casting, Fifth Pan Pasific Conference on Nondestructive Testing, Canada, 209-218 p.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Oral, İ., 2011, Çeşitli polifonksiyonel gruplu modifiye polistirenler ile epoksi reçinelerin sentezi ve bunlardaki ultrases hızlarının ölçülmesi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Konya, 186 s.
- Pabst, W., Gregorova, E., 2007, A cross-property relation between the tensile modulus and the thermal conductivity of porous materials, *Ceramics International*, 33, 9–12 p.
- Packman, P.F., Pearson, H.S., Owens J.S. and Young G., 1969, Definition of fatigue cracks through nondestructive testing, *Journal of Materials*, 4, 666-700 p.
- Pandey, D.K. and Pandey, S., 2010, Ultrasonics: A technique of material characterization, *Acoustic Waves*, Croatia, 466 p.
- Papadakis, E.P., 1959, Correction for diffraction losses in the ultrasonic field of a piston source, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 31, 2, 150-152 p.
- Papadakis, E.P., 1965, Revised grain-scattering formulas and tables, *Journal of the Acoustical Society of America*, 37, 4, 703-710 p.
- Papadakis, E.P., 1966, Ultrasonic diffraction loss and phase change in anisotropic materials, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 40, 4, 863-876 p.
- Papadakis, E.P., 1967, Ultrasonic phase velocity by the pulse-echo-overlap method incorporating diffraction phase corrections, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 42, 5, 1045-1051 p.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Papadakis, E.P., 1971, Effects of input amplitude profile upon diffraction loss and phase change in a pulse-echo system, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 49, 1 (Part 2), 166-168 p.
- Papadakis, E.P., 1972, Absolute accuracy of the pulse-echo overlap method and the pulse-superposition method for ultrasonic velocity, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 52, 3 (Part 2), 843- 846 p.
- Papadakis, E.P., 1976, Ultrasonic velocity and attenuation: measurements methods with scientific and industrial applications, W.P. Mason and N. Thurston (Eds), *Physical Acoustics XII*, Academic Press, New York, 277-374 p.
- Pohl, R.O., Liu, X. and Thompson, E., 2002, Low-temperature thermal conductivity and acoustic attenuation in amorphous solids, *Reviews of Modern Physics*, 74, 4, 991-1013 p.
- Poyraz, B., 2006, Kayaçların ısı iletkenliğinin incelenmesi, Cumhuriyet Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Sivas, 69 s.
- Raišutis, R., Mažeika, L., Kažys, R. and Vladišauskas, A., 2007, Application of the ultrasonic pulse-echo technique for quality control of the multi-layered electronic components, *Ultragarsas (Ultrasound)*, 62, 3, 33-38 p.
- Rajakopal, K., 2011, *Engineering Physics*, Rajkamal Electric Press, New Delhi.
- Rantanen, N.W., 1986, *Diagnostic ultrasound*, Jaypee Brothers Publishers, 261 p.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Rayleigh, L., 1899, On the transmission of light through an atmosphere containing small particles in suspension and on the origin of the blue sky, *The Philosophical Magazine*, 47, 375-383 p.
- Reuss, A., 1929, Berechnung der Fließgrenze von Mischkristallen auf Grund der Plastizitätsbedingung für Einkristalle, *Z. Angew. Math. Mech.*, 9, 49-58 p.
- Robin, G., Meulen, F. V., Wilkie-Chancellier N., Martinez, L., Haumesser, L., Fortineau, J., Griesmar, P., Lethiecq, M. and Feuillard, G., 2012, Ultrasonic self-calibrated method applied to monitoring of sol-gel transition, *Ultrasonics*, 52, 622-627 p.
- Roderick, R.L. and Truell, R., 1952, The measurement of ultrasonic attenuation in solids by the pulse technique and some results in steel, *Journal of the Acoustical Society of America*, 23, 267-275 p.
- Sachse, W. and Pao, Y. H., 1978, Determination of phase and group velocities of dispersive waves in solids, *Journal of Applied Physics*, 49, 8, 4320-4327 p.
- Sampaio, M.O, Nieto de Castro, C.A., 1998, Heat capacity of liquid terpenes, *Fluid Phase Equilibria*, 150, 789-796 p.
- Saniie, J. and Bilgutay, N.M., 1986, Quantitative grain size evaluation using ultrasonic backscattered echoes, *Journal of the Acoustical Society of America*, 80, 1816-1824 p.
- Schenck, D.R., 1999, Some formation problems for linear elastic materials, Doctor of Philosophy in Mathematics, Virginia.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Schneider, E., 1998, Nondestructive characterization of state and properties of aluminium structures, 7th European Conference on Non-destructive Testing, Copenhagen.
- Serway, R.A. and Beichner, R. J., 2000, Fenciler ve mühendisler için fizik, (Çev. Prof. Dr. Kemal Çolakoğlu), Palme Yayıncılık, Ankara.
- Shull, P.J., Chimenti, D.E. and Datta, S.K., 1994, Elastic guided waves and the Floquet concept in periodically layered plates. J. Acoust. Soc. Am., 95, 99-108 p.
- Shuyu, L., 1995, Study on the multifrequency Langevin ultrasonic transducer, Ultrasonics, 33, 6, 445-448 p.
- Sing, D., Pandey, D.K., 2009, Ultrasonic investigations in intermetallic, Pramana-Journal of physics, 72, 2, 389-398 p.
- Singh, J., 1993, Physics of semiconductors and their heterostructures-lattice vibrations: phonon scattering, McGraw-Hill, Inc.
- Sirdeshmukh, D.B., Sirdeshmukh, L. and Subhadra, K.G., 2011, Atomistic properties of solids, Springer Series in Materials Sciences, Springer Heilselberg Dordrecht London New York.
- 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 p.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Szilard, J., 1982, Examining the grain structure of metals, Ultrasonic testing, John Wiley&Sons Ltd, 217-261 p.
- Şahin., İ. And Eker, A.A., 2009, Ultrasonik test yöntemi yardımıyla SiC_p takviyeli kompozit malzemelerin elasiklik modülünün belirlenmesi, Mühendislik ve Makine, 50, 595.
- Tagieva, M.M. and Perelomova, N.V., 1983, Problems in crystal physics english, Mir Publishers.
- Thorsos, E.I., 1988, The validity of the Kirchhoff approximation for rough surface scattering using a Gaussian roughness spectrum, J.Acoust.Soc. Amer., 83, 78-92 p.
- Ting, C.S. and Sachse, W., 1978, Measurement of ultrasonic dispersion by phase comparison of continuous harmonic waves, J. Acoust. Soc. Am., 64, 3, 852-857 p.
- Timoshenko, S., 1940, Strength of materials, Part I., Van Nostrand, New York, 4 p.
- Toepler, A. and Boltzman, L., 1870, Ueber eine neue optische methode, die Schwingungen tönender Luftsäulen zu ansiren, Annalen der Physik, 217, 11, 321-352 p.
- Töyräs, J., Rieppo, J., Nieminen, M.T., Helminen, H.J. and Jurvelin, J.S., 1999, Characterization of enzymatically induced degradation of articular cartilage using high frequency ultrasound, Physics in Medicine and Biology, 44, 11, 2723-2733 p.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Tritt, T.M., 2004, Thermal Conductivity: theory, properties and applications, Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York.
- Turton, R., 2007, Katıların fiziği, (Çev. Y. K. Yoğurtçu), Aktif yayınevi, İstanbul.
- Upadhy, G.S., 1998, Cemented tungsten carbides: production, properties and testing, Noyes Publications, New Jersey.
- Vary, A., 1980, Ultrasonic measurement of material properties, Research Techniques in Non-destructive Testing V., IV, R.S. Sharpe (Ed.), Academic Press, New York.
- Voigh, W., 1928, Lehrbuch der Kristallphysik, (B. G. Teubner Verlag), Leipzig, 313-315 p.
- Wang, Y.C. and Lakes, R.S., 2005, Composites with inclusions of negative bulk modulus: extreme damping and negative poisson's ratio, Journal of Composite Materials, 39, 18, 1645-1657 p.
- Wharam, D., 2008, Chapter 8: Lattice Vibrations-Phonons.
- Wiedemann G. and Franz R., 1853, Über die Wärme-Leitungsfähigkeit der Metalle, Ann. Phys., 89, 497-531 p.
- Wilson Nunes dos Santos, Mummery, P. and Wallwork A., 2005, Thermal diffusivity of polymers by the laser flash technique, Polymer Testing, 24, 628-634 p.
- Wirgin, A., 1989, Scattering from hard and soft corrugated surfaces: Iterative corrections to the Kirchhoff approximation through the extinction theorem, Journal of the Acoustical Society of America, 85, 670-679 p.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Yagel, S., Cohen, S.M., Messing, B. and Valsky, D.V., 2009, Three-dimensional and four-dimensional ultrasound applications in fetal medicine, The National Center for Biotechnology Information (NCBI), PubMed, 21, 2, 167-174 p.
- Yamada, R., Igawa, N., Taguchi, T., Jitsukawa, S., 2002, Highly thermal conductive, sintered SiC fiber-reinforced 3D-SiC/SiC composites: experiments and finite-element analysis of the thermal diffusivity/conductivity, Journal of Nuclear Materials, 307, 1215-1220 p.
- Yang, R.B., 2003, A dynamic generalized self-consistent model for wave propagation in particulate composites, ASME, J. Appl. Mech., 70, 575–582 p.
- Yi, H., 2005, Rapid thermal conductivity measurement with a hot disk sensor Part 1. Theoretical considerations, Thermochemica Acta, 436, 122-129 p.
- Yoon, M.H. and Ramabadran, T.V., 1992, Characterization of materials using grain backscattered ultrasonic signals, Review of Progress in Quantitative NDE 11, D.O. Thompson and D.E. Chimenti (Eds.), Plenum Press, Newyork, 959-965 p.
- Zengin, B., 2005, Bir boyutlu lineer olmayan (nonlinear) bazı örgülerde yerleşmiş modların incelenmesi, Mersin Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Mersin, 97 s.
- Zhang, G.M., Zhang, C.Z., Harvey, D.M., 2012, Sparse signal representation and its applications in ultrasonic NDE, Ultrasonics, 52, 351–363 p.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Zhang, L. and Sun, B., 1996, A new hardmetal for mining with Ni-Co binder, Int. J. of Refractory Metals&Hard Materials, 14, 245-248 p.

Zhu, Y.T. and Manthiram, A., 1996, Influence of processing parameters on the formation of WC-Co nanocomposite powder using polymer as carbon source, Composites Part B, 27, 407-413 p

<http://www.uni-tuebingen.de/meso/ssscript/phononen.pdf>

http://www.ece.rochester.edu/.../Mathew_06.pdf

<http://www.alfa.com/en/gp100w.pgm?dsstk=12482>

<http://www.memsnet.org/material/tungstencarbidewcbulk/>

<http://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/aldrich/12310?lang=en®ion=TR>

<http://www.memsnet.org/material/ironfebbulk/>

<http://www.alfa.com/en/gp100w.pgm?dsstk=10456>

<http://www.alfa.com/en/gp100w.pgm?dsstk=43214>

<http://www.memsnet.org/material/nickelnibulk/>

<http://www.alfa.com/en/gp100w.pgm?dsstk=10148>

<http://www.alfa.com/en/gp100w.pgm?dsstk=10386>

ÖZGEÇMİŞ

Adı: Vildan
Soyadı: ÖZKAN
Doğum Yeri ve Tarihi: Yozgat/1982

EĞİTİM:

- 2009-2012** Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik A.B.D. Genel Fizik B.D. Doktora, Eskişehir
- 2005-2008** Afyon Kocatepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik A.B.D. Genel Fizik B.D. Yüksek Lisans, Afyonkarahisar
- 2001-2005** İnönü Üniversitesi
Fen-Edebiyat Fakültesi
Fizik Bölümü, Lisans, Malatya
- 1996-2000** YDA Afyon Lisesi, Afyonkarahisar
- 1993-1996** Şemsettin Karahisari İlköğretim Okulu, Afyonkarahisar
- 1988-1993** Yavuz Selim İlköğretim Okulu, Muş
Fatih İlköğretim Okulu, Afyonkarahisar

Doktora Tez Adı: “Bazı kompozitlerde elastik ve termal iletim özellikleri arasındaki ilişkinin deneysel olarak belirlenmesi”

Yüksek Lisans Tez Adı: “Bazı karburlu metal-matriks seramiklerin tanecik boyutlarının sinterleme sıcaklığıyla değişiminin ultrases ile incelenmesi”

Lisans Bitirme Tez Adı: “Al-poroz yapılarının elde edilmesi”

BİLİMSEL YAYINLAR:

I. Uluslararası Hakemli Dergilerdeki Makaleler (İndex)

1. V. Özkan and İ. H. Sarpün, 2012, “Examining with the Sintered Temperature of Mean Grain Size of B₄C–Al–Ni Composites by Ultrasonic Techniques” *ACTA PHYSICA POLONICA A*, Vol. 121, No:1, 184 p.

II. Uluslararası Hakemli Dergilerde Yayınlanan Makaleler

1. İ. H. Sarpün, V. Özkan and S. Tuncel, 2012, “Determination of Mean Grain Size of Various Marbles from Turkey by Ultrasonic, Attenuation and Polarize Microscopy Methods”, *J. Phys. Sci. Appl.* Vol. 2 No. 2, 12-20 p.
2. İsmail Hakkı Sarpün, Vildan Özkan, Sabri Tuncel, Rıdvan Ünal, 2009, “Mean grain size evaluation of tungsten- and boron-carbide composites sintered at various temperatures by ultrasonic methods”, *Int. J. Microstructure and Materials Properties*, 4, 1, 104-111 p.
3. V. Özkan, İ.H. Sarpün, R. Ünal, H. A.Yalım, B. Oruncak, 2008, “Effects of Rough Surfaces to Ultrasonic Measurements”, *Balkan Physics Letters*, Bogazici University Press, 235-240 p.

III. Uluslararası Bilimsel Toplantılarda Sunulan Bildiriler

1. İ. H. Sarpün, V. Özkan, H. Bodur, S. Tuncel and M. Erdoğan, 2012, “Ultrasonic investigation of (WC)Ni+Co, (WC)Ni+Mg, (TiC)+(Fe+Ni) ceramic metal composites”, *Structural Faults & Repair*, Surgeons Hall, Edinburgh, Scotland.
2. V. Özkan and İ. H. Sarpün, 2011, “Examining with the Sintered Temperature of Mean Grain Size of B₄C–Al–Ni Composites by Ultrasonic Techniques”, *APMAS 2011*, Antalya.

3. V. Özkan, İ. H. Sarpün and S. Tuncel, 2011, “Relative Effects of Porosity and Grain Size on Ultrasonic Wave Propagation in Marbles”, NDTMS-2011 International Symposium on Nondestructive Testing of Materials and Structures, İstanbul.
4. İ. H. Sarpün, V. Özkan and S. Tuncel, 2011, “Determination of Mean Grain Size of Various Marbles from Turkey by Ultrasonic, Attenuation and Polarize Microscopy Methods, 5th Pan American Conference for NDT, Cancun, Mexico.
5. İ. H. Sarpün, S. B. Hersat, V. Özkan, S. Tuncel, A. Yıldız, 2010, “The Elastic Properties Determination of Volcanic Rocks by Using Ultrasonic Method”, 10th European Conference on NDT, Moscow, Russia.
6. İsmail Hakkı Sarpün, Vildan Özkan, Sabri Tuncel, 2009, “Ultrasonic Determination of Elastic Modulus of Marbles Relation With Porosity and CaO %”, 10th International Conference-Application of contemporary NDT in Engineering, Ljubljana, Slovenia.
7. İ.H. Sarpün, V. Özkan, S. Tuncel, 2008, “Determination of Relation between Elastic Constant and Sintered Temperature in WC-Ni Composites”, 17th World Conference on Non- destructive Testing, Shanghai-China.
8. V. Özkan, İ.H. Sarpün, S. Tuncel, 2008, “Relation between Mean Grain Size and Ultrasonic Attenuation Constant in Composites”, 3rd International Non-destructive Testing Symposium and Exhibition, İstanbul, Turkey.
9. İ.H. Sarpün, V. Özkan, R. Ünal, S. Tuncel, 2007, “Determination of Mean Grain Size by Ultrasonic Methods of Tungsten Carbide and Boron Carbide Composites Sintered at Various Temperatures”, 4th International Conference on NDT of HSNT, Hellenic Society of Non Destructive Testing, Chania – Crete, Greece.

10. V. Özkan, İ.H. Sarpün, R. Ünal, H.A. Yalım, B. Oruncak, S. Tuncel, 2007, “Kaba Yüzeylerin Ultrasonik Ölçümlere Etkisi”, Turkish Physical Society 24th International Physics Conference, Inonu University, Malatya – Turkey.