



T.C.

SELÇUK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇEŞİTLİ POLİFONKSİYONEL GRUPLU MODİFİYE POLİSTİRENLER İLE EPOKSİ REÇİNELERİN SENTEZİ VE BUNLARDAKİ ULTRASES HIZLARININ ÖLÇÜLMESİ

İmran ORAL

DOKTORA TEZİ

Fizik Anabilim Dalı

Ocak - 2011
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

İmran ORAL tarafından hazırlanan "**Çeşitli Polifonksiyonel Gruplu Modifiye Polistirenler ile Epoksi Reçinelerin Sentezi ve Bunlardaki Ultrases Hızlarının Ölçülmesi**" adlı tez çalışması 28/01/2011tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı' nda DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri	**İmza**
Başkan Prof. Dr. Hüseyin YÜKSEL	.....
Danışman Yrd. Doç. Dr. Hatice GÜZEL	.....
Üye Prof. Dr. Mustafa MERDAN	.....
Üye Prof. Dr. Cemil Hakan GÜR	.....
Üye Prof. Dr. Haluk ŞAFAK	.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Bayram SADE
FBE Müdürü

Bu tez çalışması Selçuk Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü (BAP) tarafından 08101027 nolu proje ile desteklenmiştir.

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

İmran ORAL

Tarih: 28.01.2011

ÖZET

DOKTORA TEZİ

ÇEŞİTLİ POLİFONKSİYONEL GRUPLU MODİFİYE POLİSTİRENLER İLE EPOKSİ REÇİNELERİN SENTEZİ VE BUNLARDAKİ ULTRASES HIZLARININ ÖLÇÜLMESİ

İmran ORAL

Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Hatice GÜZEL
İkinci Danışman: Doç. Dr. Gülnare AHMETLİ

2011, 173 Sayfa

Jüri

Yrd. Doç. Dr. Hatice GÜZEL
Prof. Dr. Hüseyin YÜKSEL
Prof. Dr. Mustafa MERDAN
Prof. Dr. Cemil Hakan GÜR
Prof. Dr. Haluk ŞAFAK

Bu araştırmada, kimyasal modifikasyon ile değişik molekül ağırlıklarındaki ($3{,}5.10^5$ ve $5{,}0.10^5$) saf polistirenler (PS), süksinik anhidrit (SA), maleik anhidrit (MA) ve ftalik anhidrit (FA) gibi organik anhidritlerle modifiye edilmiştir. Polistiren kompozitler (KPS) ve epoksi reçinesinin (DGEBA), allilgilisiteter (AGE) ve 2,3-epoksipropilmetakrilat (EPM) ile karışımından oluşan epoksi kompozitleri hazırlanmıştır. Elde edilen bütün malzemelerin yoğunlukları ve ultrasonik darbe-yankı metodu ile ultrasonik hızları ölçülmüştür.

Ultrasonik dalga hızlarının ölçülmesinde 35 MHz' lik bilgisayar kontrollü çözümleyici, 60 MHz' lik dijital osiloskop kullanılmıştır. Ultrasonik hız ölçümleri darbe-yankı metodu ile 2,25; 3,5 ve 5 MHz frekanslarında oda sıcaklığında yapılmıştır. Elde edilen yoğunluk ve hız değerlerinden bütün numunelerin esneklik modülleri (L, G, K, E), Poisson oranları (μ) ve akustik empedans (Z) değerleri hesaplanmıştır. Böylece kimyasal modifikasyon metodu ile polistirenin aromatik halkasına çeşitli fonksiyonel grupların bağlanmasının ve DGEBA' nın AGE ve EPM modifikatörleri ile modifiye edilmesinin sırasıyla PS ve DGEBA' nın mekanik özelliklerine olan etkisi ultrasonik yöntemle araştırılmıştır.

Araştırmada elde edilen verilerden saf polistirenlerin SA, MA ve FA ile modifikasyonunun boyuna ve enine ses dalga hızlarını ve esneklik modülü değerlerini arttırdığı tespit edilmiştir. Ayrıca saf PS ve KPS' lerin çekme testi ve ultrasonik darbe-yankı tekniği ile ölçülen Young modülü değerlerinin birbirine çok yakın olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Polistiren, Anhidrit, Epoksi, Ultrases, Esneklik Modülü.

ABSTRACT

Ph. D. THESIS

SYNTHESIS OF VARIOUS MODIFIED POLYSTYRENES WITH MULTIFUNCTIONAL GROUP AND EPOXY RESINS AND MEASURING THEIR ULTRASOUND VELOCITIES

İmran ORAL

THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF SELCUK UNIVERSITY

DEPARTMENT OF PHYSICS

Advisor: Asst. Prof. Dr. Hatice GUZEL
Second Advisor: Assoc. Prof. Dr. Gulnare AHMETLI

2011, 173 Pages

Jury

Asst. Prof. Dr. Hatice GUZEL
Prof. Dr. Hüseyin YUKSEL
Prof. Dr. Mustafa MERDAN
Prof. Dr. Cemil Hakan GUR
Prof. Dr. Haluk SAFAK

In this study, the pure polystyrenes (PS) with different molecular weights ($3{,}5.10^5$ and $5{,}0.10^5$) were modified by the chemical modification with succinic anhydride (SA), maleic anhydride (MA) and phthalic anhydride (PhA). The composites of polystyrene (CPS) and composites of epoxy resin (CDGEBA) that have been formed by mixing epoxy resin with allylglycidylether (AGE) and 2,3-epoxypropyl methacrylate (EPM), were prepared.

A computer controlled analyzer with 35 MHz and a digital oscilloscope with 60 MHz were used for measuring the velocities of ultrasonic wave. The measurement of ultrasonic velocity carried out by pulse echo method at frequencies of 2,25; 3,5 and 5 MHz at room temperature. The values of acoustic impedance (Z), Poisson ratio (μ) and coefficients of elasticity (L, G, K, E) of materials were calculated by values of densities and velocities that obtained. Thus, the effect of binding various multifunctional groups to the polystyrene's aromatic ring through chemical modification and respectively, modificating the DGEBA by AGE and EPM on mechanical characteristics of the PS and DGEBA were investigated using the ultrasonic method.

By the results obtained from the investigation it have been established that the longitudinal and shear sound wave velocities and the values of all the elasticity constants of pure polystyrene were increased by modification of polystyrene with SA, MA and PA. Furthermore, it have been established that the values of Young modulus measured by the tensile test and ultrasonic method were closed to each other very much.

Keywords: Polystyrene, Anhydride, Epoxy, Ultrasound, Constants of Elasticity.

ÖNSÖZ

Beni böyle bir konuda çalışmaya teşvik ederek tez çalışmamın her safhasında desteğini ve ilgisini gördüğüm, karşılaştığım güçlüklerde değerli yardımlarını esirgemeyen tez danışmanlarım Yrd. Doç. Dr. Hatice GÜZEL ve Doç. Dr. Gülnare AHMETLİ ile değerli hocam emekli öğretim üyesi Prof. Dr. Refika KURBANLI' ya çok teşekkür ediyorum. "Tez İzleme Komitesi (TİK)" üyesi değerli hocalarım Prof. Dr. Mustafa MERDAN ve Prof. Dr. Hüseyin YÜKSEL' e değerli katkılarından dolayı teşekkür ediyorum. Tezimde kullanmış olduğum numunelerin sentezlenmeleri aşamasında bana her konuda destek olan S. Ü. Kimya Mühendisliği Araştırma Görevlisi Dr. Hüseyin DEVECİ' ye, ultrasonik ölçümler ve sonuçlarının yorumlanmasında bana verdikleri destek ve fikirlerden dolayı ODTÜ Metalürji ve Malzeme Mühendisliği bölümünden öğretim üyesi Prof. Dr. Cemil Hakan GÜR, Gebze TÜBİTAK MAM Malzeme Enstitüsü' nden Dr. Sabri TUNCEL ve Osmangazi Üniversitesi Fizik Bölümünden öğretim üyesi Doç. Dr. Gökhan SAVAROĞLU hocalarıma çok teşekkür ediyorum. Ayrıca Selçuk Üniversitesi Ahmet Keleşoğlu Eğitim Fakültesi Fizik Eğitimi Anabilim Dalı öğretim üyesi değerli hocalarım ve mesai arkadaşlarıma da katkılarından dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde sağladığı maddi desteğinden dolayı Selçuk Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Koordinatörlüğü' ne, çalışmalarım sırasında gösterdikleri sabır ve teşviklerinden dolayı eşim Yasemin, kızlarım Makbule Şeyma, Zeynep, biricik oğlum Muhammed Şeyhmus ve dualarını eksik etmeyen annem ve kardeşlerime çok teşekkür ederim.

İmran ORAL
KONYA-2011

İÇİNDEKİLER

ÖZET ..... **iv**

ABSTRACT ..... **v**

ÖNSÖZ ..... **vi**

İÇİNDEKİLER ..... **vii**

SİMGELER VE KISALTMALAR ..... **x**

1. GİRİŞ **1**

1.1. Kuramsal Temeller 3
1.1.1. Polimer 3
1.1.1.1. Polimerlerin genel yapı ve özellikleri 3
1.1.1.2. Polimerlerin sınıflandırılması 3
1.1.1.3. Polistiren 7
1.1.1.3.1. Polistirenin özellikleri ve kullanım alanları 9
1.1.1.3.2. Polistirenin modifikasyonu 10
1.1.2. Epoksi reçine 13
1.1.3. Tahribatsız muayene yöntemleri 15
1.1.3.1. Ultrasonik muayene 16
1.1.4. Ultrases 19
1.1.4.1. Ultrasesin tanımı 19
1.1.4.2. Ultrasesin tarihçesi 20
1.1.4.3. Ultrases dalgalarının temel özellikleri 26
1.1.4.4. Peryot, frekans, dalga boyu ve hız arasındaki ilişkiler 28
1.1.5. Mekanik salınımlar ve dalga teorisi 28
1.1.6. Ses dalgalarının yayılma biçimleri 34
1.1.6.1. Boyuna dalgalar 35
1.1.6.2. Enine dalgalar 35
1.1.6.3. Yüzey (Rayleigh) dalgaları 36
1.1.6.4. Plaka dalgaları 38
1.1.7. Akustik empedans 39
1.1.8. Ultrases dalgalarının iki ortam ara yüzeyinde yansıması ve kırılması 41
1.1.9. Ultrases' in enerji şiddeti 44
1.1.10. Ultrases basıncı 45
1.1.11. Ultrases oluşturulması ve algılanması 46
1.1.11.1. Piezoelektrik titreştiriciler 46
1.1.11.2. Manyetostriksiyon titreştiriciler 50
1.1.11.3. Elektriksiyon titreştiriciler 52
1.1.12. Ultrasesin etkileri 52
1.1.12.1. Ultrasesin fiziksel etkileri 52
1.1.12.2. Ultrasesin kimyasal etkileri 53
1.1.12.3. Ultrasesin biyolojik etkileri 54
1.2. Ultrasonik Test Yöntemleri 54

1.2.1. Darbe - yankı yöntemi 55
1.2.2. Transmisyon yöntemi 56
1.2.3. Rezonans yöntemi 57
1.2.4. Daldırma yöntemi 58
1.3. Ultrasesin Genel Kullanım Alanları 58
1.4. Ultrasesin Avantaj ve Dezavantajları 60
1.5. Katıların Esneklik Özellikleri 61
1.6. Polimer Karakterizasyonu için Geleneksel Analiz Teknikleri 68
1.6.1. Dinamik mekanik analiz (DMA) 69
1.7. Esneklik Modülleri Arasındaki İlişki 74
1.8. Akustik Parametreler ve Polimer Hal Arasındaki İlişki 79

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI 81

2.1. Polistiren ile İlgili Çalışmalar 81
2.1.1. Polistirenin modifikasyonu ile ilgili çalışmalar 81
2.1.2. Polistirenin ultrasonik karakterizasyonu ile ilgili çalışmalar 87
2.2. Epoksi Reçine ile İlgili Çalışmalar 89
2.2.1. Epoksi reçinesinin modifikasyonu ile ilgili çalışmalar 89
2.2.2. Epoksi reçinesinin ultrasonik karakterizasyonu ile ilgili çalışmalar 92

3. MATERYAL VE METOT 95

3.1. Kullanılan Kimyasal Maddeler 95
3.1.1. Katyonik katalizör ve anhidritler 95
3.1.2. Ticari D.E.R 321 epoksi reçinesi (DGEBA) 95
3.1.3. ER sertleştiricisi 96
3.2. Kullanılan Alet ve Cihazlar 96
3.3. Sentez ve Deneyler 97
3.3.1. Modifiye polistirenlerin sentezi 97
3.3.2. Polistiren kompozitlerin hazırlanması 98
3.3.3. Epoksi reçinesi kompozitlerinin (KDGEBA) hazırlanması 99
3.3.4. PS Kompozit numunelerinin Kalıplanması 100
3.4. Malzemelerin Analizi 100
3.4.1. Yoğunluk tayini 100
3.4.2. Ultrasonik hız ölçümü ve esneklik katsayılarının hesaplanması 101
3.4.3. Young modülünün çekme testi ile ölçümü 106
3.4.4. Modifiye polistirenlerin FT-IR analizi 107

4. DENEYSEL BULGULAR 109

4.1. Modifiye Polistirenlerin (MPS) FT-IR Analizlerine Ait Bulgular 109
4.2. MPS_{500}' lerden Elde Edilen Bulgular 112
4.3. MPS_{350}' lerden Elde Edilen Bulgular 115
4.4. KPS_{500} Kompozitlerinden Elde Edilen Bulgular 118
4.5. KPS_{350} Kompozitlerinden Elde Edilen Bulgular 127
4.6. DGEBA Epoksi Reçinesinin Modifikasyonundan Elde Edilen Bulgular 136
4.7. Çekme Testi ve Ultrasonik Yöntemle Ölçülen Young Modüllerine İlişkin Bulgular 143

5. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA 145

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 155

KAYNAKLAR 156

EKLER 171

ÖZGEÇMİŞ 173

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

A	: Titreşim genliği
A_m	: Titreşimin maksimum genliği
Ao	: Yüzey alanı
a	: Genlik
d	: Kalınlık
E*	: Kompleks Young modülü
E, E′	: Kompleks Young modülünün gerçek kısmı
E′′	: Kompleks Young modülünün sanal kısmı
F	: Yüzeye uygulanan kuvvet
f	: Frekans
G*	: Kompleks enine modül
G, G′	: Kompleks enine modülün gerçek kısmı
G′′	: Kompleks enine modülün sanal kısmı
h	: Yükseklik
J*	: Uyum
J′	: Dinamik uyum
J′′	: Kayıp uyumu
K*	: Kompleks bulk modülü
K, K′	: Kompleks bulk modülünün gerçek kısmı
K′′	: Kompleks bulk modülünün sanal kısmı
k	: Dalga sayısı, yay sabiti
L*	: Kompleks boyuna dalga modülü
L, L′	: Kompleks boyuna dalga modülünün gerçek kısmı
L′′	: Kompleks boyuna dalga modülünün sanal kısmı
M*	: Kompleks modülü
M′	: Kompleks modülün gerçek kısmı
M′′	: Kompleks modülün sanal kısmı
n_1	: 1. Ortamın kırılma indisi
n_2	: 2. Ortamın kırılma indisi
P	: Basınç
P_m	: Ultrases basıncı
Q	: Kalite faktörü
r	: Çap
T	: Peryot
Te	: Erime sıcaklığı
Tg	: Camsı geçiş sıcaklığı
t	: Geçiş süresi
V	: Hacim, ses dalgası hızı
Vb	: Boyuna ses dalgası hızı
Ve	: Enine ses dalgası hızı
V_p	: Plaka dalgası hızı
V_1	: Işığın birinci ortamdaki hızı
V_2	: Işığın ikinci ortamdaki hızı
Z	: Akustik empedans
Z_1	: 1. Ortamın akustik empedansı
Z_2	: 2. Ortamın akustik empedansı

x	: Konum
α	: Geliş açısı, absorpsiyon katsayısı
α_s	: Sınır açısı
α_{s1}	: 1. kritik sınır açısı
α_{s2}	: 2. kritik sınır açısı
α_b	: Boyuna dalga için yansıma açısı
α_e	: Enine dalga için yansıma açısı
β_b	: Boyuna dalga için kırılma açısı
β_e	: Enine dalga için kırılma açısı
ΔP	: Hacim zoru
ΔV	: Hacim değişimi
Δx	: Yer değiştirme
δ	: Faz açısı, zor ile zorlanma arasındaki faz farkı
δ_{xy}	: Kesme gerilimi
ε	: Zorlanma, deformasyon (strain)
ε_a	: Boyuna uzama şekil değişimi
ε_y	: Yanal şekil değişimi
η	: Vizkozluk
θ	: X_0 konumundaki osilatörün faz gecikmesi
θ_1	: Işığın geliş doğrultusunun normalle yaptığı açı
θ_2	: Işığın kırıldıktan sonraki gidiş doğrultusunun normalle yaptığı açı
λ	: Dalga boyu
μ^*	: Kompleks Poisson oranı
μ, μ'	: Kompleks Poisson oranının gerçek kısmı
μ''	: Kompleks Poisson oranının sanal kısmı
μ_s	: Mikro saniye
ρ	: Yoğunluk
σ	: Zor, gerilim (stress); kompleks dalga sayısı
σ_0	: Zorun genliği
τ	: Kesme zoru
φ	: Kritik açı
ω	: Açısal frekans

Kısaltmalar

AGE : Allilglisidileter

ASTM : American Society for Testing and Materials

DGEBA : Diglisidileter Bisfenol-A

DMA : Dinamik Mekanik Analiz

DSC : Diferansiyel Tramalı Kalorimetri

EP : Epoksi

EPM : 2,3 Epoksi propil metakrilat

FA : Ftalik anhidrit

FAI : Ftalik anhidrit ile modifiye edilmiş 5.10^5 molekül ağırlıklı polistiren

FAII : Ftalik anhidrit ile modifiye edilmiş $3,5.10^5$ molekül ağırlıklı polistiren

FT-IR : Fourier Dönüşümü Kızılötesi Spektroskopisi

GHz : Gigahertz

Hz : Hertz

KDGEBA : Kompozit Digiliseter Bisfenol-A

kHz : Kilohertz

KPS_{350} : Modifiye edilmiş $3,5.10^5$ molekül ağırlıklı polistiren ile $2,3.10^5$ molekül ağırlıklı polistirenden oluşturulan kompozit polistiren

KPS_{500} : Modifiye edilmiş 5.10^5 molekül ağırlıklı polistiren ile $2,3.10^5$ molekül ağırlıklı polistirenden oluşturulan kompozit polistiren

MA : Maleik anhidrit

MAI : Maleik anhidrit ile modifiye edilmiş 5.10^5 molekül ağırlıklı polistiren

MAII : Maleik anhidrit ile modifiye edilmiş $3.5.10^5$ molekül ağırlıklı polistiren

MHz : Megahertz

MPS : Modifiye edilmiş polistiren

MPS_{350} : Modifiye edilmiş $3,5.10^5$ molekül ağırlıklı polistiren

MPS_{500} : Modifiye edilmiş 5.10^5 molekül ağırlıklı polistiren

NDT : Nondestructive Testing (Tahribatsız Muayene)

NMR : Nükleer Mağnetik Rezonans

PS : Polistiren

PS_{230} : $2,3.10^5$ molekül ağırlıklı polistiren

PS_{350} : $3,5.10^5$ molekül ağırlıklı polistiren

PS_{500} : 5.10^5 molekül ağırlıklı polistiren

PMMA : Polimetilmetakrilat

PVC : Polivinilklörür

SA : Süksinik anhidrit

SAI : Süksinik anhidrit ile modifiye edilmiş 5.10^5 molekül ağırlıklı polistiren

SAII : Süksinik anhidrit ile modifiye edilmiş $3.5.10^5$ molekül ağırlıklı polistiren

TAEK : Türkiye Atom Enerjisi Kurumu

TGA : Termogravimetrik analiz

TM : Tahribatsız Muayene

TSE : Türk Standartları Enstitüsü

UV : Ultraviyole (Mor ötesi)

1. GİRİŞ

20. yüzyılın ikinci yarısında bilim ve teknolojinin hızla gelişmesi, beraberinde sanayinin temel girdisi olan malzeme ve malzeme biliminde de gelişmelerin hızlanmasına neden olmuştur. Bilimsel alanda varlıkları 1930 da kabul edilen polimerler; kolay biçim verilebilir olmaları, metallere oranla düşük yoğunlukta olmaları, üstün yüzey kaliteleri ve korozyona karşı dayanımları gibi üstün özelliklerine rağmen düşük dayanım ve sertlikleri yüzünden bazı uygulamalar için elverişli değildir (Kurbanova ve ark., 1996). Polimerlerin uygulama alanını genişletmek ve bu eksikliklerini gidermek için 1950' lerin başlarında polimer esaslı kompozit malzemeler üretilmeye başlanmıştır. Polimer kompozitler yüksek mukavemet, modül, boyut ve termal kararlılık, sertlik, aşınmaya karşı dayanıklılık, düşük ağırlık gibi özellikleriyle pek çok avantajlar sunarlar ve dolayısıyla bu özellikler polimer kompozitin toplam maliyetinin düşürülmesine etki ederler (Saçak, 2005). Bu üstün özelliklerinden dolayı yalnız kimyacıların değil makina, inşaat, tekstil, endüstri, biyoloji, tıp ve fizik gibi alanlarda çalışanların da ilgisini çeken materyallerdir. Gelişen teknoloji ile birlikte yeni kullanım alanları için farklı özellikte plastik malzeme ihtiyacını karşılamak amacıyla polimer maddelerin özelliklerinin iyileştirilmesi gerekmektedir. Polimerlerin özelliklerini iyileştirebilmenin en önemli yolu ise modifikasyondur. Modifiye edilmiş malzemelerin mekanik parametrelerindeki değişimleri incelemenin tahribatlı ve tahribatsız birçok yolu mevcuttur. Tahribatlı malzeme analizleri, malzemeye zarar vermesi, uzun zaman alması, her malzemede kullanılamaması ve ekonomik olmamasından dolayı zorunlu şartlar dışında artık tercih edilmemektedir. Bunun yerine daha ucuz, daha ekonomik ve kısa sürede sonuç veren tahribatsız muayene yöntemleri tercih edilmektedir. Tahribatsız muayene yöntemlerinden ise en çok tercih edileni "Ultrasonik Test" tekniğidir.

"Ultrasonik Test" tekniği, mekanik parametrelerin ve mikro yapının değerlendirilmesinde kullanılan tahribatsız muayene (NDT) yöntemlerinden biri olmasının yanında kalınlık ölçülmesi, yüzey düzgünlüğü ve çatlak kontrolü yapmak amacıyla da kullanılmaktadır. Tahribatsız test yöntemlerinden biri olarak kullanılan ultrasesin en önemli özelliği içinden geçtiği maddeye zarar vermemesidir. Bu özelliğinden dolayı özellikle tıp alanında kullanımı oldukça hızlı gelişmiştir (Deniz, 2005). Bunun yanı sıra ultrases, malzeme karakterizasyonunun ve kalitesinin belirlenmesi, kimyasal reaksiyonların hızlandırılması, sert maddelerin işlenip delinmesi,

metallerin ince toz haline getirilmesi, meşrubat sanayisinde şarabın eskitilmesi, biranın yabancı mayalardan arıtılması, sütün sterilize edilmesi gibi birbirinden farklı birçok alanda kullanılmaktadır (Güzel, 1996).

Ultrasonik metodlar, polimerlerin fiziksel özelliklerini karakterize eden esneklik modülleri gibi en önemli parametrelerinin hızlı ve hatasız olarak ölçülebilmesine imkân vermektedirler. Bu parametreler polimerlerin en önemli fiziksel ve mekanik özelliklerinin yanında aynı zamanda onların yapısı hakkında da bilgi içermektedir. Ultrasonik metodların en önemli özelliklerinden birisi polimerik malzemelerde kullanıldıklarında polimerlerin yapılarında bir değişikliğe neden olmamaları ve malzemeye herhangi bir hasar vermemeleridir.

Polimer malzemelerin özelliklerinin mekanik metodlar ile incelenmesi, malzeme yapısında ve özelliklerinde bir değişime neden olmaktadır. Bu değişim, malzemeye uygulanan yüksek mekaniksel gerilme değerleri ve oldukça büyük gerinmelerden kaynaklanan etkilerin sonucudur. Bütün bunlar deneysel verilerin yorumlanmasını zorlaştırmakta ve şüpheli sonuçlar vermektedir. Ayrıca mekanik testler için oldukça büyük boyutlarda polimer malzemeler kullanılmaktadır. Bu ise mekanik testlerin ekonomik olmamasının en önemli sebeplerinden birisidir. Bunun aksine ultrasonik araştırmalarda oldukça küçük boyutlara sahip numuneler kullanılabilmektedir. Akustik parametreler, malzemelerin özellikleri ve yapıları hakkında ölçüm yöntemlerine göre değişmeyen bilgi sağlamaktadır. Ultrasonik ölçümler numuneye zarar vermeden çok geniş bir sıcaklık aralığında, tek bir örnek üzerinde hatasız olarak ve hızlı bir şekilde yapılabilmektedir. Bundan dolayı en güvenilir statik mekanik metodlar dahi ultrasonik metodların yerini alamamaktadır.

Bu araştırmada, kimyasal modifikasyon ile değişik molekül ağırlıklarındaki saf polistirenler çeşitli organik anhidritlerle modifiye edilmiş, polistiren kompozitler sentezlenmiş ve epoksi reçinesi (DGEBA) değişik modifikatörlerle modifiye edilmiştir. Elde edilen bütün malzemelerin esneklik katsayıları, Archimedes prensibinden yararlanılarak ölçülen yoğunlukları ve ultrasonik darbe-yankı metodu ile ölçülen ultrasonik hızları yardımıyla ölçülmüştür. Bu sonuçlar doğrultusunda yapılan modifikasyonların polimerlerin esneklik özelliklerine etkisi araştırılmıştır.

Yapılan bu tez çalışması altı bölümden oluşmaktadır. Çalışmanın; 1. Bölümünde, polimer ve ultrases ile ilgili temel bilgiler verilmiştir. 2. Bölümde, konu ile ilgili literatür de yapılan çalışmalar hakkında bilgiler verilmiştir. 3. Bölümde, tez çalışmasında yapılan sentezlemeler, ultrasonik ölçümler ve bunlar ile ilgili deneysel

işlemler hakkında bilgiler verilmiştir. 4. Bölümde, araştırmada elde edilen bulgular çizelgeler ve şekillerle verilmiştir. 5. Bölümde, bulgulardan elde edilen araştırma sonuçları verilerek tartışılmıştır. 6. Bölümde ise araştırmdan elde edilen sonuçlar kısaca özetlenerek çeşitli önerilerde bulunulmuştur.

1.1. Kuramsal Temeller

1.1.1. Polimer

1.1.1.1. Polimerlerin genel yapı ve özellikleri

Polimer çok sayıda monomerin kovalent bağlarla birbirlerine bağlanarak oluşturduğu iri molekülün adıdır. Monomerlerden oluşan uzun polimer molekülü bir zincire, monomer molekülleri ise zinciri oluşturan halkalara benzetilebilir. Bu nedenle, polimer molekülü yerine çoğu kez polimer zinciri kavramı kullanılır. Aynı zamanda büyüklüklerinden dolayı polimer molekülleri için makromolekül adlandırılması da yapılmaktadır. Birbirlerine bağlanarak polimer molekülünün ana iskeletini oluşturan atomlar dizisine, ana zincir adı verilir. Polietilen, polistiren gibi polimerlerin ana zincirlerinde karbon atomları bulunurken, polietilenoksit ana zincirlerinde karbonla birlikte oksijen atomları yer alır. Polimerlerin ana zincirlerindeki atomlara ayrıca, yan grup denilen bazı kimyasal birimler bağlanmıştır. Çoğu polimer farklı yan gruplara sahip monomerlerden sentezlenir. Örneğin, polistirende hidrojenle birlikte fenil yan grupları bulunur.

1.1.1.2. Polimerlerin sınıflandırılması

Polimerler elde edilmelerinde, özelliklerinin incelenmesinde, işlenmesinde önemli olan çeşitli kriterlere göre sınıflandırılarak belli gruplara ayrılırlar:

1- Molekül kütlelerinin büyüklüğüne göre polimerler; oligomerler, makromoleküller ve jeller olarak üç gruba ayrılabilir. Polimerler çok geniş bir molekül kütlesi aralığına sahiptir. Bu aralık içerisinde polimerleşme derecesini kriter alarak genellikle 10^2 ile 10^5 rakamları oligomerler, polimerler ve makromoleküller arasında sınır değerler olarak öne sürülür. Küçük mol kütleli tekrarlanan birimlerden

oluşan dimer-trimer-tetramer gibi 10^2 ye kadar tekrarlanan birim içeren moleküllere oligomerler denir. Genel olarak 10^2 den büyük polimerleşme derecesine sahip olan moleküllere makromoleküller denir. Bununla birlikte 10^2 ile 10^5 arasındaki polimerleşme derecesine sahip moleküllere polimer, 10^5 ten büyük olan moleküllere makromolekül terimi kullanılmaktadır. Polimer zincirlerinin çapraz bağlarla birbirlerine bağlanarak büyük bir kütle haline gelmesi durumunda molekül kütlesi sonsuz olarak alınır ve bunlar polimerik jel olarak adlandırılır. Jel haline gelen polimerlerin ısısal, mekanik ve optik özellikleri, düz veya dallanmış polimerlere göre çok değişiktir. Jelleşen polimerler iyi çözücülerinde bile çözünmezler.

2- Oluşumuna göre polimerler; doğal, yarı sentetik ve sentetik olmak üzere üç gruba ayrılırlar. Canlı veya cansız bünyelerde doğal olarak kendiliğinden oluşan polimerler **doğal polimerler** adını alır. Kimyasal tepkimeler yardımı ile doğal polimerlerden sentezlenen polimerlere **yarı sentetik** veya **yapay polimerler** denir. Monomer denilen küçük moleküllü bileşiklerden çeşitli polimerleşme tepkimeleri ile tamamen insanlar tarafından elde edilen polimerler ise **sentetik polimerlerdir**. Polistiren sentetik polimerlere iyi bir örnektir.

3. Kaynağına göre polimerler; organik ve inorganik polimerler olmak üzere iki gruba ayrılırlar. Organik polimerler, organik monomerlerden sentezlenen polimerlerdir. İnorganik polimerler ise inorganik monomerlerden sentezlenirler. İnorganik polimerler, ana zincirinde karbon bağı içermeyen, moleküler iskeleti karbona dayalı olmayan polimerlerdir.

4- Polimerleşme tepkimelerine göre polimerler; basamaklı (kondenzasyon) ve zincir (katılma) polimerleri olmak üzere iki gruba ayrılır. Basamaklı (Kondenzasyon) Polimerler: Basamaklı polimerleşme mekanizmasının yürümesi için tepkimeye giren monomer veya monomerlerde en az iki fonksiyonel grup bulunmalıdır. Basamaklı polimerleşmede gerekli olan bu fonksiyonel gruplar –OH, NH_2, -COOH olabilir.

Zincir (Katılma) Polimerleri: Zincir polimerleşme tepkimeleri ile elde edilirler. Zincir mekanizmasında tepkimeye giren monomerin kolaylıkla iyon veya radikal oluşturabilmesi veya molekülün yeniden düzenlenebilmesi gerekir. Bunun içinde monomerin en az bir çift bağ içermesi gerekir. Bu çift bağ herhangi bir etki ile kırılarak

monomer serbest radikal veya iyona dönüşüp birbirleri ile tepkimeye girerek katılma polimerlerini verirler. Zincir polimerleşmesinde tepkimeyi yürüten esas unsur vinilik çift bağlarıdır. Bu nedenle tüm vinil polimerleri katılma polimerleri sınıfına girer.

5- Ana zincirin kimyasal yapısına göre polimerler; doymuş ve doymamış zincirli polimerler olmak üzere iki gruba ayrılır. Doymuş zincirli polimerler de homo ve hetero zincirli polimerler olmak üzere iki grupta incelenebilir. Ana zinciri aynı element atomlarından oluşan polimerler **homozincirli** polimerlerdir. Organik kökenli polimerlerin büyük çoğunluğunun ana zincirleri karbon atomlarından oluşur. Bu nedenle, homo zincirli organik polimerlere genelde karbon zincirli polimerler de denir. Polistiren, poli(metilmetakrilat), doğal kauçuk, elmas homozincirli polimerlerdir. Ana zincirleri en az iki farklı elementten oluşan polimerler **heterozincirli** polimerlerdir. Bu tür polimerlerin ana zincirlerinde karbon atomundan başka oksijen, kükürt, azot, fosfor ve diğer bazı elementler de bulunur. Proteinler, poliesterler, nükleik asitler, poliamidler, heterozincirli polimerlerdir.

Doymamış bağlar içeren polimerler ise, bazı polimerlerin ana zincirlerinde rastgele, birer atlayarak veya aralıksız birbirini takip eden ikili veya üçlü doymamış bağlar bulunabilir. Ana zincirindeki çift bağlar birer aralıklarla birbirlerini izlerse bu **konjuge** yapı, aralıksız izlerse **allen** yapıdadır. Ana zincirinde rastgele, konjuge veya allen şeklinde dizilmiş çift bağ bulunan polimerlerin tümüne genel olarak **polienler** denir. Poliasetilen, polifenilen bu gruba örnek olarak verilebilir.

6- Zincirin fiziksel yapısına göre polimerler; düz zincirli, dallanmış zincirli ve çapraz bağlı polimerler olmak üzere üç grupta toplanır. Ana zincirleri üzerindeki atomlara yalnız yan grupların bağlı olduğu polimerlere, **doğrusal polimerler** denir. Doğrusal polimerlerin ana zincirleri, kovalent bağlarla başka zincirlere bağlı değildir. Doğrusal polimerler, uygun çözücülerde çözünürler ve eritilerek defalarca yeniden işleme, kalıplama, biçimlendirme yöntemleriyle şekillendirilebilirler.

Ana zincirler üzerinde kendi kimyasal yapısıyla özdeş, kovalent bağlarla bağlı ve dal görüntüsünde başka zincirler bulunduran polimer grubuna **dallanmış polimer** denir. Dallanmış polimerler polimerizasyon sırasında dallanmaya yol açan yan tepkimeler ya da ikincil tepkimeler sonucu oluşur. Dallanmış polimerlerin özellikleri genelde doğrusal yapılarına yakındır. Ana zincirler birbirlerine değişik uzunluktaki zincir parçalarıyla kovalent bağlar üzerinden bağlı olan polimerlere, **çapraz bağlı**

polimerler denir. Çapraz bağın yoğun olması halinde ağ-yapılı polimerler elde edilir. Çapraz bağlı polimerler çözünmezler, ancak uygun çözücülerde belli oranda şişebilirler.

7- Tekrarlanan birimlerin kimyasal bileşimine göre polimerler; homopolimer ve kopolimer olmak üzere iki grupta sınıflanır: Birbirlerini takip eden tekrarlanan birimlerin kimyasal yapısı aynı olan polimerlere **homopolimerler,** farklı olan polimerlere **kopolimerler** denir. Kopolimerlerdeki tekrarlanan birimlerin ana zincirindeki dizilişi kopolimerden kopolimere değişir. Bu dizilişe göre de kopolimerler **rastgele kopolimerler**, **ardışık kopolimerler** ve **blok kopolimerler** olarak üç grupta incelenir. Kopolimerlerdeki iki farklı tekrarlanan birimin birisi ana zinciri diğeri ise yan dalı oluşturuyorsa bu kopolimer türüne **aşı kopolimeri** denir.

- A- A- A- A - A –B- B –A- A- B- A -B –B- A –A- A- B- B –A- B –

Şekil 1.1. Rastgele kopolimerler

- A -A –B- B -A –A- B –B-A- A- B -B -A -A -B -B -A -A -B -B –

Şekil 1.2. Ardışık kopolimerler

-A-A-A-A-A-A-A-A-A-A-B-B-B-B-B-B-B-B-B-

Şekil 1.3. İki bloklu kopolimer

-A-A-A-A-A-A-A-B-B-B-B-B-B-A-A-A-A-A-A-

Şekil 1.4. Üç bloklu kopolimer

-A-A-A-A-A-A-A-A-A-A-A-A-A-A-A- | | | B B B | | | B B B | | | B B B | | |

Şekil 1.5. Aşı kopolimeri

8- Isıya karşı davranışlarına göre polimerler termoplastik ve termoset polimerler olmak üzere ikiye ayrılır. Fiziksel olarak düz ve dallanmış zincir yapısına sahip olan polimerler, ısıtıldıklarında önce yumuşarlar sonra kıvamlı akışkan hale gelirler. Bu tip ısısal davranış gösteren polimerlere ısı ile yumuşayan anlamına gelen **termoplastikler** denir. Termoplastik davranış gösteren bir polimerin yumuşamaya başladığı sıcaklığa

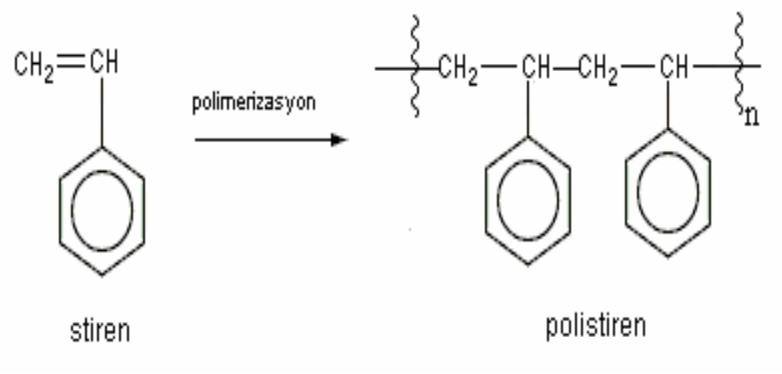
camsı geçiş sıcaklığı (Tg), kıvamlı olarak akmaya başladığı sıcaklığa ise erime sıcaklığı (Te) denir. Termoplastikler erime noktalarının üstünde bir sıcaklığa kadar ısıtılarak uygun bir sistemle, örneğin enjeksiyon ile, bir kalıp içerisine doldurulup soğutularak istenilen şekillere sahip plastik malzemeler elde edilebilir. Termoplastik polimerlerin en önemli spesifik özelliği bir kere kalıplandıktan sonra tekrar eritilerek defalarca kalıplanabilmesidir. Bu nedenle düz ve dallanmış zincir yapısına sahip termoplastikler termosetlere göre daha ekonomiktir.

Yüksek oranda çapraz bağ içeren polimerler ısıtıldıkları zaman termoplastikler gibi yumuşamazlar ve erimezler, hatta bu durumun tersine sertleşirler. Sıcaklık daha da artırılırsa doğrudan ısısal bozunmaya uğrarlar yani kimyasal olarak parçalanırlar. Bu nedenle, ısıtılınca sertleşen polimerlere ısı ile sertleşen anlamına gelen **termoset polimerler** denir. Yüksek oranda çapraz bağ içeren termoset polimerlerde ana zincirler birbirlerine sağlam bağlar ile bağlanmış oldukları için zincirlerin birbirlerinden bağımsız olarak hareket etmeleri yani akışkan hale gelmeleri mümkün değildir. Bu nedenle termoset polimerler, yüksek sıcaklıkta yumuşamazlar hep sert kalırlar, ancak belli bir yüksek sıcaklıkta gaz ürünler vererek bozunurlar.

1.1.1.3. Polistiren

Polistiren doymamış hidrokarbon olan stirenden elde edilir. Stiren endüstriyel olarak etilbenzenin katalizör ortamında dehidrojenasyonu ile elde edilir. Polistiren üretiminde kullanılan stiren 145 °C' de kaynayan bir sıvıdır. Depolanması sırasında kendi kendine polimerleşir. Bunu önlemek için az miktarda hidrokinon karıştırılarak depolanır (Kurbanova ve ark., 1996).

Polistiren; yapısında benzen halkası bulunduran aromatik bir polimerdir. Bileşiminde aromatik hidrokarbonlar, fenil, benzen ve türevlerini bulunduran polimerlere "aromatik polimerler" denir. Polimerlerin yapısında fenil halkasının olması onların kimyasal aktifliğini artırır. Böyle polimerler benzen ve türevlerinin kimyasal reaksiyonlarını verirler. Aromatik polimerlere örnek olarak "Polistiren" gösterilebilir.



Şekil 1.6. Polistirenin elde edilmesi

Stiren; kütle, çözelti, süspansiyon ve emülsiyon polimerleşmesi olarak dört farklı şekilde polimerleşebilir. Polistiren, stirenin hem iyonik hem de radikalik polimerleşmesinden elde edilebilir. Katyonik metotla düşük molekül ağırlıklı polistirenler elde edilirken, radikalik metotla yüksek molekül ağırlıklı ve amorf polistirenler sentezlenir (Memmedov ve Zeynalova, 1981).

Kütle polimerizasyonu metodu ile elde edilen polistiren diğer metotlarla elde edilen polimerlere göre nispeten daha saf olmaktadır. Ancak polimerleşmeyle birlikte viskozitenin artması karıştırmayı imkânsız hale getirir ve reaksiyon ortamında homojen bir ısı yayılımı sağlanamaz. Bu yüzden elde edilen üründe ortalama molekül ağırlığı az olmaktadır.

Süspansiyon polimerizasyon metodunda kullanılan çözücüde, hem monomer hem de elde edilen polimer çözülmemelidir. Bu metotla elde edilen polistirenin özellikleri blok polimerleşme metodunda elde edilen polistirenin özelliklerine yakındır.

Çözelti polimerizasyon metodunda kullanılan çözücü hem monomeri hem de polimeri iyi çözmelidir. Bu metotta çözücü, polimerizasyon ortamını seyrelttiği için viskozite düşer, karıştırma kolaylaşır ve daha etkin bir ısı transferi yapılabilir. Bu yüzden elde edilen üründe ortalama molekül ağırlığı yüksek olmaktadır. Ancak ortama katılan çözücü bazı sorunlar meydana getirir. Polimeri çözücüden ayırmak ve çözücüye zincir transferi, ortaya çıkan en önemli sorunlardır. Bu yöntemde çözücü olarak, zincir transfer sabiti küçük olan maddeler seçilmelidir.

Emülsiyon polimerizasyon metodunda; polistiren elde etmek için stiren, su, emülgatör ve başlatıcı kullanılmaktadır. Emülsiyon polimerizasyon metodunda reaksiyon kinetiği bakımından diğer polimerizasyon türlerine göre belirgin bir ayrım vardır. Diğer polimerizasyon yöntemlerinde polimerizasyon hızının artması ile elde edilen polimerin ortalama molekül ağırlığı az olmaktadır. Emülsiyon polimerizasyon

metodunda ise, polimerizasyon hızını azaltmadan polimerin molekül ağırlığını artırma imkânı vardır. Bir başka deyişle, reaksiyon mekanizması farklı olduğu için, reaksiyonu hızlı tutarak yüksek molekül ağırlıklı polimerler elde edilebilir.

1.1.1.3.1. Polistirenin özellikleri ve kullanım alanları

Günümüzdeki plastiklerin en önemlilerinden biri olan polistirenin ticari üretimine 1930 yılında başlanmıştır. Sert ve ucuz bir plastik olan polistiren günlük yasantımızda polietilenden daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Polistiren plastikleri, kalıplanmış eşya ve elektrik malzemesi yapımında kullanılır. Polistiren köpükleri, ısı ve ses yalıtımı malzemesi olarak, çarpmalara karşı koruyucu ambalaj malzemesi olarak oldukça yaygın biçimde kullanılmaktadır. ABD de polistirenin % 25' i yiyecek paketlemesinde kullanılmaktadır. Bilinen polistiren köpük ürünleri, ayaküstü yemek sistemlerindeki kaplarda, tabaklarda, fincan vb. yapımında ve sert ambalaj malzemesi üretiminde kullanılmaktadır. Yeniden kullanıma alınan polistiren yalıtım malzemelerinin yapımında, büro malzemeleri, yiyecek tepsileri, atık kapları, izolasyon araçları, oyuncak ve enjeksiyon kalıplama sistemiyle elde edilen malzemenin üretiminde kullanılmaktadır (Güler ve Çobanoğlu, 1997).

Polistiren renksiz, şeffaf, kokusuz, suya dayanıklı, yüksek dielektrik özelliğine sahip olan inert, lineer bir polimerdir. Ticari polistiren, ataktik ve amorftur. Polistiren, yoğunluğu 1,05- 1,08 g/cm^3 olan beyaz, amorf bir maddedir. Polistirene kolayca şekil verilebilir ve 80 - 150 °C' de elastiki olur, 200 – 250 °C' de stirene ve diğer maddelere parçalanır. Polistiren, aromatik bileşiklerde, halojenli (en çok klorlu) hidrokarbonlarda, ketonlarda ve esterlerde kolay çözünür. Ancak alifatik hidrokarbonlarda, eterlerde, düşük molekül ağırlıklı hidrokarbonlarda çözünmez. Isıya ve darbeye karşı az dayanıklı olması onun birçok kullanım alanlarını azaltmaktadır. Polistirenin bu özelliklerinin iyileştirilebilmesi için stirenin aşı ve blok kopolimeri sentezlenmektedir.

Polistiren asitlere ve bazlara karşı çok dayanıklıdır. Polistiren yüksek dielektrik özelliğine sahip olduğu için optik camlar ve optik cihazlar yapımında kullanılır. Polistirenin elektrik yalıtımının kuvvetli oluşu, üretim ucuzluğu, nem tutmaması, rutubetli ortamda elektriki özelliğini kaybetmemesi, şeffaflığı, kalıplanabilme gibi özelliklerinin iyi olmasından dolayı kullanım alanı oldukça geniş olan bir plastik maddedir. Termoplastik olduğu için ısı ile kolay şekil verilebilir.

Polistirenin bu iyi özelliklerinin yanı sıra mekaniki dayanıklılığının az olması yani gevrek olması, sıcaklığa, atmosfere ve darbeye karsı dayanıklılığının az olması ve muhtelif substratlara adhezyon kabiliyetinin olmaması gibi önemli eksiklikleri de vardır. Bu nedenle polistirenin bu eksikliklerinin giderilmesi ve bazı özelliklerinin geliştirilmesi amacıyla, modifikasyon metoduyla polifonksiyonel polistiren plastiklerin elde edilmesine yönelik yapılan çalışmaların sayısı her geçen gün artmaktadır.

1.1.1.3.2. Polistirenin modifikasyonu

Bir termoplastik olan polistirenin üretiminin oldukça ucuz olması ve birçok metal de dahil olmak üzere, diğer malzemelere iyi bir alternatif olması, polistirenin özelliklerinin geliştirilerek yeni özellikler kazandırılması ihtiyacını gerektirmiştir. Polistirenin modifikasyonu fiziksel, kimyasal ve yüzey modifikasyonu olmak üzere üç şekilde yapılabilmektedir.

Fiziksel modifikasyon metodunda, polimerler mekanik olarak karıştırılarak fiziki özellikleri arttırılabilmektedir. Fiziksel modifikasyon metodunda, polistiren bazı kauçuklarla (reçinelerle); polibütadien, polibütadienstiren, polikloropren vs. mekanik olarak karıştırılır. Bu metotla elde edilen polistirenlerin elastikliği yüksek olup darbeye karşı dayanıklıdırlar. Ancak polistirenle karıştırılmış kauçuğun yapısında bulunan çift bağdan dolayı atmosfere karşı dayanıklılığı azdır. Çift bağ atmosfer oksijeniyle oksidasyona uğrayarak, materyalin bozulmasına ve darbeye karşı dayanıklılığının azalmasına sebep olur. Polistirenin fiziksel modifikasyon metodunda birbirine karışmayan iki fazlı sistem meydana gelir. Kauçuk küçük parçacıklar halinde polistiren fazında yayılmıştır. Bu fazlar arasında hiçbir kimyasal bağ olmadığı için zamanla materyalin özelliklerinde değişme gerçekleşir ve istenilen özelliklerini kaybeder. Polistiren plastiklerinin yüksek fiziko mekanik özelliklere sahip olması için bu fazlar arasında kimyasal bağ olmalıdır (Braun, 1970**;** Kurbanlı ve ark., 2005).

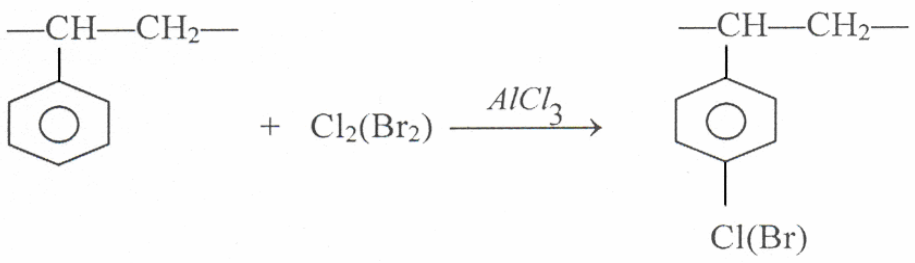
Yüzey modifikasyonu materyallerin temel özelliklerinin değiştirilmeden, yüzeylerinde fiziksel veya kimyasal değişimler meydana gelmesini sağlamaktadır. Poliolefinler kimyasal bileşimleri nedeniyle kolayca yanma özelliğine sahiptir. Bu nedenle, yanmazlık özelliği önemli bir parametre olarak uygulama alanlarında göz önünde bulundurulmaktadır. Polimerlerin bu dezavantajının farklı modifikasyon yöntemleriyle giderilmesi üzerine araştırmalar yapılmaktadır. Polimerlere yanmazlık özelliği kazandırmak için genellikle katkı maddeleri (bor türevleri, halojenler, fosfor

bileşikler, silikon, antimon vb.) eklenmektedir. Halojen katkı maddelerinden özellikle brom içeren yanma geciktirici katkılar bu alanda kullanılan en önemli katkı maddeleridir. Son yıllarda çevre örgütlerinin halojen içeren katkıların kullanımlarına kısıtlamalar getirmesi nedeniyle araştırmacılar çevreye zarar vermeyen alternatif yöntemler üzerinde çalışmalara yönelmişlerdir. Plazma yüzey modifikasyonu yöntemiyle poliolefin filmlerin yüzeyinde nanoboyutta bor-silika içerikli yanmayı geciktiren film oluşturulmasıyla sanayiide yaygın olarak kullanılan polimerlerin aleve dayanıklılık özelliği kazandırılması ve yüksek mukavemetli polimer filmlerin hazırlanması hedeflenmektedir. Yüzey modifikasyonları fiziksel, radyasyon, biyolojik moleküller ve kimyasal reaksiyon tekniklerinden biri veya ikisi kullanılarak yapılabilir (Karahan ve ark., 2007).

Kimyasal modifikasyon ise polimerlerin, farklı küçük molekül kütleli bileşikler ile kimyasal reaksiyona girmeleri sonucu oluşur. Bu metotla farklı özellikte polimer maddeler sentezlenebilir. Son yıllarda modern tekniğin taleplerini karşılayabilen çeşitli polimer materyallerine olan ihtiyacın artmasıyla bu metot sürekli gelişme göstermekte, özellikle polifonksiyonel gruplu polimerler kimyası sürekli gelişmektedir (Kurbanlı ve ark., 2005).

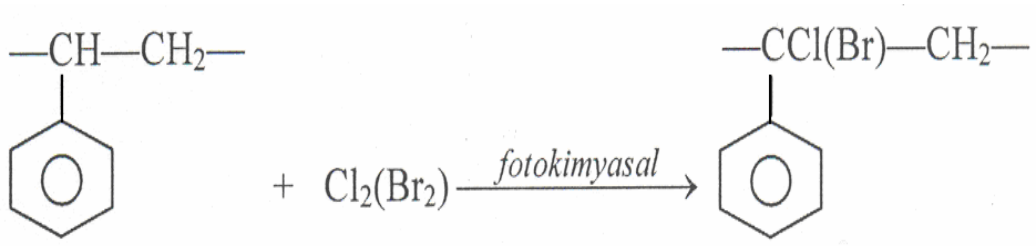
Polistiren, düşük molekül ağırlıklı bileşiklere göre reaksiyon kabiliyeti daha zayıf olmasına rağmen, belirli reaksiyon şartlarında hem alifatik karbon zincirinden hem de aromatik halkasından yer değiştirme reaksiyonu verir (Tonimoto, 1968). Fonksiyonel grup, katyonik katalizörler kullanıldığında polistirenin aromatik halkasına, radikalik katalizörler kullanıldığında ise polistirenin alifatik zincirine bağlanır.

Polistirenin halojenlenmesi, hem katalizörlerle hem de fotokimyasal metotla yapılabilmektedir. Katyonik katalizörlerle ($AlCl_3$) halojenlenme (klorlanma, bromlanma) polistirenin aromatik halkasında p-durumunda ve az miktarda o-durumunda meydana gelmektedir.

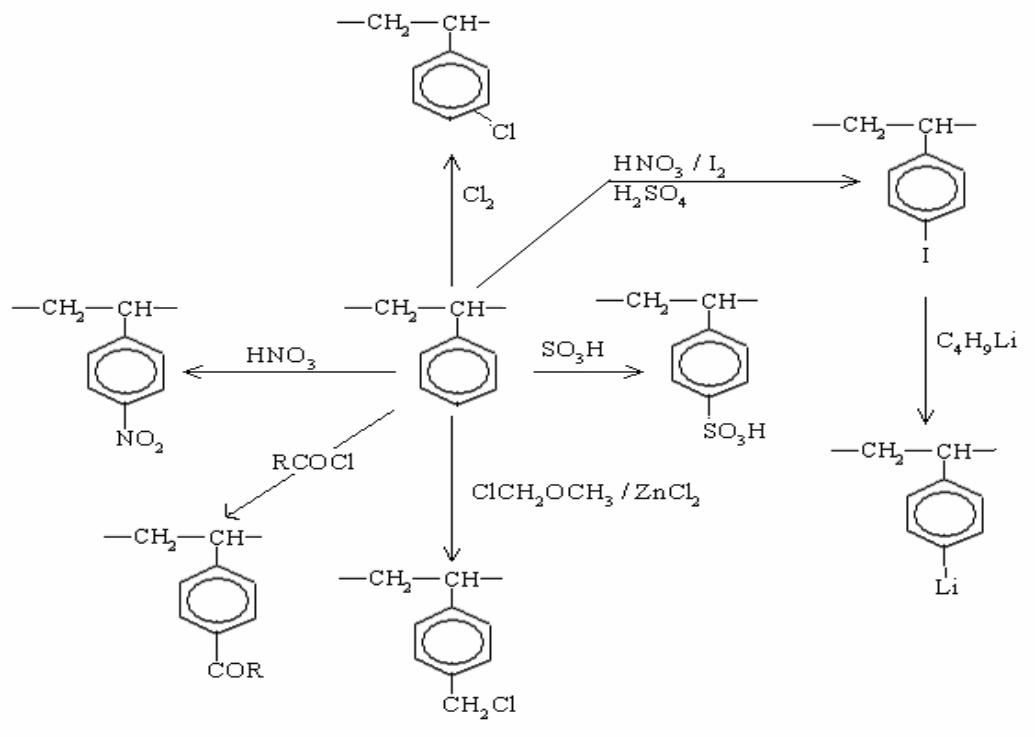


Reaksiyon fotokimyasal yapıldığında ise klorlanma ve bromlanma, polistirenin

düz zincirindeki aromatik halkaya bağlı karbon atomunda olmaktadır (Jones, 1956).



Polistiren kimyasal modifikasyon ile aromatik halkasından sülfolanma reaksiyonu verebilir. polistirenden iyot ve iyodat asidi ile H_2SO_4 katalizörlüğünde poli-p-iyotstiren sentezlenmektedir. Sentezlenen poli-p-lityumstiren bütil lityum ile reaksiyona girip, poli-p-lityum stiren elde edilir (Şekil 1.7).



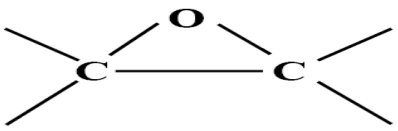
Şekil 1.7. Polistirenin aromatik halkasında yapılan bazı kimyasal modifikasyon reaksiyonları

Kullanılan değişik modifikatörler sayesinde ve uygun katalizörler ortamında yapılan kimyasal modifikasyonlar sonucu elde edilen modifiye ürünlerin yapı analizleri ve kazandıkları yeni özelliklerin tespiti ile kimyasal modifikasyon metodu incelenmekte ve sanayide kullanım alanı her geçen gün artmaktadır. Uygun monomerinin polimerleşmesinden elde edilemeyen polimerler kimyasal modifikasyon ile elde edilebilir. Uygun monomer ile sentezlenebilecek pek çok polimer sanayide düşük

maliyeti ve kolaylığı sayesinde kimyasal modifikasyonla üretilir. Ancak kimyasal modifikasyon metodunda, elde edilen modifiye ürünün yanında yan ürünler de oluşabilir. Bu yan ürünlerin esas üründen ayrılması fiziksel ve kimyasal metotlarla mümkün olsa da seçilen modifikasyon metoduna dikkat edilmelidir. Yine kimyasal modifikasyon reaksiyonu sırasında polimerin yapısından kaynaklanan bazı güçlükler olabilir. Yüksek molekül kütleli polimerlerde özellikle sterik engelden dolayı eklenen monomerin kimyasal bağlanma oranı düşük olabilir. Uygun reaksiyon şartları ve bileşim oranları uygulandığında en yüksek oranda bağlanma gerçekleştirilebilir ve ortamdaki reaksiyona girmeyen başlangıç maddelerini, esas üründen ayırmak mümkün olabilir (Mirzaoğlu ve ark., 1997).

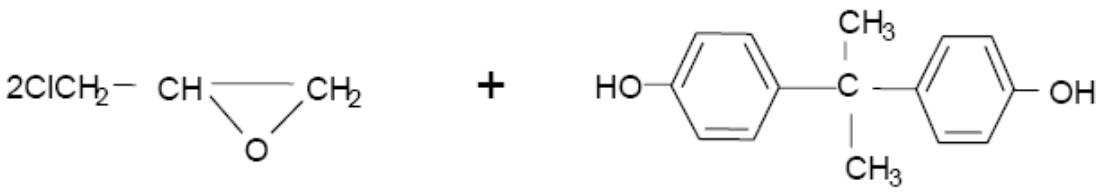
1.1.2. **Epoksi reçine**

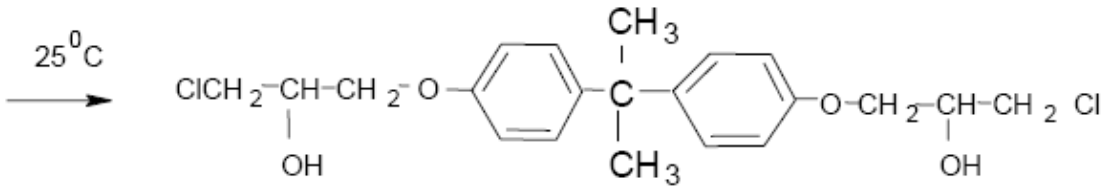
Epoksi reçineleri adını yapısında bulunan epoksi fonksiyonel gruplarından almıştır (Şekil 1.8). Epoksi reçinelerinin her bir molekülünde bir veya daha fazla epoksi grubu vardır. Epoksi reçineleri Şekil 1.8' de görüldügü gibi oksijen bağlarına sahip eteri yapısında bulundurur. Ticari epoksi reçineleri alifatik, sikloalifatik veya aromatik arka bağlar içerir (Polymeric Materials Encylopedia, 1996).



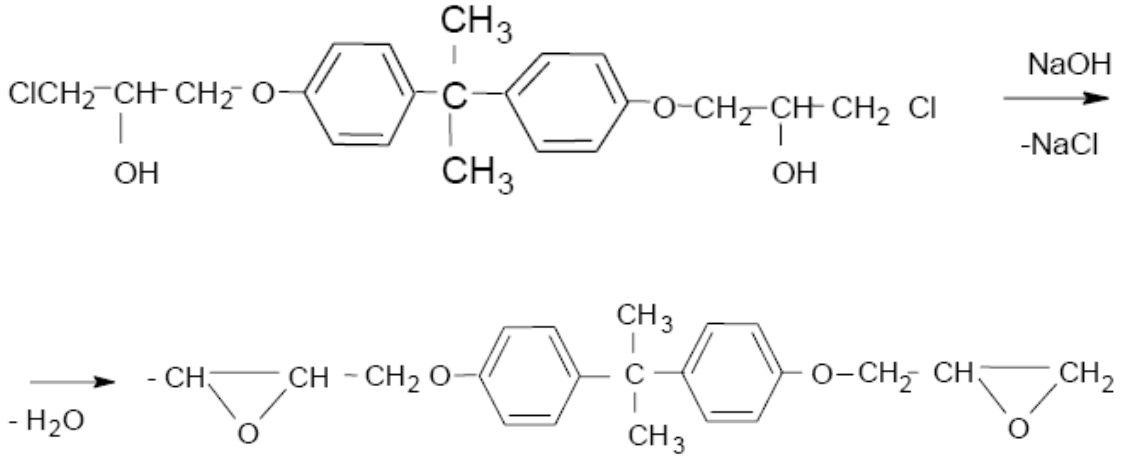
Şekil 1.8. Epoksi fonksiyonel grubu

Epoksiler, epoksi gruplarının kendi aralarında homopolimerizasyonu veya anhidrid, amin, novalak gibi maddelerle reaksiyona girmesiyle elde edilirler. En sık kullanılan epoksi reçinesi diglisidileter bisfenol-A (DGEBA)' dır. DGEBA epoksi reçineleri alkali katalizör eşliğinde epiklorhidrin ile bisfenol-A'nın iki basamaklı reaksiyonu sonucunda sentezlenir.

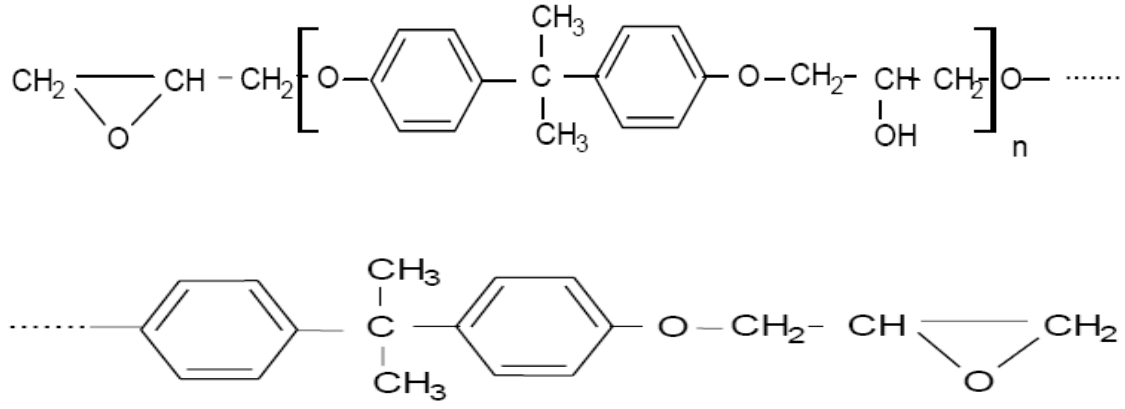




Elde edilmiş klorhidringlikolden bazik ortamda HCl ayrılır ve epoksi oluşur.



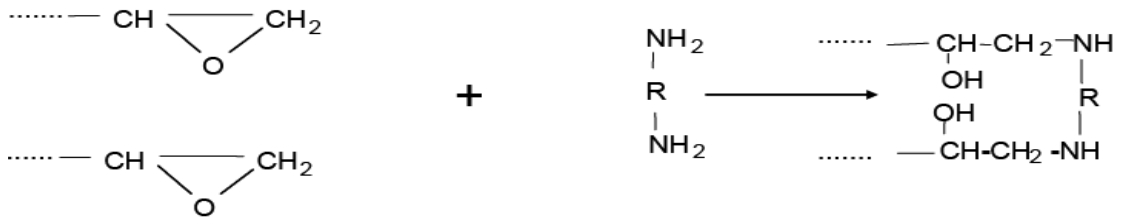
Meydana gelen bu madde yeniden bisfenol – A, sonra epiklorhidrinle reaksiyona girerek zincirin uzamasına sebep olur. Epoksi reçinesinin genel formülü aşağıdaki gibidir.



n = 2-7

Şekil 1. 9. Epoksi reçinesinin umumi formülü

Böyle polimerleri çapraz bağlayarak sertleştirmek için çeşitli bileşikler kullanılır. Böyle sertleştiriciler makro molekülde olan fonksiyonel gruplarla reaksiyona girerek onları birbirine bağlarlar. Sertleştirici olarak diaminler, poliaminler ve poliamidler, çeşitli anhidritler kullanılır. Sertleşme esnasında erimeyen ve çözünmeyen çapraz bağlı polimerler oluşur (Haris, 1986). Buna örnek olarak aminlerle sertleşme prosesinin mekanizmasını gösterebiliriz (Şekil 1.10):



Şekil 1.10. Epoksi reçinenin diaminle termoset polimere dönüştürülmesi

Epoksilerin çapraz bağlanması sırasında uçucu madde oluşmaz, çapraz bağlanma sonrası büzülme oranları da (% 1-5) düşüktür. Ancak fiyatları yüksektir ve pişirme zamanları uzundur. Pişirme zamanını azaltmak amacıyla hızlandırıcılar kullanılarak çapraz bağlanma tepkimeleri hızlandırılır. Kullanım sıcaklıkları polimer özelliklerine bağlı olarak 150 ºC ye çıkar (Velde, 1992).

1.1.3. Tahribatsız muayene yöntemleri

"Tahribatsız Muayene (TM)", bir malzemeye zarar vermeksizin, o malzemenin özellikleri hakkında bilgi veren malzeme muayene yöntemlerini tanımlamak için kullanılmaktadır. TM' de temel amaç, test edilen bir parçadaki hataları ortaya çıkarmaktır. Klasik kalite kontrolün temel yöntemi olan tahribatlı testlerin temelinde yatan riski minimuma indirme ve hatta tamamen ortadan kaldırmak ihtiyacı gelişen teknolojide "Tahribatsız Muayene" adıyla anılan bir ölçme ve kontrol disiplininin gelişmesinde en önemli etkenlerden biri olmuştur. Malzemeyi tahrip etmeden ve üretim akışını engellemeden en ekonomik şekilde kalite kontrolü ancak tahribatsız malzeme muayene yöntemleri ile sağlanır.

Tahribatsız muayene yöntemleri hemen hemen üretim işlemlerinin her aşamasında, işletme sırasında, periyodik bakımlarda ve yeni ürünlerin geliştirilmesi sırasında kalite kontrol aracı olarak kullanılmaktadır. Tahribatsız, hızlı ve hassas

olmaları, genellikle anında sonuç alınabilmesi ve günümüz şartlarında tüm verilerin ve sonuçların bilgi-işlem sistemlerinde korunabilmesi bu yöntemlerin kullanılmasının en önemli nedenlerindendir. TM yöntemleri sayesinde bileşenlerin, sistemlerin ve tesislerin güvenilir ve emniyetli bir şekilde çalışmaları sağlanmaktadır. Malzemelerin yapı ve özelliklerinin incelenmesi anlamına gelen malzeme muayenesi, tahribatsız ve tahribatlı muayene olmak üzere iki kısma ayrılır. Malzemelerde değişik nedenlerle oluşan kusurların tahribatsız olarak incelenmesi şeklinde tanımlanan tahribatsız malzeme muayenesi için değişik yöntemler uygulanır. Bunlar Çizelge 1.1' deki gibi sınıflandırılabilir (Ege ve Göktepe, 2004);

Çizelge 1.1. Tahribatsız muayene yöntemleri

	1- Yüzey Yöntemleri	**2- Hacimsel Yöntemler**	**3- Birleşik Yöntemler**
1	Gözle Muayene	Radyografik Muayene	Sertlik Testi
2	Manyetik Parçacık Testi	Ultrasonik Muayene	Akustik Emisyon Testi
3	Sıvı Penetrant Testi		Vakum Testi
4	Girdap Akımları Testi		Kaçak Testi
5			Malzeme Kalınlık Testi
6			Boya Kalınlık Testi
7			Hidrostatik Test
8			Pnömatik Test

Çizelge 1.1' den görüldüğü gibi günümüzde birçok tahribatsız muayene yöntemi olup bunların en basit olanı göz ile muayenedir. Göz ile gözükmeyen yüzey süreksizlikleri penetrant veya mağnetik test yöntemleriyle ortaya çıkarılmaktadır. Bulunan hatalar ciddi bir durum gösteriyorsa, daha karmaşık olan ultrasonik veya radyografi gibi hacimsel yöntemlerin uygulanması da gerekir. En çok kullanılan TM yöntemlerini, göz ile muayene, sertlik testi, kaçak testi, mağnetik parçacık testi, sıvı penetrant testi, girdap akımları testi, radyografik muayene ve ultrasonik muayene şeklinde saymak mümkündür. Bunların yanına son zamanlarda çokça kullanılan diğer bir tahribatsız muayene yöntemi olarak akustik emisyon testi de eklenebilir. Bu yöntemlerden sadece konumuzla ilgili olan ultrasonik muayene yönteminin temel prensipleri, tipik uygulamaları, avantajları ve sınırlamaları aşağıda kısaca açıklanmıştır.

1.1.3.1. Ultrasonik muayene

Ultrasonik dalgalar, malzemelerin atomik ya da moleküler titreşimlerini içeren mekanik dalgalardır. Ultrasonik dalgalar ve mekanik titreşimler; malzemenin elastik limitinin altındadır ve parçalara bir zarar vermeden gerçekleştirilir. Bu nedenle en

yaygın kullanılan tahribatsız muayene yöntemlerinden birisi ultrasonik muayene yöntemidir (Lee ve Suen, 1990).

Ultrasonik muayene, yüksek frekanslı (20.000 Hz. frekansının üzerinde) ses dalgaları ile gerçekleştirilen bir TM yöntemidir. Bu yöntemde, bir ses kaynağı (genellikle piezoelektrik kristal) tarafından üretilen ses dalgaları malzeme içinde yayılarak malzeme hakkında çeşitli bilgiler verir. Bu bilgiler, dalgaların malzeme içinde enerji kaybetmesinden (zayıflama), hareket hızlarından, ara yüzeylerden veya hatalardan yansımasından (darbe-yankı) veya karşı yüzeye geçiş şeklinden (transmisyon) elde edilebilir. Yansıyan veya geçiş yapan ses enerjisinden, hatalar veya malzeme özellikleri hakkında değerlendirmeler yapılabilir. Yansıyan ses enerjisi miktarı, yansıtıcının yüzey yapısına ve malzemenin metalurjik yapısına bağlıdır. Metal - gaz ara yüzeylerinde hemen hemen tam yansıma, metal - sıvı veya metal - katı ara yüzeylerinde ise kısmi yansıma gerçekleşmektedir. Ultrasonik test, radyografiye göre çok daha fazla nüfuziyet gücüne sahiptir ve oldukça küçük hataların yerlerini ve boyutlarını belirleme imkânı vermektedir. Bir ultrasonik cihazın ekranında gözlenen ses yansımalarının (yankıların) konum ve genliklerinden, hataların yerlerini ve boyutlarını tespit etmek mümkün olmaktadır. Hatalar ses demetine dik konumda olduğunda optimum yansıma elde edilmektedir. Ultrasonik teste ilişkin bir uygulama Şekil 1.11' de verilmiştir. Ultrasonik teste ait ayrıntılı bilgiler daha sonra verilecektir.



Şekil 1.11. Ultrasonik muayene uygulamasına ait örnek

Bu metod metalik veya metalik olmayan malzemelerde beklenen hacimsel hatalar ile çatlak türü yüzey hatalarının tespiti için kullanılabilir. Muayene parçasında

ses hızı ve ses zayıflatması özelliklerinin bölgesel olarak güçlü değişimler göstermesi durumunda doğru değerlendirme yapmak güçleşir. İri tane yapısı veya soğurma nedeniyle ses zayıflamasının çok fazla olduğu malzemelerde muayene bazen imkânsız olabilir. Sıcak muayene yüzeyleri için özel olarak tasarlanmış problar kullanılmalıdır. Muayene için ulaşılabilir durumda yeterince geniş bir yüzey hazırlanmalıdır. Yüzey durumu muayene parametrelerini doğrudan etkiler. İnce parçaların muayenesi nispeten güçtür. Ses demeti eksenine paralel konumlanmış düzlemsel süreksizliklerin tespiti mümkün olmaz. Genellikle referans standard bloklara ihtiyaç vardır. Yüksek frekanslı ses dalgaları prob adı verilen bir parça içindeki piezoelektrik özellikteki kristal tarafından üretilir. Metalik malzemelerin ultrasonik muayenesinde kullanılan frekans aralığı 500 kHz ile 10 MHz arasında olabilir. Muayene parçasının mikroyapı özelliklerine göre uygun frekans belirlenir. Prob muayene yüzeyine temas ettirildiğinde ses dalgalarının malzeme içine nüfuz edebilmesi için uygun bir temas sıvısı (yağ, gres, su, vb.) kullanılmalıdır. Prob muayene yüzeyinde gezdirilerek (tarama) parça geometrisinden kaynaklanan yankılar dışında yankılar olup olmadığı gözlenir, varsa bu yankıların konumları ve yükseklikleri değerlendirilerek hata çözümlemesi yapılır.

Ultrasonik muayene için en yaygın kullanılan dalga türleri boyuna (basınç) ve enine (kesme) dalgalardır. Normal prob denilen sıfır derece giriş açısına sahip problarla çalışılırken malzeme içinde ilerleyen dalgalar boyuna dalgalardır. Açılı problar ise malzeme içine genellikle 45°, 60° ve 70° giriş açısı ile (bu değerler çelik malzeme içindir) enine dalgalar gönderir.

Ultrasonik hata dedektörleri son yıllarda küçülmüş ve fonksiyonları da artmıştır. Portatif, kolay taşınabilir ve uzun süreli kullanıma imkân veren bataryalar, kalibrasyonları çok kolay yapılabilen cihazlar ultrasonik muayeneyi yeni elemanlara sevdiren avantajlar arasında sayılabilir. Bu avantajlar sayesinde birim zamanda yapılan muayenelerin sayısı ve güvenilirliği artmaktadır. Bu yöntemde operatörün uluslararası geçerliliğe sahip bir sertifikalı eleman olması ve tecrübesi, işin kalitesini birinci derecede etkileyen son derece önemli bir parametredir.

Demir dökümde özellikle döküm hatalarının tesbitinde kompleks parçalarda ultrasonik muayene yetersiz kalmaktadır. Yuvarlak kesitli parçalarda, köşelerdeki hatalarda, çekinti boşluklarının çok küçük seviyelerde olması durumunda ancak işlendiğinde işleme yüzeyinde çıktığında çok büyük bir çaresizlik içine düşülmektedir. Bu olumsuzlukları dışında ultrasonik muayene, yapılan yatırımı bir kontrolda geri alabilen, düşük maliyetli, güvenilir bir metoddur.

1.1.4. Ultrases

1.1.4.1. Ultrasesin tanımı

Su dalgaları, ses dalgaları, ışık dalgaları, radyo- tv dalgaları, mikro dalgalar v.b gibi birçok bilinen dalgalar vardır. Bunlardan ışık dalgaları, radyo-tv dalgaları, mikro dalgalar elektromağnetik dalgalar olup hem maddesel ortamda hem de boşlukta rahatlıkla yayılabilmektedirler. Fakat su ve ses dalgalarının yayılabilmeleri için esnek bir ortam gerekmektedir. Bu şekilde esnek bir ortamda yayılabilen dalgalara mekanik dalgalar adı verilir ve esnek ortamın denge konumu etrafında salınmasıyla oluşur. Ultrasonik dalgalar, mekanik titreşimlerdir ve farklı materyallerde farklı dalga boylarına sahiptirler. Bu, materyalin elastik özelliklerine bağlıdır (Anık ve Anık, 1977). Sesin yayılması ancak maddesel ortamda mümkündür ve sesin oluşması için bir maddesel ortam titreşime zorlanmalıdır. Mekanik dalgalar esnek ortamın herhangi bir noktasına uygulandığında, dalga tarafından bu noktaya uygulanan kuvvet bu noktadan diğer noktalara da aktarılır. Ortamın tüm olarak hareket etmediği, yalnızca titreşimin yer değiştirdiği bu tür mekanik dalgalarla enerji, madde içerisinde bir noktadan diğerine iletebilir (Aral, 1989).

Mekanik dalgalar olan ses dalgaları; katı, sıvı ve gazlar (homojen olan) içerisinde sabit hızlarda ilerlerler. Ses, gaz ve sıvılarda boyuna dalgalar şeklinde ilerlerken, katılarda hem boyuna hem de enine dalgalar şeklinde ilerlemektedir. Ses boşlukta yayılamaz. Çünkü boşlukta sıkışmaları iletecek bir madde bulunmamaktadır. Ses dalgalarının hızı, yayıldığı ortamın sıkışabilirliği ve yoğunluğuna bağlıdır (Güzel, 1996; Bayer ve Karabulut, 2004; Ilıcan, 1995).

Ses için değişik kişiler tarafından yapılan çok çeşitli tanımlar vardır. Ses; titreşimin gaz, katı, sıvı gibi elastik bir ortam içerisinde hareketi olarak tanımlanır. Avundukoğlu ve Turhan' a (2007) göre ses; Titreşen bir cismin çevresindeki ortamı aynı frekansta titreştirerek ve ortama göre boyuna veya enine ilerleyerek işitme duyusu (20 Hz-20 kHz) ve aygıtlarını (20 kHz'den yüzlerce MHz'e [~500MHz] kadar) uyaran akustik dalgalardır. Sesin bu tanımı kapsamlı tanımlardan birisi olmasına rağmen bazı eksik yanları da yok değildir. Dolayısıyla ses daha kapsamlı olarak; Bir cismin titreştirilmesiyle oluşan, ortama göre boyuna, enine veya bu ikisinin bileşimi ile yüzey veya lamb dalgaları şeklinde de yayılabilen, işitme duyusu (20 Hz - 20 kHz) ve aygıtlarını (20 kHz ~ 1 GHz) uyarabilen mekanik dalgalardır.

Seste olduğu gibi ultrases ile ilgili değişik bilim insanı tarafından yapılan birçok tanım vardır. Örneğin, Özden (1981) ultrasesi; duyma eşiğinin üzerinde kalan frekanslardaki ses olarak tanımlarken, Aral (1989) ultrasesi; insan kulağının işitemeyeceği 20 kHz ile 1GHz frekans aralığındaki akustik dalgalar olarak tanımlamaktadır. Ultrases ile ilgili diğer tanımlar genelde bu tanımlara benzer olup sadece frekans özelliğine vurgu yapmaktadırlar. Ultrases, titreşim hareketinden ibaret olan sesten başka bir şey değildir. Titreşim hareketi olarak doğar, titreşim hareketi olarak yayılır ve titreşim hareketi olarak algılanır (Özden, 1981; Aral, 1989). Ultrases yukarıda yapılan geniş kapsamlı tanımdan yola çıkılarak şöyle de tanımlanabilir; Proplar aracılığıyla oluşturulan, ortama göre boyuna, enine veya bu ikisinin bileşimi (Yüzey, Lamb, Stoneley ve Sezawa dalgaları) şeklinde sadece maddesel ortamlarda yayılabilen, insan kulağı tarafından algılanamayan ancak bazı hayvanlar ve elektronik cihazlar ile algılanabilen, 20 kHz ile 1GHz aralığında frekansa sahip olan mekanik dalgalardır.

1 GHz frekansın üzerindeki ses dalgalarına ise hipersonik ses denir. Ultrases dalgaları yüksek (ultra) frekanslı ses (sonic) dalgalarıdır. Tahribatsız test metodu (NDT) uygulamalarında, ultrasonik frekanslar genellikle 50 kHz' den birkaç GHz kadar yüksekliğe sıralanır (Aral, 1989).

Ultrasonik enerji gaz ortamlarda hızla zayıflar, bu özellik ultrasonik kontrol için önemli bir avantajdır. Ses, sıvı ve katı ortamlarda, havadakinden daha hızlı ve daha az enerji kaybederek yayılır. Ses dalgalarının hızı ortamın sıkışabilirliği ve yoğunluğuna bağlıdır. Az sıkışabilir madde sesi daha hızlı iletir. Buna göre ses en hızlı katılarda en yavaş gazlar içerisinde iletilir. Havadaki ses hızı, 20 °C' de ortalama olarak 331 m/s, sudaki ses hızı yaklaşık 1500 m/s' dir (Güzel ve Merdan, 1998).

1.1.4.2. Ultrasesin tarihçesi

Duyulabilir ses ile malzeme muayenesi eski zamanlardan beri yapılmaktadır. Eski çağlarda üretilen çanak, çömlek, kılıç gibi malzemelerin kalitesi malzemeye sert bir cisimle vurularak oluşturulan karakteristik sesin dinlenmesi yoluyla tayin edilirdi. Daha sonra gelişen teknoloji aranan süreksizliğin daha hassas olarak ölçülmesi ihtiyacını ortaya çıkarmıştır (Tuncel, 1987). Endüstriyel uygulamalarla birlikte birçok mühendislik teorileri gibi ultrases, en büyük ve en hızlı gelişimini 19. yy sonu ve 20. yy' da gerçekleştirmiştir; fakat genel ses dalgalarını anlamamız oldukça eskidir.

Antropolistlere göre ilkel insanlar avlanırken yararlandıkları kurtlar sayesinde farkında olmadan ultrasonikten faydalanmiş oldular. Böylece ultrasonik ilk kez kullanılmış oldu (Wade, 2000). M.Ö. 240' larda, Yunan filozof Chrysippus, su içinde dalgaları gözlemleyerek, sesin dalganın şeklini aldığı tahmininde bulundu. Fakat Galileo Galilei (Akustiğin babası olarak bilinir) ve Martin Mersenne' nin sesi tanımlayan ilk kuralları geliştirmesi 16. yüzyılın sonu ve 17. yüzyılın başına rastlar.

Sesin ilk matematiksel teorisini 1686' da Isaac Newton parçacıklar arasında iletilen basınç puls (pulse) ' un bir serisi olarak yorumlayarak geliştirdi. Newton teorisi dağılma gibi dalga olaylarını da hesaba kattı. Sonra Euler, Lagrange ve d'Alembert' in Newton' un teorisini genişletmesi dalga denkleminin geliştirilmesini sağladı.

Dalga eşitliği ses dalgalarının matematiksel olarak açıklanmasına olanak verir. 19. yüzyılın sonunda ultrasoniğin en ünlü fizikçilerinden biri olan Lord Rayleigh, ultrasonik tahribatsız test yöntemlerinde yaygın olarak kullanılan Rayleigh dalgalarını ortaya çıkardı. Rayleigh ayrıca parça içinde yayılan, Lamb dalgaları olarak adlandırılan, yönlendirilmiş dalgaları keşfeden Lamb ile çalıştı. Dalga yayılımı için kapalı form denklemlerinin hemen hemen hepsi 19. yüzyılın sonunda çözüldü.

Modern metodları gelişmiş olmaına rağmen, ses dalgaları tahribatsız test yöntemleri için yüzyıllardır kullanılmaktadır. Sert bir cisimle üretilen malzemeye vurularak, malzeme içinde çatlak olup olmadığı hakkında bilgi sahibi olunabilir. Malzemeye vurarak üretilen titreşimler 20–20000 Hz frekans aralığındadır. Görüldüğü gibi bu test metodu yalnızca duyulabilir frekanslara sahip olabilecek genişlikteki kusurlara karşı hassastır. Bir nesneye hafifçe vurma testi sağlıklı ses çıkıp çıkmadığını görmek için basit ve zaman almayan bir testtir ve bu vurma testi "çan gibi ses çıkarma" ve "çınlama" gibi ifadeler kazandırmıştır. Bu test, bir objenin içindeki çatlak veya kusurun onun doğal frekansını değiştirebileceği prensibi üzerine çalışır. Eğer bugün bir tren istasyonuna giderseniz, vagon tekerlerine vuran uzun el çekiçli çalışanı hala görebilirsiniz.

Daha küçük fakat kritik olan çatlakları ortaya çıkarmak için ultrasonik dalgalarla kontrol etmek gerekir. Günümüz teknolojisi malzemede daha hassas ve daha küçük boyutlardaki süreksizliği sağlamıştır. Daha yüksek frekanslı mekanik titreşim elde etmek ve bu titreşimleri test etmek için, malzemenin istediğimiz bir bölgesinde uygulayabileceğimiz ultrases kalite kontrol yöntemi geliştirilmiştir.

Daha yüksek frekansta titreşimler elde etme konusunda yapılan çalısmalarda yeni yöntemler bulunmuş ve bu yöntemler teknolojide kullanılır hale gelmiştir. 1847

yılında J. P. Joule tarafından mağnetostriktive olayı keşfedilmiş ve yüksek frekanslı titreşim elde etmede kullanılmıştır.

Pierre Curie ve kardeşi Paul Jacques Curie tarafından 1877 yılında piezoelektrik etkinin keşfi ve 1881' de G. Lipmann tarafından teorik olarak ters piezoelektrik olayının ispatlanması ile kuartz ve diğer materyallerde piezoelektrik olay üzerine yoğun çalışmalar başlatılmıştır. Bu çalışmalar ultrases araştırmalarının temelini oluşturmuştur (Güzel, 1996; Shull ve Tittmann, 2002; Abi, 2007; Cansu, 2008).

Mağnetostriktive olay sonucu elde edilen frekans kilohertzler mertebesinde olmasına karşın piezoelektrik olayda meydana gelen titreşimler megahertzler seviyesinde olmaktadır. Piezoelektrik olayın keşfi ile birlikte geliştirilen yeni teknolojik ürünler sanayinin çeşitli alanlarında uygulanmaya başlanmıştır.

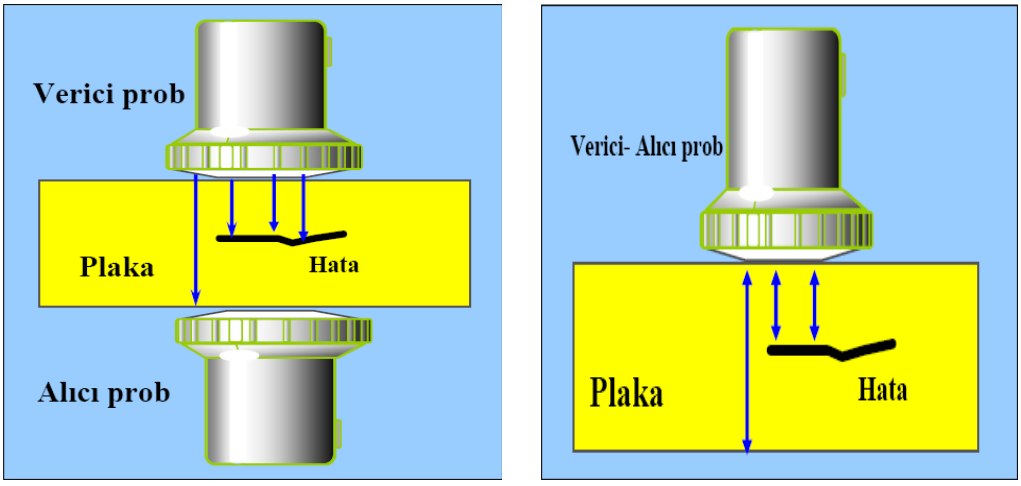
1904 yılında fizik dalında ödül kazanan ve ultrasonik biliminin kurucusu sayılan Lord Rayleigh' in elastik dalga yayılmasının temeli olan akustik ve optik alanında birçok keşfi vardır. Lord Rayleigh' in yazmış olduğu "The Theory of Sound" akustik literatürün en büyük eserlerden biridir (Öktem, 2002).

Modern ultrasonik çağ 1917 yılında Fransız fizikçi Paul Langevin' in denizaltını tespit etmek için quartz resanatör ve yüksek frekanslı akustik dalgaları kullanmasıyla başlar (Anonymous 1, 2010). Langevin, ultrases dalgalarının sapmadan doğrusal olarak ilerlediğini ve bir cisme çarptığında yankının geri döndüğünü görmüştür. Başlangıçta akustik alanın yoğunluğu çok zayıftı. Langevin, üç yıl sonra ultrasonik alanı arttırmak için piezoelektrik probların rezonans frekansında çalıştırılması gerektiğini gördü. 1918 yılında "Sonar" olarak bilinen bu aygıt denizaltındaki incelemeler için yeni bir buluş olmuştur. Daha sonra bu buluş geliştirilerek, savunma sanayinde ve balıkçılıkta kullanılmıştır (Deniz, 2005).

Langevin' in düşman denizaltıları kontrol amacıyla, kendi adını taşıyan ultrases verici alıcı sistemini gerçekleştirmesiyle ultrasesin mühendislik alanında ilk kullanımı başlamıştır (Savaroğlu, 1996). Bu uygulamanın başarısı, I. Dünya Savaşı boyunca yapılan denizaltı keşfini de içeren diğer sualtı uygulamalarına yol açtı. Savaştan sonra, ultrasonik uygulamalar hızla gelişti. 1929 ve 1935' de Rus bilim adamı S.J. Sokolov, imalatı yapılan parçalar içinde bulunabilen malzeme hataları ve çatlak gibi kusurlarin tesbit edilmesinde ultrasoniğin kullanilabilecegini gösterdi (Anonymous 2, 2010). Ultrasonik teknikle malzeme muayenesinin temeli olan bu sistemde ultrasonik dalgalar problar yardımı ile malzeme içinden geçiriliyordu. Teknolojik imkânsızlıklar Sokolov'

un yüksek frekanslarda çalışmasını engelledi, fakat onun koyduğu ilkelere göre geliştirilen cihaza "Sokolov tüpü" adı verilmiştir.

Mulhauser, 1931' de katı madde içindeki hatanın tesbiti için iki problu sistemin patentini aldı. 1940' da Iron ve Stell Enstitüsü, ürünlerinin hem performansını hem tutarlılığını geliştirme isteği ile demir ve çelik için ultrasonik test metodları geliştirdi. Bu metotta da iki transduser kullanıldı (Şekil 1.12a).



(a) (b)

Şekil 1. 12. Ultrasesin iki temel yöntemi: (a) Transmisyon yöntemi (ayrılmış problar) ve (b) Darbe -yankı yöntemi (tek prob)

Bu sistem sadece büyük yapı hatalarını tespit etmekte kullanılmış ve daha sonra Firestone (1940) ve Simons (1945) darbe-yankı tekniğini geliştirmişlerdir (Shull ve Tittmann, 2002; Anonymous 2, 2010; Deniz, 2005). Diğer yeniliklerin arasında, ultrason "puls (pulse)" kavramını tanıttılar. Daha önce kullanılan sürekli dalga metodları ses oranlarına karşı son derece düşük sinyallere sahipti ve yorumlanması çok güçtü. Firestone ayrıca alıcı ve vericinin (darbe-yankı) birleştiği tek transduser yaklaşımını tanıttı (Şekil 1.12b). 1941 yılında II. Dünya Savaşı başladığında Japonyada metal kusur tespiti ve ultrasonikteki araştırmalar azaldığında Amerika ve Almanya radarın geliştirilmesine ve ultrasonik üzerine olan araştırmalarına devam etti. 1945 yılında II. Dünya Savaşı bittiğinde kısa bir süre yüksek güçlü elektronik çalışmalar yasaklandı. 1948 yılında tekrar çalışmalara başlayan Japonya, Amerika ve İngiltere' den çalışmaları ele alan Japon şirketleri vasıtasıyla tahribatsız incelemelerde kendi kusur

tespit edicilerini geliştirdi. 1949 yılında Japon şirketleri kendi hata dedektörlerini üretmeye başladı.

Ultrasonik tahribatsiz muayene tekniğinin tıp alanında kullanımını ilk olarak Japon araştırıcılar önce A-tarayıcı (A-scan) osiloskop ekranı daha sonra B-tarayıcı (B-scan) iki boyutlu gri-skala cihazlar yaparak sağladılar (Anonymous 2, 2010; Deniz, 2005). Japon araştırıcıların bu çalışmaları 1950' ye kadar batılı araştırmacılar tarafından bilinmiyordu. Ultrases test edilen numuneye veya dokuya zarar vermemektedir. Bundan dolayı tıp ve malzeme analizi alanında 1945 yılından beri uygulamalar devam etmektedir.

İlk zamanlarda malzeme içindeki hataların bulunması malzemelerin imalatı sırasında yapılıyordu. O zamanlar malzemelerde çalışma sırasında makroskopik çatlak oluşabileceği düşünülmüyordu. Bu tip çatlakların oluştuğu anlaşılınca ultrasonik, girdap akımları, radyografi, sıvı penetrant, manyetik parçacık gibi teknikler geliştirilmeye başlandı.

1952 yılında tahribatsız test metodlarında Japonya şirketleri resmen kabul gördü, ilk yıllarda tahribatsız test yöntemlerinde ultrasonik Japonya' da uygulandı (Anonymous 1, 2010).

Ultrases ile malzeme karakterizasyonunda dalga hızı ve zayıflama ölçümleri ile yapılan çalışma Mason ve McSkimmin tarafından 1947' de başlamıştır. Roderick ve Truell ise zayıflama metoduyla 1952 yılında ultrases ile tanecik boyutu belirlemişlerdir. Bu çalışmayı kullanarak, alıcı transduserden gelen bilgileri değerlendirerek tanecik boyutunu belirlemeyi Hilliard (1963) ve Aldrige (1969) geliştirmiş ve daha sonra teorik açıklamasını Papadakis (1965) yapmıştır. Geri yansıma 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 (Sarpün, 2004).

1970' lerde iki olay büyük gelişmelere sebep oldu. Teknolojideki büyük ilerlemeler çok küçük hataların bile tesbit edilmesini mümkün kıldı. Kırılma mekaniği disiplini meydana çıkarak yük altında çatlağın davranışının tahmini mümkün oldu. Hata toleranslı imalat fikri geliştirilerek malzemenin çalışması sırasında mevcut çatlakların ne büyüklüğe ulaşabileceği bilinebildi. Fakat bu yeterli değildi. Çatlak büyüklüğünün çalışan malzeme ömrüne etkisinin de bilinmesi gerekiyordu. Bu durum özellikle nükleer teknolojide çok önemlidir. Bu konuda Iowa state üniversitesi tahribatsız değerlendirme

merkezi ve Kuzey Karolina Şarlot Elektrik Gücü Araştırma Enstitüsü (Amerika), Saarbruckende Fraunhofer Tahribatsız Test Enstitüsü (Almanya) ve Harwell Tahribatsız Test Merkezi (İngiltere) gibi bütün dünyada birçok araştırma programları başlatılmıştır. Bu arada birçok önemli gelişmeler sağlandı. Çatlağın büyümesi ile ilişkili niceliksel teoriler geliştirildi (Anonymous 2, 2010; Kundu, 2004). Pratik çalışmaları simüle eden gerçek geometriye sahip katı modeller bu teorilerle birleştirilmeye çalışılmaktadır (Anonymous 3, 2010).

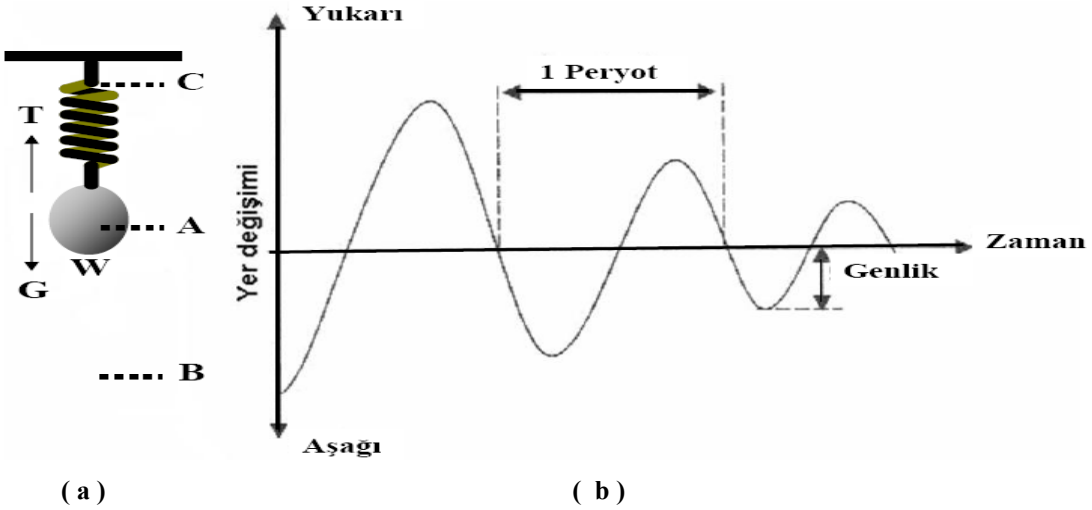
Türkiye de ise tahribatsız testler 1960' lı yılların başlarında ve özellikle Türkiye de iş yapan yabancı kuruluşların öncülüğünde uygulanmaya başlamıştır. Bu yıllarda özellikle büyük ve yabancı ülkelerle bağlantılı endüstri kuruluşları başta radyografi ve ultrasonik testleri kullanarak tahribatsız muayene uygulamalarını gerçekleştirmişlerdir. 1970' li yıllarda çok hızlı ve etkin bir şekilde gelişmeye başlamış ancak endüstri kuruluşlarının bu hıza ayak uydurmaları zor olmuştur. Zira daha çok içe dönük bir üretim sisteminin var olduğu ve yabancı kuruluşların kontrolünde endüstri ürünlerinin üretildiği yıllarda kontrol kavramının bile anlaşılması zor bir olaydı. Ürünlerin işveren tarafından kontrolü talep edildiği zaman herhangi bir standart belirtilmeden sadece sağlam olup olmadığına göre kontrol yapılıyordu.

Türkiye de dışa açılarak modern teknoloji kullanmaya başlamasından sonra konunun önemi anlaşılmış ve üretimler standartlara göre gerçekleştirilmeye başlanmıştır. Özellikle 1980' lerin sonlarından itibaren tahribatsız testlerin bütün metotları ayrıntılı bir şekilde ve standartlara göre gerçekleştirilmeye başlanmıştır. Fakat ilk başlarda kurulan hizmet şirketleri ve bazı kuruluşlar tahribatsız test uygulamalarını konunun eğitimi olmayan kişiler ile yürütmeye çalışmışlar ve bu durum bazı sorunları da beraberinde getirmiştir. 1980' li yılların sonlarına doğru Birleşmiş Milletlerden alınan proje desteği ile Türkiye Atom Enerjisi Kurumu (TAEK) ve Türk Standartlar Enstitüsü' nün (TSE) öncülüğünde standartlara uygun bir sertifikasyon sisteminin kurulması üzerinde çalışmalar başlamıştır. Ayrıca yine aynı yıllarda Metalurji Mühendisleri Odası, Orta Doğu Teknik Üniversitesi ve Alman tahribatsız testler cemiyeti ortak bir eğitim sertifikasyon programı başlatmışlardır (Bilge, 2003). Gerek milli eğitim ve sertifikasyon sisteminin oluşması ve gerekse uygulamaların standartlara göre yapılması gittikçe artan bir hızda gelişmekte olup farklı kuruluşların merkezi bir organizasyon aracılığı ile tüm uygulama ve eğitimi koordine etme çalışmaları devam etmektedir.

1.1.4.3. Ultrases dalgalarının temel özellikleri

Akustik, mekanik titreşimlerin katı, sıvı ve gaz ortamlardaki yayılmalarını inceleyen bir bilim dalıdır. Işığın ve elektromanyetik dalgaların tersine, mekanik dalgaların yayılabilmesi için mutlaka bir madde ortamının olması gerekmektedir.

Fiziksel olarak ses, esnek ortamların mekanik titreşimlerinden meydana gelmektedir. Bu titreşimler, esnek bir maddenin parçacıklarının moleküllerinin veya atomlarının durgun halinden dışarıdan bir kuvvetin etkisiyle hareket haline geçirilmesi sonucu oluşmaktadır. Bir ortamda ses dalgalarının hareket mekanizmasını anlayabilmek için, o ortamda iki nokta arasındaki enerji transferini incelemek gerekmektedir. Olay, Şekil 1.13a' da gösterildiği gibi, bir yay ucuna asılmış bir yükün oluşturduğu hareketlerle açıklanabilir (Berke ve Hoppenkamps, 1992).



Şekil 1.13. Bir yayda mekanik dalga yayılımı (a) Yaya asılmış yük, (b) W yükünün A konumuna göre zaman ile yer değişimi

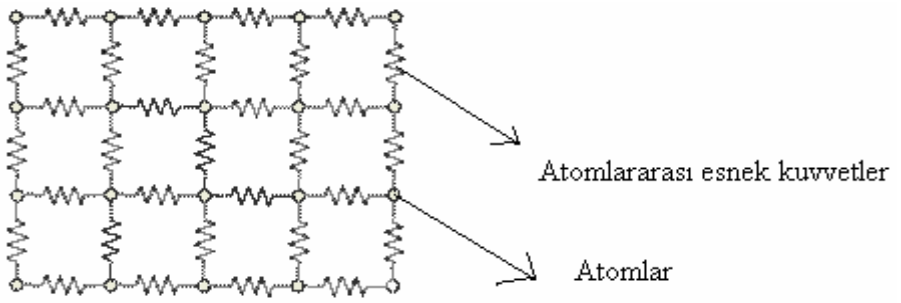
Durgun halindeki W yükü üzerine etki eden kuvvetler, yerçekimi G ve yayın çekme kuvveti T' dir. W yükü, denge konumu A' dan B konumuna hareket ettiğinde, T çekme kuvveti artar. Yük, B konumundan serbest bırakıldığında çekme kuvvetinin etkisiyle A konumuna doğru hareket eder. A' da G ve T yine eşittir, ancak W belli bir hızla hareket ettiğinden, A' dan geçip C konumuna doğru gidecektir. Bu sırada, T çekmesi azalır ve G' deki nispi artış W' yi kinetik enerjisi bitinceye kadar yavaşlatır ve C' de durdurur. C konumunda G, T' den daha büyüktür ve W tekrar A' ya doğru düşer. Yük, A' da kinetik enerjiye sahiptir ve bir daha A' dan aşağı doğru hareket eder. W, A

ve B arasında hareket ederken T kademeli olarak artar ve W, B' de duruncaya değin onu yavaşlatır. B' de T, G' den daha büyüktür ve tüm hareket yeniden başlar. W yükünün, A' dan B' ye, B' den A' ya, A' dan C' ye ve C' den A' ya doğru olan bu yer değişim hareketine bir çevrim denir. Bir saniyedeki çevrim sayısına titreşimin frekansı (f) denir. Bir çevrimi tamamlamak için geçen zamana titreşimin zaman periyodu (T) denir ve

$$T = 1 / f \qquad (1.1)$$

olarak ifade edilir. W yükünün A' dan B' ye veya A' dan C' ye olan maksimum yer değişimi a' ya titreşimin genliği denir (Berke ve Hoppenkamps, 1990).

Bütün maddeler, birbirine atomlar arası kuvvetlerle bağlanmış atomlardan (veya moleküllerden) oluşmaktadır. Bu atomik kuvvetler esnektir; yani atomlar birbirine yaylarla bağlanmış gibi düşünülebilir. Böyle basitleştirilmiş bir malzeme modeli Şekil 1.14' de gösterilmiştir.



Şekil 1.14. Esnek cisim modeli

Eğer malzemenin atomlarından biri, dışarıdan uygulanan bir kuvvetin etkisiyle orijinal konumunu değiştirirse, Şekil 1.13a' da gösterilen W yükü gibi titreşmeye başlar (Berke ve Hoppenkamps, 1992).

Atomlar arası bağlantıdan dolayı, bir atomun titreşimi yanındaki atomun da titreşmesine neden olacaktır. Titreşim hareketi atomdan atoma geçerek tüm malzeme içine yayılacaktır. Eğer tüm atomlar birbirine esnek olmayacak şekilde bağlı olsaydı, hepsi de aynı anda hareket ederler ve aynı hareket konumunda sabit kalırlardı; yani, hepsi de aynı fazda olurlardı. Halbuki, atomlar birbirine esnek kuvvetlerle bağlı olduğundan, titreşimin iletilmesi belli bir zaman almakta ve sonraki atomlar ilk titreşenlere göre daha sonra aynı faz konumuna gelmektedir. Ortamda dalga olarak

yayılan titreşimlerin hareketi zaman ve hacim olarak periyodiktir (Berke ve Hoppenkamps, 1990).

1.1.4.4. Peryot, frekans, dalga boyu ve hız arasındaki ilişkiler

Periyot, bir tam titreşim hareketinin tamamlanması için geçen zamandır. Peryot T harfi ile gösterilir ve birimi saniyedir.

Birim zamandaki periyot sayısına da frekans denir. Bir dalganın frekansı, dalganın yayıldığı ortamın atomlarının titreşim frekansı ile aynıdır. Frekans f harfi ile gösterilir ve birimi hertz (Hz) dir. 1 Hz = Saniyede 1 titreşim (s^{-1}) dir. Periyot ile frekans arasındaki bagıntı Denklem 1.1' den görüldüğü gibi; T.f = 1' dir.

Titreşim periyodu (T) süresince, ortamda yayılan dalga belli bir yol kat eder. Bu mesafe, dalganın dalga boyu olarak adlandırılır ve λ harfi ile gösterilir. Dalganın yayıldığı ortamda belli bir mesafedeki atomlar aynı fazda titreşirler (Berke ve Hoppenkamps, 1992).

Ortamda yayılan dalgaların belli bir zaman içinde aldıkları yola hız denir ve V harfi ile gösterilir. Hız, dalga boyu, periyod ve frekans arasındaki ilişki;

$$V = \lambda / T \ (m/s) \qquad (1.2)$$

Denklem 1.1' deki T = 1 / f ifadesi Denklem 1.2' de yerine konulursa hız;

$$V = \lambda . f \ (m/s) \qquad (1.3)$$

şeklinde ifade edilebilir.

Ultrasonik enerjinin bir ortamdaki yayılma hızı, dalga şekline göre değişir. Ayrıca yayılma hızı, ortamın elastik özelliklerine ve yoğunluğuna bağlıdır. Ses dalgaları her ortamda değişik hızlarda yayılım gösterir.

1.1.5. Mekanik salınımlar ve dalga teorisi

Mekanik dalgaların oluşmasını sağlayacak enerji transferi için bir ortam gereklidir. Bunun gibi zamanla sinusoidal olarak değişen kuvvetin uygulanmasına dayalı bu durumda ultrases dalga hareketi ve dinamik mekanik analizin her ikisi

harmonik salınım temelli kanunlar ile açıklanmaktadır. Basit harmonik hareket, Hook kanununa uyan doğrusal elastik bir yaya asılmış kütleye kuvvet etki ettiği zaman kütlenin yaptığı hareket ile simgelenmektedir. Hareket denklemleri genellikle tekli frekans veya dalga boylu bir sinüs veya kosinüs dalgası ile tanımlanır. Birçok ders kitabında elastik modelinin kullanıldığı dalga denklemi türetimi bulunabilir.

Özellikle polimer malzemelerde dalga yayılımı ile ilgili (Kolsky, 1969; Hueter ve Bolt, 1955; Pain, 1993) yazılmış bu alanda yararlı kitaplardan söz edilebilir. Hareketin gerçek dalga denklemi, genellikle bir ipteki bir dalganın enine hareketi göz önünde bulundurularak türetilmektedir.

İpin bir bölümü dikey basit harmonik hareketler yapabilir. Örneğin y yer değiştirmesine sahip bir basit osilatör, malzemeden dalga geçerken meydana gelen değişimi göstermek için kullanılmaktadır. Mesela herhangi bir t anında x doğrultusundaki bir elementin yer değiştirmesi gibi. Bu y' nin (*x, t*)' nin bir fonksiyonu olduğu anlamına gelir. Bir ipin dalga denklemi, yer değiştirmesi (y) x ve t' ye bağlı bir basit ossilatörü anlatacaktır. Bu denklem, Denklem 1.4' de türev formunda gösterildiği gibi Newton' un ikinci kanunu F = ma terimleri ile açıklanabilir (F kuvvet, m kütle ve a ivme) (Hueter ve Bolt, 1955; Pain, 1993);

$$T\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \rho\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \tag{1.4}$$

Denklemin sağ tarafı ipin birinci bölümünün çizgisel yoğunluğu (ρ) (uzunluk başına kütle) ile o bölümünün ivmesinin çarpımıdır. Gerekli olan geri çağırıcı kuvvet veya T gerilimi ipin bükümü ile orantılıdır. Bazen yukarıdaki dalga denklemini ses hızı cinsinden açıklamakta fayda vardır. T/ρ terimi hızın karesi V^2 ile aynı birimdedir;

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{\rho}{T}\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \quad \text{burada } V^2 = \frac{T}{\rho}\left[\frac{\frac{mkg}{s^2}}{\frac{kg}{m}} = \frac{m^2}{s^2}\right] \tag{1.5}$$

Harmonik osilatör için tipik formülasyon kullanılarak a genlik, x konum ve t zaman olmak üzere bir y ossilatörünün basit harmonik hareketi açıklanabilir. Bir

mekanik dalga bir ortamdan geçerken, belli bir t zamanında denge halinde olan ortam parçacıklarının yer değişimi aşağıdaki bağıntı ile verilir:

$$y = a\sin(\omega t - \theta) \tag{1.6}$$

θ, burada X_0 konumundaki osilatörün faz gecikmesini göstermektedir. θ faz açısı 0 ile 2π (osilatörün tam titreşimi) arasında değerler alabilir. Akustik ölçüm parametreleri ses hızı ve attenuasyondur. Bu yüzden bir harmonik salınım için yukarıdaki çözümün bu değişkenleri içermesi için yeniden yazılması gereklidir.

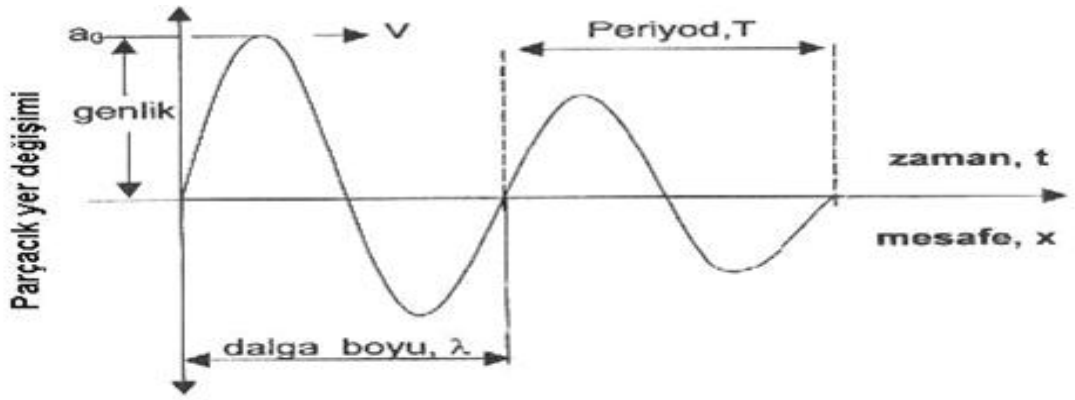
Faz açısı $\theta = \frac{2\pi x}{\lambda}$ ve $\omega = \frac{2\pi V}{\lambda} = 2\pi f$; böylece $k = \frac{2\pi}{\lambda}$;

$$y(x,t) = a\sin(\omega t - \theta) = a\sin k(Vt - x) = a\sin\frac{2\pi}{\lambda}(Vt - x) \tag{1.7}$$

Dalga denklemini çözmek için V dalga hızı olmak üzere x ve t' nin içinde olduğu (Vt+x) veya (Vt-x) şeklinde birleştirilmiş herhangi bir ilişki kullanılabilir (Pain, 1993). Parantez içindeki terim (Vt-x) uzunluk boyutlarına sahiptir ve bir cosinüs veya sinüs fonksiyonu olabilmesi için bağımsız değişkeninin boyutlarının radyan boyutunda olması gerekir. Bu sebepten dolayı (Vt-x)' in, eksi işareti sağa doğru bir dalga hareketini belirtmek üzere, dalga sayısı olarak adlandırılan bir k faktörü ile çarpılması gerekir. Mekanik dalgaların ortamda yayılırken, zamana ve mesafeye bağlı hareket denklemi aşağıda verilmiştir. Bu bağıntı titreşen parçacıkların fazlarını mesafeye bağlı olarak vermektedir.

$$y(x,t) = a\sin\frac{2\pi}{\lambda}(Vt - x) = a\sin(\omega t - kx) \tag{1.8}$$

Bir mekanik dalganın fiziksel bileşenleri Şekil 1.15' de gösterilmiştir (Berke ve Hoppenkamps, 1990).



Şekil 1.15. Mekanik dalga

Bir elastik modülü cinsinden dalga parametrelerinin ifade edilebilmesinde bir ilişkinin kurulmasında, Denklem 1.4' de ki dalga denkleminin çözümü için radyan formundaki bu denklem belki kullanılabilir. Aşağıda Denklem 1.9' da üstel biçimde sinüs ve kosinüs fonksiyonlarının her ikisini de kullanan diğer bir çözüm gösterilmiştir.

$$y(x,t) = a\left[\sin(\omega t - kx) + i\cos(\omega t - kx)\right] = ae^{j(\omega t - kx)} \tag{1.9}$$

Bu bir elastik malzeme için yeterli basit bir çözüm sağlamaktadır. Örneğin Hook kanununa uyan bir çözüm. Örneğin $-ky = ma$ burada k yay sabiti ve y bir yaya asılmış bir kütlenin maksimum uzanım miktarıdır. Genellikle plastik malzemeler gibi amortisör ve yay birleşimi modellerle temsil edilen elastik malzemeler için modül kompleks (M*) olup gerçek ve imajiner kısımlarla (eşfazlı ve eşfazsız kısımlar) temsil edilmiştir (M*=M′+ iM′′). M′ ve iM′′ terimleri kompleks modülün gerçek (elastik) ve imajiner (vizkoz) kısımlarıdır. Bu terimlerin dalga denklemine (Denklem 1.4) aktarılması gerekmektedir:

$$\rho\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = M * \frac{\partial^2 y}{\partial x^2}$$

$$\rho\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = M'\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + iM''\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \tag{1.10}$$

Salınım genliğindeki bu azalma, malzemede genlikteki azalma değerlerini açıklamak için eksponansiyel bir faktörle ($e^{-\alpha x}$) tipik olarak tanımlanmıştır. Malzemede sönümleme katsayısı veya attenuasyon ne kadar fazla olursa genlik oranı o kadar hızlı düşer. α terimi (absorbsiyon katsayısı), ultrasonik dalganın malzemeye giriş ve ayrılış genliğinin oranından doğrudan ölçülebilir ve Neper/mm (Np/mm) birimindedir. Bu terimi Denklem 1.9. içine dâhil etmekle elastik malzemeler için dalga denkleminin çözümü şu hale gelir:

$$y(x,t) = a\left[\sin(\omega t - kx) + i\cos(\omega t - kx)\right]e^{-\alpha x} \tag{1.11}$$

Bu çözüm aynı zamanda McSkimin (McSkimin, 1964) tarafından da belirtilmiştir. Bununla birlikte değişik semboller, terimler ve açıklamalar sağlanmıştır. Denklem 1.10' da yerine koyarak ve aşağıdaki matematiksel işlemleri izleyerek, ölçülen ultrases parametrelerinin terimleri cinsinden kompleks modülünü tanımlayan denklemler oluşturulabilir.

Denklem 1.10' da ki diferansiyel bileşenler değerlendirilmiştir. Gerçek M′ ve imajiner iM′′ terimleri tam denklem için değerlendirilmiştir. İki eşzamanlı denklem oluşturulabilir ve daha sonra ρ, V, α, ω cinsinden gerçek ve imajiner kısımların her biri için çözülebilir. Sonuçta aşağıdaki denklemler elde edilir (Mikhailov ve ark., 1964; Nolle ve Sieck, 1952).

$$M' = \rho V^2 \frac{1 - \left(\alpha\lambda / 2\pi\right)^2}{\left[1 + \left(\alpha\lambda / 2\pi\right)^2\right]^2} \tag{1.12}$$

$$\frac{\alpha\lambda}{2\pi} << 1 \quad \text{olursa} \quad M' = \rho V^2 \tag{1.13}$$

$$M'' = \rho V^2 \frac{\left(\alpha\lambda / 2\pi\right)}{\left[1 + \left(\alpha\lambda / 2\pi\right)^2\right]^2} \tag{1.14}$$

$$\frac{\alpha\lambda}{2\pi} << 1 \quad \text{olursa} \quad M'' = \rho V^2 \frac{\alpha\lambda}{2\pi} \tag{1.15}$$

αλ/2π' nin gerçek değerleri literatürde nadiren görülebilir. Nolle (1948) ve Ivey (1949) gibi bazı araştırmacılar αλ/2π' nin maksimum değeri olarak 0,1 veya biraz üzerini tahmin etmektedirler. αλ/2π' nin tam ölçümü karmaşık değerlendirme işlemleri gibi önemli deneysel hazırlıkları gerektirmekedir. Bundan dolayı Parthun (1994), Sahoune (1996) ve Alig ve ark. (1994) gibi çoğu yeni araştırmacıların αλ/2π << 1 olmasının bütün polimerler için geçerli olduğu varsayımları çok önemli zaman ve emek kazanımı sağlayabilir. Bu çoğu uygulamalar için kabul edilebilir makul bir varsayımdır.

Kompleks modülün imajiner kısmı olan M´´, malzeme deforme edildiği zaman ısı olarak dağılmış enerji miktarını veren bir niceliktir. Malzeme sönümleme özelliklerini tanımlamakta genellikle kullanılan diğer bir parametre, sistemin iç sürtünmelerinin ölçüsü olan tan (δ)' dır. Tan (δ), bir çevrim boyunca depolanan maksimum potansiyel enerji çevrimi başına sönümlenen enerji oranı olarak tanımlanmaktadır. Örneğin tan (δ) = M´´/M´. Akustik alanında sönümleme kayıpları aynı zamanda enerji kayıplarının bir ölçüsü olarak kullanılan kalite faktörü kısaca "Q" değeri ile de tanımlanmaktadır (Pain, 1993). Q, kısaca tan (δ)' ın tersine eşittir [Q = 1/tan (δ)]. Akustik ölçümler için tan (δ), akustik parametrelerden aşağıda gösterildiği gibi direk olarak belirlenebilir:

$$\tan(\delta) = \frac{M''}{M'} = 2V\alpha \frac{\omega}{\omega^2 - V^2\alpha} \tag{1.16}$$

$$\frac{\alpha\lambda}{2\pi} << 1 \text{ olduğu zaman } \tan(\delta) = \frac{2\alpha V}{\omega} = \frac{\alpha\lambda}{\pi} \tag{1.17}$$

İlginç şekilde Denklem 1.17' den tan (δ) ≈ αλ/π olduğu gözlenmektedir. Pratikte αλ/2π genellikle yukarıda belirtilen birkaç istisna dışında 0,1' den küçüktür. Malzemelerin sönümleme özelliklerini tanımlamak için bir ölçüm parametresi olarak tan (δ) kullanımı aşağıdaki avantajlara sahiptir:

1- Ayrı bir deneyle tek başına yoğunluk değerlerini gerektirmeden (M´´ ile karşılaştırılırsa) belirlenebilir.
2- Dalgaboyu ve attenuasyon gibi akustik parametreleri ile doğrudan değerlendirilebilir.
3- Diğer ölçüm teknikleri ile doğrulanmış tan (δ) ile kolaylıkla karşılaştırılabilir.

1.1.6. Ses dalgalarının yayılma biçimleri

Ultrasonik dalgalar, malzemelerin atomik ya da moleküler titreşimlerini içeren mekanik dalgalardır. Bu dalgalar katı, sıvı veya gaz içerisinde, vakumlu ortamlar hariç hareket edebilirler. Ultrases dalgalarının yayılabilmeleri için bir ortam gerektiğinden, ultrases dalgalarının ilerleme yönü ile parçacıkların hareketinin yönü ultrases dalgasının çeşidini belirlemektedir. Ses, havada, hava moleküllerinin yayılma doğrultusunda sıkışma ve gevşemeler yani boyuna dalgalar şeklinde yayılır. Ancak katılarda, moleküller diğer doğrultulardaki titreşimleri de desteklemektedir. Bu nedenle katılarda birçok değişik ses dalgası tipinin yayılması mümkündür. Ultrasonik muayenelerde en çok boyuna ve enine dalgalar kullanılmaktadır. Bununla birlikte parçacıkların yüzeylerde ve arayüzeylerde değişik tiplerdeki eliptik (oval) veya karmaşık titreşimleri diğer dalga türlerininde kullanılabilmesine imkân vermektedir.

Ultrasonik dalgalar, ortam parçacıklarının titreşim şekline ve yayılma yönüne göre boyuna, enine, yüzey ve plaka dalgaları olmak üzere dört gruba ayrılır (Papadakis, 1976; Corsepius, 1977; Krautkrämer ve Krautkrämer, 1990). Burada ultrasonik muayenelerde en çok kullanılan bu dört çeşit dalga üzerinde durulacaktır. Ancak bunların dışında da dalga çeşitleri mevcuttur. Aşağıda Çizelge 1.2' de katılarda yayılabilen dalga türlerinin bir çoğu özetlenmiştir (Mafellozi ve ark., 1999; McHugh, 2008; Anonymous 2, 2010).

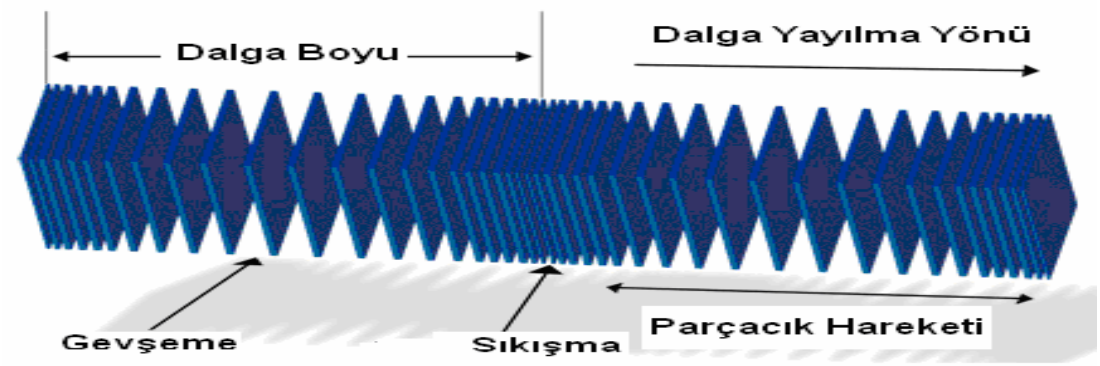
Çizelge 1.2. Katılarda yayılabilen dalga çeşitleri ve parçacıkların yayılma doğrultuları

Katılarda yayılabilen dalga çeşitleri	Parçacıkların titreşim doğrultusu
Boyuna (Basınc)	Dalganın yayılma doğrultusuna paralel
Enine (Kesme)	Dalganın yayılma doğrultusuna dik
Yüzey (Rayleigh)	Dalganın yayılma doğrultusuna dik eliptik
Plaka (Lamb)	Bileşen yüzeye dik
Plaka (Love)	Düzleme paralel, dalga doğrultusuna dik
Stonelev (Sızıntılı Rayleigh Dalgaları)	Arayüz boyunca dalga kılavuzlu
Sezawa	Antisimetrik şekilde

1.1.6.1. Boyuna dalgalar

Madde içerisinde ultrases dalgasının hareket doğrultusu ile titreşim hareketini ileten parçacıkların hareket doğrultusu aynı ise boyuna ultrases dalgası oluşur (Abi, 2007; Anonymous 4, 2010). Boyuna dalgalara basınç dalgaları da denir. Ultrasonik testte çoğu zaman boyuna dalga üretimiyle hareket edilir ve çeşitli uygulamalar için diğer dalga türlerine dönüştürülür. Boyuna dalgalar katı, sıvı ve gaz ortamlarda yayılabilirler (Papadakis, 1976; Krautkrämer ve Krautkrämer, 1990; Berke ve Hoppenkamps, 1992; Abi, 2007; Cansu, 2008; Anonymous 2, 2010) .

Boyuna dalgalar, hem katı, sıvı ve gaz ortamlarda yayılabildiklerinden hem de üretimlerinin ve algılanmalarının kolay olmasından dolayı, ultrasonik testte en çok kullanılan dalga türüdür (Ilıcan, 1995). Dalga ortamda ilerlerken sıkışma ve gevşemeler meydana gelir. Bu sıkışma ve gevşemeler ortamda dalganın yayılma doğrultusunda ilerler. Sıkışma ve gevşemeler arasındaki uzaklık bir dalga boyudur (Aral, 1989; Cansu, 2008). Boyuna dalga geçtikten sonra dalganın yayıldığı ortam eski şeklini alır.



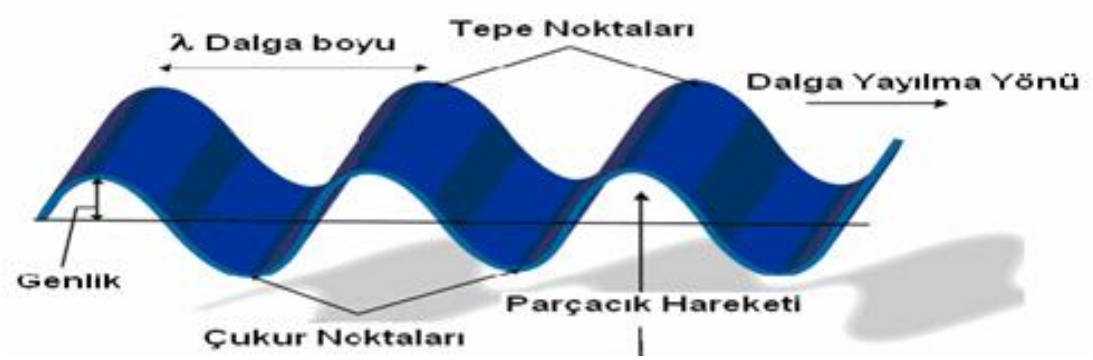
Şekil 1.16. Ortamda boyuna dalganın yayılması

1.1.6.2. Enine dalgalar

Katı bir madde içerisinde ilerleyen ultrases dalgasının yayılma doğrultusu ile titreşim hareketini ileten madde parçacıklarının titreşim doğrultusu birbirine dikse bu tip dalgalara enine ultrases dalgası denir (Papadakis, 1976; Abi, 2007; Gürpınar, 2007; Kökdemir, 2007; Cansu, 2008). Yayılma titreşim yönü yayılma yönüne dik açıda veya çapraz olduğundan dolayı, enine dalgalara kesme dalgaları da denir. Enine dalgalar şematik olarak Şekil 1.17' de gösterilmiştir.

Enine dalgalar, katı ortamların atom ve molekülleri yani ortam parçacıkları arasında kuvvetli bağlar ve çekim kuvvetinden dolayı yayıldıkları ortam parçacıklarını çapraz yönde çekmeye zorlarlar ve bu yüzden de sadece katılarda yayılabilirler. Sıvı ve gazlarda moleküller veya atomlar arası mesafe katılara göre çok büyük olduğundan, bunlar arasındaki çekme kuvveti, birinin diğerini hareket ettirmesi için yeterli gelmemekte ve dalga hızla zayıflamaktadır. Bu nedenle enine ultrases dalgaları sıvı ve gazlarda yayılamazlar.

Enine dalganın yayılma hızı ortamın cinsine göre farklı değerler almaktadır. Homojen izotrop ortamlar için bu hız değeri sabittir ve boyuna dalganın yayılma hızının yaklaşık olarak yarısıdır (Aral, 1989).

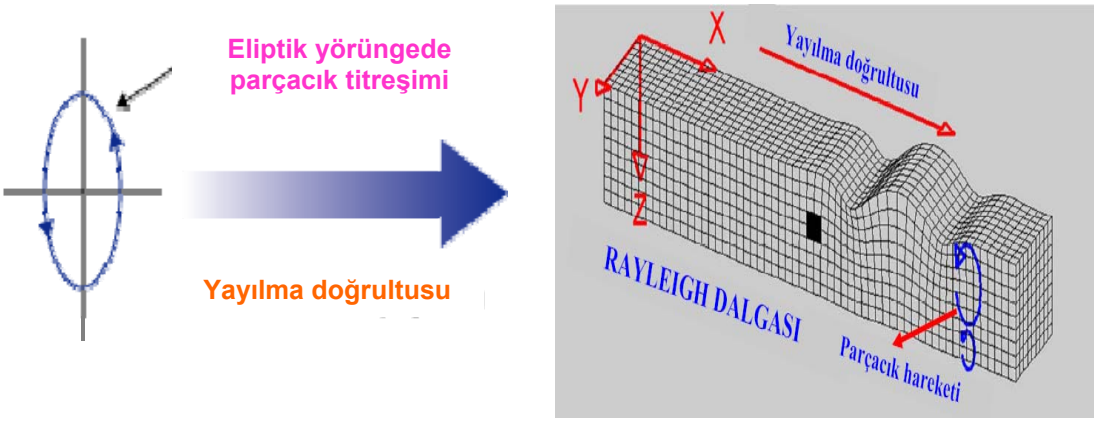


Şekil 1.17. Enine dalga

1.1.6.3. Yüzey (Rayleigh) dalgaları

Yüzey dalgaları ilk defa Lord Rayleigh tarafından açıklanmıştır; bu yüzden bunlara Rayleigh dalgaları da denir. Enine ve boyuna dalgaların bileşimi olan yüzey dalgalarında ortam parçacıklarının hareketi dalganın yayılma doğrultusuna dik elipsler şeklindedir (Aral, 1989; Kökdemir, 2007). Bir sıvı içine daldırılmış olan bir katı malzeme yüzeyinde yüzey dalgaları yayılamaz, ancak malzeme yüzeyi çok ince bir sıvı tabakası ile kaplı ise yayılabilir. Yüzey dalgalarının hızı, aynı malzemede enine dalgaların hızının yaklaşık % 90' ıdır ve malzeme yüzeyinden en fazla bir dalga boyu derinlikte yayılabilirler. Yüzey dalgalarının genliği yüzeyden itibaren ortamın içine doğru üstel olarak azaldıkları ve bir dalga boyu uzaklık da sıfır olduklarından bu dalgalarla yalnız cisimlerin yüzeyi incelenir (Aral, 1989; Abi, 2007; Deniz, 2007; Gürpınar, 2007; Kökdemir, 2007). Boyuna titreşimlerin yüzeyde ve yayılma doğrultusunda olması, enine titreşimlerin yüzeye ve yayılma doğrultusuna dik olması

parçacığın eliptik hareket yapmasını sağlar. Şekil 1.18' den görüleceği gibi, yüzey dalgalarında parçacık titreşimi eliptik bir yörünge takip etmektedir. Şekildeki küçük oklar parçacık yer değişiminin yönlerini göstermektedir. Elipsin büyük ekseni yayılma yönüne dik, küçük ekseni ise paraleldir (Krautkrämer ve Krautkrämer, 1990; Berke ve Hoppenkamps, 1992).



Şekil 1.18. Ortamda yüzey dalgalarının yayılışı (Anonymous 2, 2010; Anonymous 6, 2010)

Rayleigh yüzey dalgaları, su dalgalarından önemli bir şekilde ayrılır. Bir su dalgasındaki bütün parçacıklar saat yönünde hareket eder. Rayleigh yüzey dalgalarında ise yüzeydeki parçacıklar saatin dönme yönünün tersi yönde eliptik hareket ederken, dalga boyunun 1/5' inden fazla derinlikteki parçacıklar saatin dönme yönünde hareket ederek eliptik hareket yapar (Anonymous 5, 2010). Bu dalgaların yayılma hızları elektromanyetik dalgaların yayılma hızlarından yaklaşık 10^5 kez küçüktür. Bundan dolayı birçok elektronik devrelerde değişik amaçlar için kullanılmaktadır.

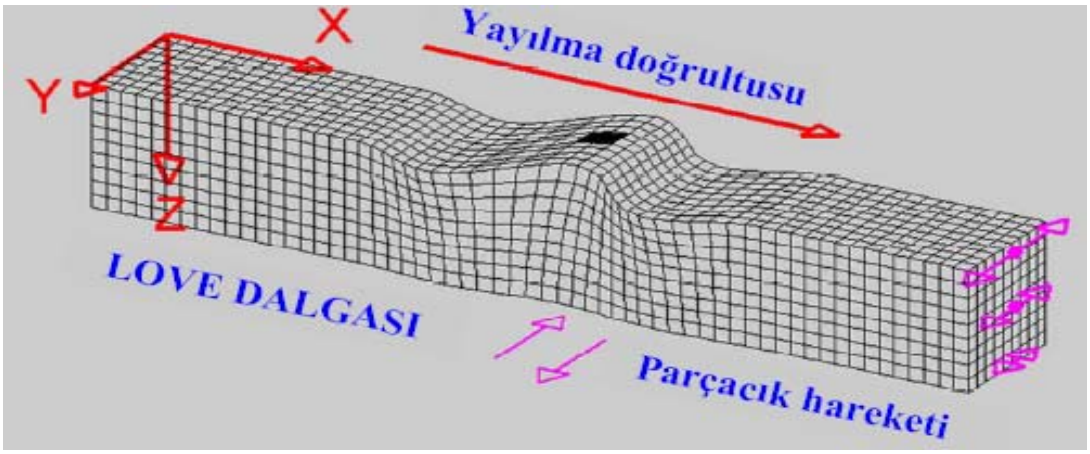
Yüzey veya yüzeye yakın çatlakların veya hataların tespitinde yüzey dalgaları, enine ve boyuna dalgalara göre daha kullanışlıdır; çünkü bu dalgalar diğerlerine göre daha az zayıflarlar ve fazla keskin olmayan köşelerden akabilirler. Dolayısıyla, oldukça karmaşık şekilli malzemelerin yüzey testinde kullanılabilirler. Yüzey dalgalarının dezavantajı, yüzey pürüzlülüğünden veya kirliliğinden çok fazla etkilenmeleridir (Krautkrämer ve Krautkrämer, 1990; Berke ve Hoppenkamps, 1992).

Yüzey dalgalari özellikleri nedeni ile ultrasonik muayene için çok faydalıdır. Bu dalgaların en önemli özelliği diğer dalga şekillerinin ulaşamadığı karmaşık geometrili yüzey üzerinde ilerliyebilmeleridir. Bu özellikleri yüzey hatalarının tespit edilmesini mümkün kılar. Rayleigh dalgalarının malzeme içine nufuziyeti malzeme özelliklerinden

Poisson oranına bağlıdır. Rayleigh dalgaları eğri yüzey ve köşelerden ilerlerken hızında değişme olur.

1.1.6.4. Plaka dalgaları

Plaka dalgaları Lamb ve Love dalgaları olmak üzere iki çeşittir. Love dalgaları bir çeşit yüzey dalgasıdır. Love dalgalarında ortamın enine ve yatay parçacık hareketi yayılma doğrultusuna diktir (Şekil 1.19). Love dalgaları dağıtkan olup dalga hızı frekansa bağlıdır. Düşük frekansla normal olarak yüksek hızda yayılır. Love dalga hareketinin genliği yüzeyden uzaklaştıkça düşmektedir (Anonymus 6, 2010).



Şekil 1.19. Ortamda Love dalgalarının yayılma şekli (Anonymous 6, 2010)

NDT' de çoğunlukla plaka dalgalarından Lamb dalgaları kullanılmaktadır. Yüzey dalgaları bir yüzey üzerinde oluşurken, Lamb dalgaları plaka gibi birbirine paralel iki yüzeyde oluşan dalgalardır. Lamb dalgaları bazı özel tahribatsız muayene teknikleri için çok faydalıdır. Bu dalgalar yassı ve eğri plakalarda yayılırlar, malzeme yüzeyinde ulaşılamayan bölgelerin incelenmesine imkân tanırlar. Lamb dalgalarının yayılımı ortamın esneklik özelliklerine ve yoğunluğuna bağlıdır (Anonymous 6, 2010).

Kalınlığı dalganın üç dalga boyuna eşit veya daha ince bir plakanın içine eğer bir yüzey dalgası gönderilirse cisimde, plaka dalgası denilen farklı bir dalga türü meydana gelir. Boyuna dalgaları yeterince ince bir plaka içine belli bir kritik açı altında göndererek plaka dalgalarını elde etmek mümkündür. Bu kritik açı φ aşağıdaki bağıntı ile hesaplanır.

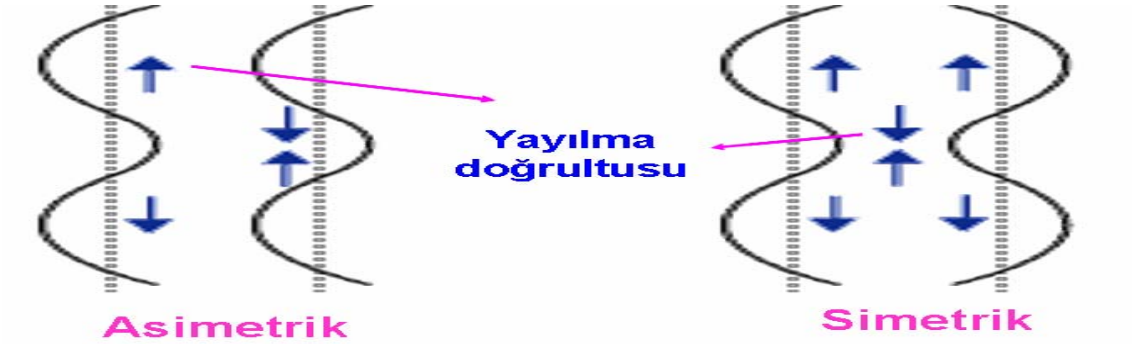
$$\varphi = arcSin \frac{V_b}{V_p} \quad (1.18)$$

Burada,

V_b: Boyuna dalga hızı

V_p: Plaka dalgasının faz hızı' dır.

Plaka dalgalarının birçok çeşit parçacık titreşim şekli vardır. Ancak plaka dalgalarının parçacık titreşimi genellikle simetrik ve asimetrik olmak üzere iki esas şekilde oluşmaktadır. Simetrik plaka dalgalarında parçacık titreşimi plakanın ekseni boyunca boyuna yönde ve yüzeylerde eliptiktir. Bu dalga tipi şişerek ve incelerek yayılır. Asimetrik plaka dalgalarında parçacık titreşimi plakanın ekseni boyunca çapraz yönde ve yüzeylerde eliptiktir. Bu dalga tipi bükülerek yayılır. Plaka dalgalarından bir diğeri olan Lamb dalgaları Şekil 1.20' de gösterilmiştir.



Şekil 1.20. Lamb dalgaları (Anonymous 2, 2010)

1.1.7. Akustik empedans

Bir malzemede ultrasonik dalgaların yayılmasına karşı gösterilen dirence akustik empedans denir. Kısaca ses direnci de diyebiliriz. Ortamın yoğunluğu (ρ) ile sesin o ortamdaki yayılma hızının (V) çarpımı akustik empedansı vermektedir (Özden, 1981; Özer, 1986; Peker, 1989; Berke ve Hoppenkamps, 1992; Güzel ve Merdan, 1999; Kökdemir, 2007). Akustik empedans, Z harfi ile gösterilir.

$$Z = \rho.V \quad (1.19)$$

Her malzeme kendi karakteristiğine uygun olarak ultrasonik enerjinin yayınımına tepki olarak akustik empedans oluşturur. Ultrases dalgası, malzeme içerisinde ses basıncı şeklinde ilerler.

İki ortam arasındaki akustik özdirenç farkı ne kadar fazla ise bu durum ultrason dalgasının o kadar fazla yansımasını sağlar. Akustik empedansı yüksek olan malzemelere "ses karşı sert", akustik empedansı düşük olanlara da "sese karşı yumuşak" malzemeler denir.

Akustik empedans;

- Farklı akustik empedansa sahip iki materyal arasındaki sınırda yansıma (refleksiyon) ve iletim (transmisyon)'in belirlenmesinde,
- Ultrasonik transduserlerin yapımında,
- Bir ortamın ses absorpsiyon değerinin ölçümünde önemlidir (Anonymous 2, 2010).

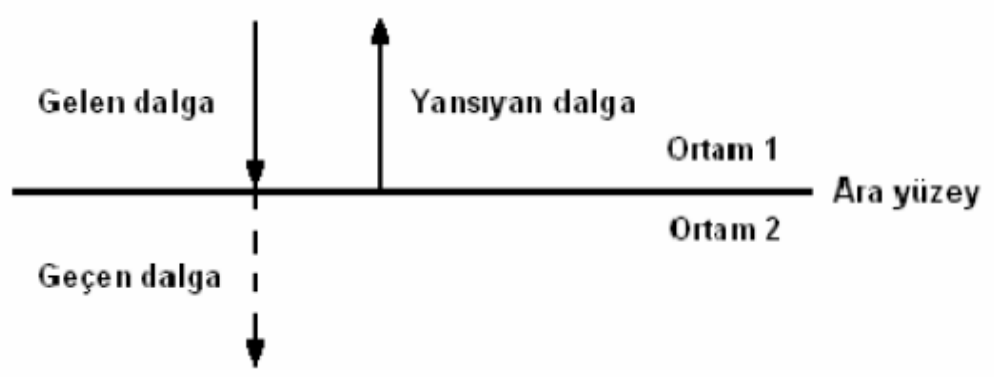
Materyalin akustik empedansı, ses tarafından oluşturulan parçacıkların akışına karşıdır. Farklı akustik empedansa sahip iki materyal arasındaki sınır, akustik arayüz olarak adlandırılır. Akustik arayüze ses çarptığında, ses enerjisinin bir kısmı geri yansır ve geri kalanı sınır yüzeyden diğer ortama geçer (Ekinci, 2002). Yansıtılan veya geçirilen ultrasonik enerji miktarı, iki ortamın akustik empedansları farkına bağlıdır. Bu fark büyükse, enerjinin büyük bir kısmı yansıtılır, sadece küçük bir kısmı ara yüzeyden geçirilir. Buna karşılık, akustik empedans farkı küçükse, ultrasonik enerjinin büyük bir kısmı geçirilir ve küçük bir kısmı geri yansıtılır. Şekil 1.21' de yansıma (refleksiyon) ve geçirim (transmisyon) olayını şematik olarak göstermektedir (Berke ve Hoppenkamps, 1992). Bir ortamdan diğer ortama geçen sesin enerji kaybı dB olarak;

$$\mathrm{dB}_{\mathbf{kayıp}} = 10 \log_{10} \left[\frac{4 Z_1 Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} \right] \tag{1.20}$$

ile elde edilir. Burada Z_1, birinci ortam ya da materyalin akustik empedansı, Z_2 ise ikinci ortam ya da materyalin akustik empedansıdır. Yansıyan sesin kaybı ise,

$$\mathrm{dB}_{\mathbf{kayıp}} = 10 \log_{10} \left[\frac{(Z_1 - Z_2)^2}{(Z_1 + Z_2)^2} \right] \tag{1.21}$$

ile edilir. Sonuç olarak ses, ortam boyunca ve ortam değişikliğinde enerji kaybı sonucu zayıflayarak ilerler. Zayıflamaya, sesin kırılması, saçılması ve yansıması neden olur.



Şekil 1.21. Normal geliş açısında yansıma ve geçirim

1.1.8. Ultrases dalgalarının iki ortam ara yüzeyinde yansıması ve kırılması

Ultrases dalgaları da ışık dalgaları gibi farklı iki ortamın ara yüzeyine geldiklerinde yansır ve kırılır. Esnek bir ortamda ultrases dalgası yayılırken, farklı empedansa sahip bir ortamın arakesitine ulaştığında ultrases dalgasının bir kısmı ikinci ortama girer, bir kısmı ise ara yüzeyden yansıyarak geri döner.

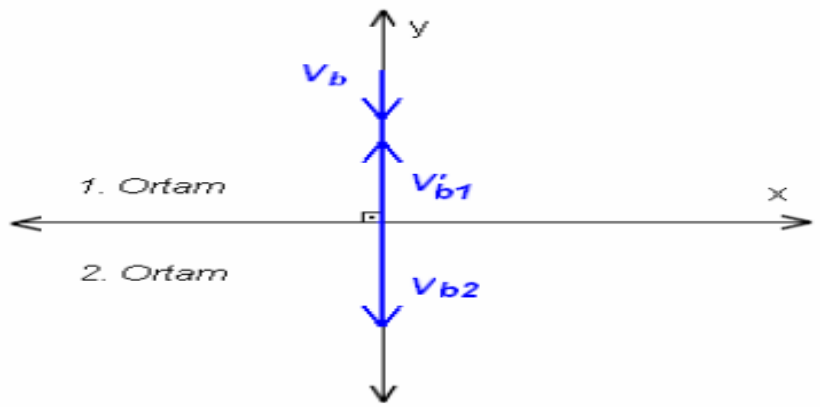
Bu dalgaların yansıma ve kırılma açıları, Snell Kanunu ile hesaplanabilir. Snell kanunu;

$$\frac{Sin\theta_1}{Sin\theta_2} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{n_2}{n_1} \qquad (1.22)$$

formülü ile gösterilmektedir.

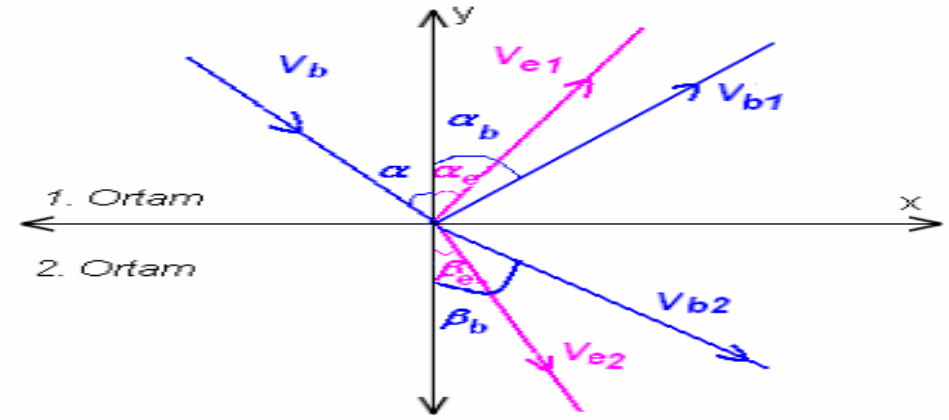
n_1 = Işığın geldiği ortamın kırılma indisi
n_2 = Işığın gittiği ortamın kırılma indisi
θ_1 = Işığın geliş doğrultusunun normalle yaptığı açı
θ_2 = Işığın kırıldıktan sonraki gidiş doğrultusunun normalle yaptığı açı
V_1 = Işığın 1. ortamdaki hızı
V_2 = Işığın 2.ortamdaki hızı

Ara yüzeye dik olarak gelen bir ultrases dalgasının bir kısmı aynı doğrultuda yansıyarak geri dönerken diğer kısmı ise doğrultusunu değiştirmeden diğer ortamda ilerler (Güzel, 1996; Gürpınar, 2007; Cansu, 2008).



Şekil 1.22. Ara yüzeye dik açıyla gelen ultrases dalgasının yansıması (Özden, 1981; Aral, 1989)

Boyuna ultrases dalgası katı bir ortamın ara yüzeyine eğik açı ile gelmişse gelen boyuna dalga, dört dalgaya bölünür. Bu dört dalganın ikisi kırılan, diğer ikisi ise yansıyan dalgalardır. Yansıyan dalgalar 1. ortamda, kırılan dalgalar 2. ortamda yayılırlar. Ara yüzeyden yansıyan ve kırılan dalgalardan biri enine dalga diğeri ise boyuna dalgadır. Yani ara kesite gelen boyuna dalga, yansımış enine ve boyuna dalgalar ve kırılmış enine ve boyuna dalgalar olmak üzere dört dalga oluşturur (Aral, 1989; Gürpınar, 2007; Cansu, 2008). Bu durum iki farklı olayın sonucudur. Birincisi, beklenen yansıma ve kırılma olayıdır. İkincisi ise dalga dönüşümüdür. Dalga dönüşümü, dalganın titreşim karakterini değiştirerek başka bir dalga şeklini almasıdır. Gelen boyuna dalga enerjisi, kısmen enine dalgaya dönüşür. Böylece çıkışta yansımış boyuna ve enine dalgalarla, kırılmış boyuna ve enine dalgaların oluşturduğu 4 farklı ışın oluşur.



Şekil 1. 23. Ara yüzeye eğik açıyla gelen boyuna ultrases dalgasının kırılma ve yansıması (Özden, 1981; Aral, 1989).

Snell kanunu eğik açıyla arakesit yüzeyine gelen boyuna ultrases dalgasına uygulandığında; Yansıyan boyuna dalga için:

Yansıyan boyuna dalga için: $$\frac{Sin\ \alpha}{Sin\ \alpha_b} = \frac{V_b}{V_{b1}} \qquad (1.23a)$$

Yansıyan enine dalga için: $$\frac{Sin\ \alpha}{Sin\ \alpha_e} = \frac{V_b}{V_{e1}} \qquad (1.23b)$$

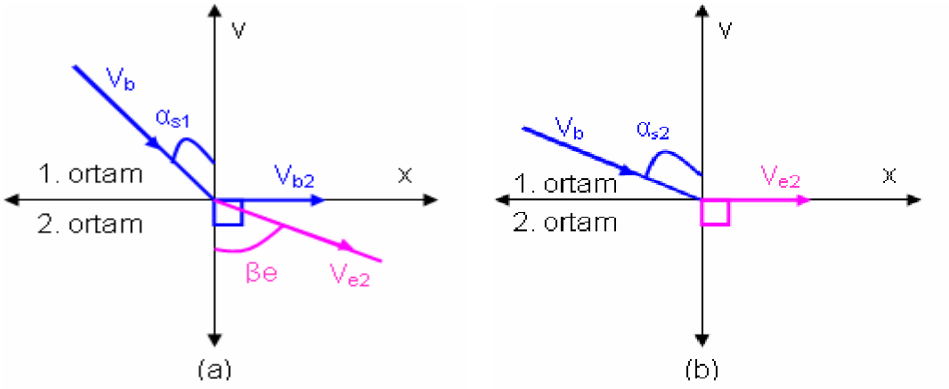
Kırılan boyuna dalga için: $$\frac{Sin\ \alpha}{Sin\ \beta_b} = \frac{V_b}{V_{b2}} \qquad (1.23c)$$

Kırılan enine dalga için: $$\frac{Sin\ \alpha}{Sin\ \beta_e} = \frac{V_b}{V_{e2}} \qquad (1.23d)$$

eşitlikleri ile yansıma ve kırılma açıları hesaplanabilir (Aral, 1989; Gürpınar, 2007; Cansu, 2008). Boyuna ve enine dalgalar için akustik hızlar farklı olduğundan, her iki dalganın yansıma ve kırılma açıları da farklı olacaktır. Gelen tek bir ışının, arayüzeyde dört farklı yöne dallanmasının nedeni budur (Gürpınar, 2007).

Ultrasonik testte, prob-malzeme ara yüzeyinden yansıyan dalgalar kullanılmaz ve bunlar probtaki sönüm bloğu aracılığı ile sönümlenir. Geliş açısı α küçük olduğunda,

ikinci ortamda dalga dönüşümünden dolayı enine ve boyuna dalgalar iki farklı açıda aynı anda yayılmaktadır. İki farklı dalga türü ile aynı anda çalışmak test işleminde karışıklığa neden olacağından, dalga sayısının 1' e indirilmesi gerekmektedir. α açısı arttırıldığında, kırılma açısı da artmaktadır. Boyuna dalgaların 90° kırılmasını ve ara yüzeye paralel gitmesini sağlayan geliş açısına 1. kritik açı (α_{s1}) denir. α daha da artırılırsa, enine dalgaların kırılma açısı 90°' ye ulaşır. Enine dalgaların 90° kırılmasını ve ara yüzeye paralel gitmesini sağlayan geliş açısına 2. kritik açı (α_{s2}) denir. 90° kırılan enine dalgalar yüzey veya Rayleigh dalgalarına dönüşür. 1. ve 2. kritik açılar Şekil 1.24a ve Şekil 1.24b' de gösterilmiştir (Berke ve Hoppenkamps, 1992).



Şekil 1.24. 1. ve 2. Kritik açılar (a) Boyuna ultrases dalgasının sınır açısıyla arakesit yüzeyinden yansıma ve kırılması (b) Enine ultrases dalgasının sınır açısıyla ara kesit yüzeyinden yansıması (Özden, 1981; Aral, 1989).

Arakesit yüzeyine 1. kritik sınır açısıyla gelen boyuna ultrases dalgasının bir kısmı enine dalga olarak diğer ortama geçerken diğer kısmı boyuna dalga olarak arakesit yüzeyi üzerine paralel olarak yansır (Şekil 1.24a). 2. kritik sınır açısıyla gelen boyuna dalga ise ara kesit yüzeyine paralel enine dalga olarak yansır (Şekil 1.24b).

1.1.9. Ultrases' in enerji şiddeti

Ultrasonik dalgalar tarafından yayılma yönüne dik doğrultudaki birim kesitten geçirilen mekanik enerji miktarına ultrasonik dalgaların şiddeti denir. Şiddet, akustik basınç, akustik empedans ve parçacık titreşiminin genliği ile ilişkilidir (Berke ve Hoppenkamps, 1992). Mekanik bir enerji olan ultrases enerji şiddeti ile titreşen atomun veya molekülün genliği arasındaki bağıntı, ortalama dalga şiddeti olan

$I = 2\pi^2 \rho f^2 A^2_m V$ denkleminde, mekanik dalga empedansı $Z = \rho.V$ eşitliğinin koyulmasıyla,

$$I = \frac{1}{2} Z.w^2.A_m{}^2 \tag{1.24}$$

ifadesi olarak bulunabilir (Aral, 1989). Bu ifadedeki Z, ortamın akustik empedansı olup birimi kg / m^2. s' dir. w, açısal frekans olup birimi s^{-1} veya Hertz' dir. A_m ise titreşimin maksimum genliği olup birimi m' dir. Bunlara göre ultrases enerji şiddeti I' nın birimi Watt /m^2 olur.

1.1.10. Ultrases basıncı

Akustik basınç, bir ultrasonik dalga tarafından malzemeye uygulanan değişken gerilmelerin genliğini ifade etmek için kullanılan terimdir. Ultrasesin içinde yayıldığı ortamlarda yarattığı titreşim bir basınç oluşturur. Buna kısaca ultrases basıncı adı verilir. Ultrases basınç ifadesi aşağıdaki bağıntı ile verilir:

$$P_m = Z.w.A_m \tag{1.25}$$

Z, ortamın akustik empedansı olup birimi kg / m^2. s' dir. $w = 2\pi f$ açısal frekans olup birimi 1/s' dir. A_m, titreşimin maksimum genliği olup birimi m'dir (Aral, 1989). Enerji şiddetindeki eşitliğe, basınç için yazılan denklem yerleştirilirse akustik ses şiddeti ile akustik basınç arasında aşağıdaki gibi bir bağıntı olabileceği görülür.

$$I = \frac{p_m{}^2}{2Z} \tag{1.26}$$

Ses basıncını duyularımızla anlayabiliriz. Şiddetli bir gürültünün kulak zarını zorlayarak rahatsız etmesi buna örnek olarak verilebilir (Peker, 1989).

Yansıyan ve geçen dalgaların şiddetleri toplamı daima gelen dalganın şiddetine eşittir. Ancak, sudan çeliğe geçişte olduğu gibi, geçen dalganın basıncı gelen dalganın basıncından daha yüksek olabilir. Bu, enerjinin korunumu prensibine ters gibi

gözükebilir. Halbuki akustik basınç, şiddet ve akustik empedansın çarpımı ile orantılıdır. Çeliğin akustik empedansı yüksek olduğundan, geçen dalganın şiddeti gelen dalganın şiddetinden daha düşük olsa dahi, geçen akustik basınç gelen dalganın akustik basıncından daha yüksek olmaktadır (Berke ve Hoppenkamps, 1992).

1.1.11. Ultrases oluşturulması ve algılanması

Ultrases bir titreşim enerjisi yani mekanik bir enerjidir. Ultrases oluşturmak titreşim enerjisi oluşturmak demektir. Bir müzik aletinin telini, yani hava moleküllerini titreştirmek günlük hayatta bilinen ses üretme yöntemlerinden biridir. Sesin algılanması da benzer prensibe dayanır. Havadan gelen ses dalgaları kulağın veya mikrofonun zarını titreştirir. Kulak zarına gelen bu titreşimler beyne iletilerek ses olarak algılanırken, mikrofona gelen titreşimler elektrik enerjisine dönüştürülerek algılanır.

Ultrases frekansları üretmek yine bir titreşim hareketi üretmek ve algılamak da titreşim enerjisini elektrik enerjişine dönüştürmek demektir. Yüksek frekanslı bu titreşimleri meydana getiren ve algılayan aletlere transduser (dönüştürücü) adı verilir. Transduser, sönümleyici blok, soket ve bağlantı kablolarından oluşan düzeneklere ise prob denir. Problar elektrik enerjisini, bünyesinde mevcut olan transduser (genellikle piezoelektrik bir kristal) aracılığıyla yüksek frekenslı titreşim enerjisine ve aynı zamanda da gelen yüksek frekenslı titreşim enerjilerini elektrik enerjisine çevirebilmektedirler. Yani; aynı prob, hem verici hemde alıcı olarak kullanılabilmektedir. Ultrasonik problar; gaz sürücülü, sıvı sürücülü ve elektromekanik olmak üzere üçe ayrılır.

Ultrasonik dalga üretmek için çeşitli yollar vardır. Örneğin, piezoelektrik, elektrostriksiyon, manyetostriksiyon ve elektromanyetik lazer ile ultrasonik dalgalar üretilebilmektedir. Bunlardan en çok piezoelektrik etki yöntemi kullanılmaktadır (Berke ve Hoppenkamps, 1990).

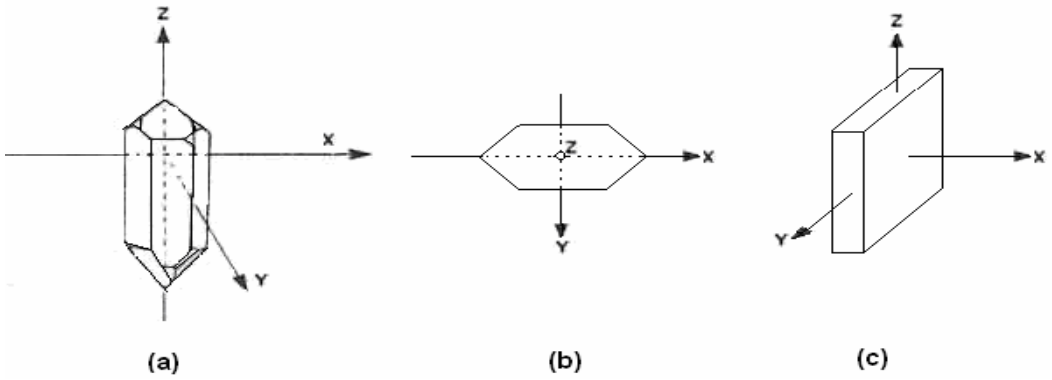
1.1.11.1. Piezoelektrik titreştiriciler

1880’ de Jacques ve Pierre Curie tarafından, mekanik bir kuvvet etkisi altında kalan kuvars, turmalin ve Rochelle tuzu gibi malzemelerin yüzeylerinde elektrik yükleri oluştuğu keşfedilmiştir. Latince “bastırmak-press” anlamına gelen “piezo” ön ekinden türetilen “piezoelektrik” kavramı basitçe, üzerine mekanik bir basınç uygulanan bazı

kristal ve seramik malzemelerde bir elektriksel gerilimin oluşması olarak tanımlanır. Yani piezoelektrik, basınçla elektrik oluşturma anlamına gelmektedir. Bu isim, Piere ve Jacques Curie kardeşlerin olayı keşiflerinden bir yıl sonra 1881' de Hankel tarafından verilmiştir (Güzel, 1996; Yükler ve Çatalgöl, 1996). 1881 yılında Lippman' ın zıt piezoelektrik olay ile ilgili teorisini ortaya atması ile çok sayıda fizikçi çalışmalarını bu konu üzerinde yoğunlaştırmıştır. Piezoelektriğin matematiksel ve kristalografik teorisi ise, keşfinden birkaç yıl sonra tamamlandı (Anonim 1, 2010). 1914 – 1918 I. Dünya Savaşı yıllarında, Fransız fizikçi Langevin tarafından ultrasonik piezoelektrik titreştirici geliştirilmiştir (Jordan ve Ounaies, 2001).

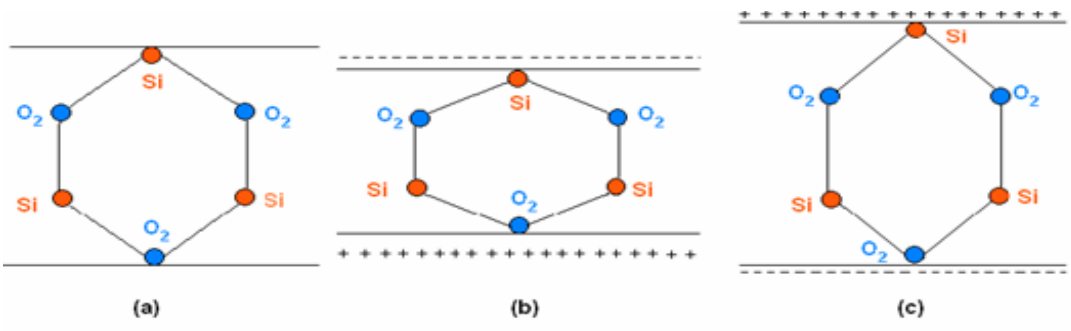
Piezoelektrik olay, temel olarak kristallerin mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürmesi işlemidir. Katı maddeler yüklü parçacıklardan oluşur ve nötr bir katı madde içerisinde negatif ve pozitif yüklü parçacıklar denge halindedir. Bazı katı malzemelerin üzerine mekanik bir kuvvet uygulandığında yüzey yükleri oluşur ve bir kristalde piezoelektrik özelliğin gözlenmesi bu yüzey yüklerinin oluşmasına bağlıdır. Piezoelektrik özelliğin gözlenebilmesi yani cisim sıkıştırıldığında yüzeyde yüklerin oluşabilmesi için cismin simetri özelliğinin olması yüklerin oluşması için gerekli koşulları kısıtlamaktadır bu sebepten dolayı simetri merkezi olmayan kristaller piezoelektrik olay için en uygun malzeme grubundadır. Elektriksel olarak yüksüz ve yapısal olarak simetri merkezi bulunmayan bir kristale basınç uygulandığında artı ve eksi yüklerin merkezi birbirinden ayrılır ve kristalin karşılıklı yüzeyleri zıt yükle yüklenir. Bu yükler, karşılıklı iki yüzey arasında elektrik alan yaratır ve kristalin karşılıklı yüzeyleri arasında ölçülebilir bir potansiyel enerji oluşturur. Piezoelektrik olayı ifade eden bu sürecin tersi olan ters piezoelektrik olay ise kristalin karşılıklı yüzeyleri arasına bir elektrik gerilimi uygulandığında kristal içerisindeki yüklerin birbirini itmesi ve çekmesinden kaynaklanan kristaldeki boyut değiştirmesi olarak tanımlanır (Güzel, 1996).

Piezoelektrik özellik gösteren anizotrop cisimlerin başında kuvars kristali gelmektedir. Bu kristal; hem iyi bir piezoelektrik özelliğe sahip, hem de sert ve sağlamdır. Turmalin kristali de iyi bir piezoelektrik kristaldir. Bunlardan başka lityum sülfat, kadmiyum sülfür ve çinko oksit gibi tek kristaller de kullanılmaktadır. Bunun yanında, Rochelle tuzları, amonyum dihidrojen fosfat gibi yapma kristaller iyi piezoelektrik özellik göstermelerine rağmen sağlam olmamaları sebebiyle fazla kullanılmazlar.



Şekil 1.25. (a) Bir kuartz kristali (b) Curie kesiti (c) Kuartz kristalinden kesilmis x kesimli levha (Aral, 1989)

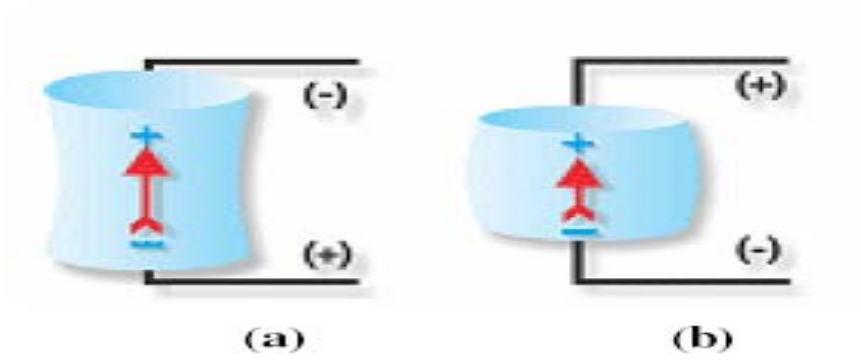
Kuartz kristalleri tabiatta altı yüzlü prizma üzerine, altı yüzlü iki piramidin konulmasıyla oluşan bir şekilde billurlaşırlar (Aral, 1989). Doğal formdaki bir kuvars kristali, Şekil 1.25a' da görülmektedir. Piramidin yüzeylerinin biri dardır, bunu takip eden diğer yüzey ise geniştir. Kristal, z ekseni etrafında $120^{0'}$ lik bir dönme simetrisine sahiptir. Bu nedenle, z ekseni boyunca kristal optikçe izotroptur ve optik eksen adını almaktadır. z eksenine dik bir düzlem kesite Curie kesiti adı verilmektedir. Curie kesiti altı kenarlıdır (Şekil 1.25b). Curie kesitinin köşelerini birleştiren x ekseni, elektrik ekseni; bu kesitin kenarlarının ortasını birleştiren y ekseni, üçüncü eksen olarak adlandırılır. x eksenine dik olarak kesilen kuartz kristal levhasına x kesimli kuartz levha adı verilir (Şekil 1.25c). Bu şekilde kesilmiş kuartz levhaya basınç uygulandığında x eksenine dik yüzeylerde zıt yükler meydana gelir. Bu nedenle bu eksene elektrik eksen adı verilir. Kristale x doğrultusunda bir germe kuvveti uygulanırsa yine x eksenine dik yüzeylerde elektrik yükler meydana gelir fakat bu durumda artı ve eksi yükler yer değiştirir. Meydana gelen bu olay piezoelektrik olay olarak tanımlanmaktadır (Berke ve Hoppenkamps, 1990; Kökdemir, 2007).



Şekil 1. 26. Piezoelektrik olay (a) Denge durumundaki kuartz kristali, (b) Basınç kuvveti uygulanmış kuartz kristali, (c) Germe kuvveti uygulanmış kuartz kristal (Aral, 1989)

Şekil 1.26’ da ki piezoelektrik olayı, SiO_2 kuvars kristali yardımıyla açıklanmaktadır. SiO_2 kuvars kristali denge durumunda iken Si atomları 4’ er adet (+), O_2 molekülleri de 4’ er adet (-) yük taşımaktadırlar. Bu nedenle; simetriden dolayı, yükler birbirlerini dengelemektedirler (Şekil 1.26a).

Bu kristale bir basınç uygulandığında simetri bozulur, O_2 moleküllerinin üst yüzeye, Si atomlarının da alt yüzeye yaklaşmasından dolayı üst yüzey (-) yüklerle yüklenirken alt yüzey de (+) yüklerle yüklenir (Şekil 1.26b). Kristale bir germe kuvveti uygulandığında ise basınç uygulandığı durumdaki gibi kristalin simetrisi bozulur ve yük dengesi değişir. O_2 molekülleri üst yüzeyden uzaklaştığı için üst yüzey (+) yüklerle yüklenir. Si atomları da alt yüzeyden uzaklaştığı için alt yüzey (-) yüklerle yüklenir (Şekil 1.26c). Bu olaya piezoelektrik olay denir.



Şekil 1.27. Ters piezoelektrik olay, (a) kristale polarizasyonu yönünde voltaj uygulandıgında, (b) kristale polarizasyonunun tersi yönünde voltaj uygulandıgında (Anonymous 7, 2010)

Son olarak, yukarıda anlatılan olayın tam tersini düşünelim. Yani, kristale bir basınç ve germe kuvveti uygulamak yerine elektrik alanı uygulayalım. Uygulanan elektrik alanı yük dengesini bozacağından kristalin boyutları x ve y yönünde değişecektir. Elektrik alanın yönü değiştirildiğinde ise, boyut değiştirme de yön değiştirecektir. Bu olay ters piezoelektrik olay adını alır (Berke ve Hoppenkamps, 1990; Kökdemir, 2007). Elektrik alan yerine bir elektriksel titreşim uygulanırsa kristalde aynı frekanslı titreşim hareketi oluşacaktır.

Ters piezoelektrik olayda x kesimli bir kristalin yüzeylerine x doğrultusunda bir elektrik alan uygulandığında artı yükler eksi yükleri çekeceğinden dolayı kristalin boyu x-y doğrultusunda artar (Şekil 1.27a). Kristale -x doğrultusunda bir elektrik alan uygulandığında ise artı ve eksi yüklerin birbirini itmesinden dolayı kristalin boyu x-y

doğrultusunda azalır (Şekil 1.27b). Bu olaya da ters piezoelektrik olay adı verilir. Ters piezoelektrik ile 1 GHz' e kadar yüksek frekanslı ultrases dalgaları oluşturmak mümkündür. Yine piezoelektrikten yararlanılarak 1 GHz' e kadar yüksek sabit frekanslı elektriksel titreşimler elde edilebilmektedir.

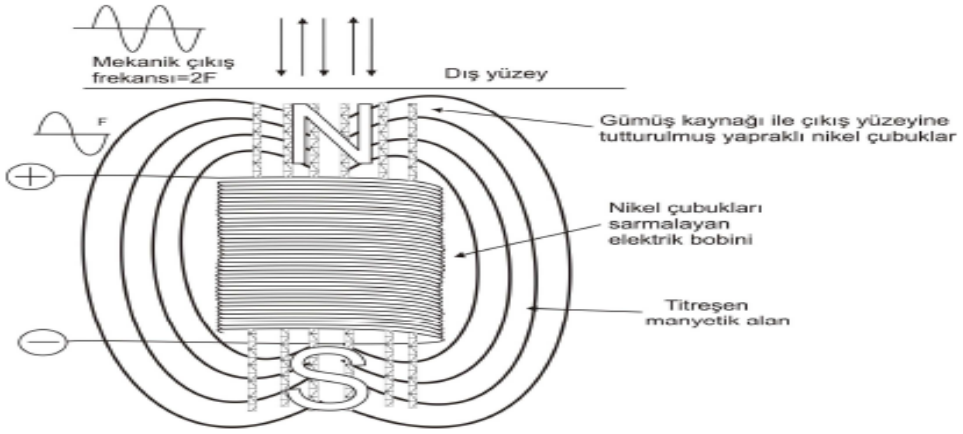
Günümüzde birçok kristalin piezoelektrik özelliğinden yararlanılmaktadır. Piezoelektrik kristaller her tür elektronik donanımda, saatlerde, akustik ve hassas ölçüm yapan mikroskoplarda, yarı iletken ve entegre devre teknolojilerinde ve yüksek ses üretimi için ultrasonik aygıtlardaki transduser yapımında kullanılmaktadır (Anonim 1, 2010).

Transduserlerde boyuna ultrases dalgaları elde etmek için x kesimli, enine ultrases dalgası elde etmek içinse y kesimli piezoelektrik kristaller kullanılır. Kristalerin salınımları kristallerin kesim moduna ve kristallerin doğasına bağlıdır. Piezoelektrik özellik gösteren kristaller titreşim yapabilmeleri için iki yüzü iletken bir metalle (gümüşle veya altınla) kaplanması daha iyi sonuç verir. Bu kaplama işi kimyasal olarak veya elektrolizle yapılabilmekle beraber en iyisi metalin boşlukta buharlaştırılması ve buharlaşan kısmın istenilen yüzeyler üzerinde toplanılmasıdır. Seramik biliminin son senelerde gelişmesiyle piezoelektrik özellik gösteren seramiklerle transduserler yapılmıştır. Seramik transduserler polikristal yapıdadır. Bunlar birbirlerine bağlı birçok kristalcikten oluşur ve istenilen ölçülerde ve şekilerde kalıplara dökülür. Fırınlarda sertleştirilir sonra yüzleri altın veya gümüşle kaplanır. Ultrasesi odaklama yeteneğine sahip konkav transduserler piezoelektrik özellik gösteren seramiklerden kolaylıkla yapılabilmektedir (Aral, 1989).

1.1.11.2. Manyetostriksiyon titreştiriciler

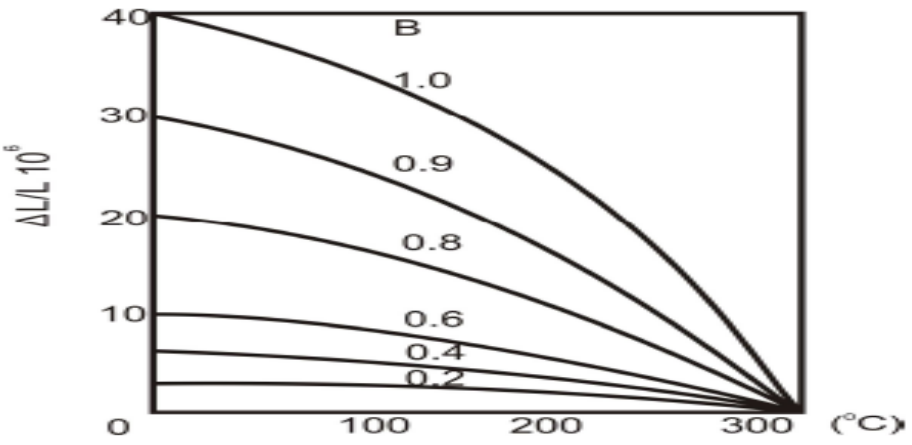
Bir manyetik alan içerisine sokulan demir, nikel ve kobalt gibi ferromanyetik metallerin ve permandur krominum gibi bazı alaşımların boylarında uzama ya da kısalma olur. Bu uzama ve kısalma, maddenin cinsine ve manyetik alanın büyüklüğüne bağlıdır; manyetik alanın yönüne ise bağlı değildir (Gürpınar, 2007; Cansu, 2008). Ferromanyetik özellik gösteren maddelerin manyetik alana girdiklerinde boylarının değişmesi olayına manyetostriksiyon olay denilmektedir. Manyestriksiyon olayda piezoelektrik olay gibi tersinirlik gösterir. Bir basınç veya germe kuvveti uygulanan ferromanyetik maddelerin manyetik özelliklerinde bir değişme görülür. Basit bir

manyetostriksiyon transduser, ferromanyetik özellik gösteren bir metal çubuğun bir selenoid içine konulmasıyla yapılabilir.



Şekil 1.28. Manyetostriksiyon prensibine göre çalısan bir ultrases vericisi (Fuchs, 2002)

Selonoide uygulanan alternatif gerilim çubukta boyuna alternatif bir değişmeye sebep olur. Çubukta meydana getirilen boyuna titreşimin frekansı, uygulanan alternatif frekansın iki katı kadardır. Şekil 1.28' de manyetostriksiyon prensibine göre çalışan bir ultrases vericisi görülmektedir. Ferromanyetik metaller, sıcaklığa bağlı olarak manyetik özelliklerini değiştirirler. Şekil 1.29' da nikelin sıcaklığa bağlı manyetostriksiyonu görülmektedir.



Şekil 1.29. Ferromanyetik nikelin sıcaklığa bağlı manyetostriksiyonu (Gündüz, 1993)

Manyetostriktiv olay, düşük frekanslarda sesötesi enerji üretmede kullanılır. 20-40 KHz arası frekanslar ve hatta gittikçe azalan verimle olmak kaydıyla 100 KHz' e kadar olan frekanslar, bu yöntemle üretilebilir. Bu piezoelektrik transduserlerin frekansından oldukça düşük olmasına rağmen gücü çok yüksektir.

Manyetostriktiv problar ucuzdurlar ve dış etkenlere dayanıklıdırlar. Bu nedenle betonun ve kayaların test edilmesinde, denizaltı sonar sisteminde ve düşük sesötesi frekanslar gerektiren diğer uygulama alanlarında tercihen manyetostriktiv problar kullanılır. Daha yüksek frekanslar için başka bir sesötesi üretim yöntemine gerek vardır.

1.1.11.3. Elektriksiyon titreştiriciler

Bütün dielektrik malzemeler ve bazı cisimler bir elektrik alana konulduğu zaman boylarında uzama veya kısalma olur. Elektrik alanda boyları kısalıp uzayabilen maddelere ferroelektrik maddeler adı verilmektedir. Ferroelektrik bir madde elektrik alan içerisine konulduğunda uzuyor ve elektrik alanın yönü değiştirildiğinde yine uzuyorsa ya da bir elektrik alanda boyu kısalıyor ve elektrik alanın yönü değiştirildiğinde de boyu kısalıyorsa bu olaya elektriksiyon olay denilir. Ferroelektrik cisimler yüzey titreşiminin sinüsoidal olması için polarlanır. Polarlama yapılırken cismin elektriksiyon özelliğinin kaybolması için cisim Curie sıcaklığının üstüne kadar ısıtılır ve ısıtma işleminden sonra kuvvetli bir elektrik alan içerisinde soğutulur. Böylece cisim polarlanmış olur ve polarlanmış ferroelektrik cisimlere bir alternatif gerilim uygulandığında cismin boyundaki değişim sinüsoidal olur. Yani polarlanmış ferroelektrik cisimler piezoelektrik cisimler gibi kullanılabilir.

Baryum titanat, kurşun zirkonat, demir-kobat, nikel çok kullanılan elektriksiyon transduserlerdir. Bu transduserlerin güçlerinin çok büyük olması ve üretilen ultrasesin bir noktada odaklanabilmesinden dolayı ultrases enerjisi ile mekanik matkap gibi metalleri delme imkânı doğar (Aral, 1989).

1.1.12. Ultrasesin etkileri

1.1.12.1. Ultrasesin fiziksel etkileri

a) Kabarcık oluşumu: Sıvı içinde, içi gaz veya sıvı buharı dolu veya boşluk olan kabarcıkların oluşması olayına kabarcıklanma (kavitasyon) denir. Yeterince büyük

şiddetli ultrases dalgaları sıvılarda kabarcıklanma yaratır. Bu yol ile sıvı içinde bulunan katı cisimciklerin ve bakterilerin parçalanması sağlanır. Gözle görülür kabarcıklanmayı sağlamak için gerekli şiddet, birkaç yüz watt/cm^2 mertebesindedir. Bu şiddetteki ışıma ile bakteri zarı parçalanabilir.

b) Isı etkisi: Farklı ortamlarda ve farklı ultrases dalgaları ile yapılan deneyler, ses titreşim enerjisinin ısı enerjisine dönüştüğünü ve ortamın ısındığını göstermiştir. Isıya dönüşen enerji miktarı ortamın soğurma katsayısı ile orantılıdır. Soğurma katsayısı büyük ortamda ısıya dönüşüm daha fazladır.

c) Sis oluşumu: Bir sıvı içinde ilerleyen şiddetli bir ultrases dalgası hava-sıvı sınırında yansıdığı zaman sıvı molekülleri püskürür ve sıvı yüzeyinde bir sis tabakası gözlenir.

d) Gazdan arıtma: Bazı durumlarda katı ve sıvı içinde çözünmüş bulunan gazların arıtılması gerekebilir. Isıtma yolu ile kısmen gazdan arıtma yapılabilsede tamamen gazdan arıtma işlemi ultrasesin gazdan arıtma etkisi ile yapılabilir. Bu amaçla gazdan arıtılmak istenen madde ultrasese tabi tutulur. Mesela döküm eriyiği ultrasese maruz bırakılırsa içindeki çözünmüş gazlar serbest kalarak gazdan ayrılır. Bu yöntemle dökümde oluşabilecek gözeneklerin önüne geçilebilir.

1.1.12.2. Ultrasesin kimyasal etkileri

Yeterince yüksek şiddetli ultrases, yayılma ortamlarında bazı kimyasal olaylara sebep olmaktadır. Örneğin, reaksiyon hızlanması, oksitlenme, bileşim bozulması, kristallenme, kaynama sıcaklığı değişmesi, molekül zincirlerinin parçalanması gibi. Ultrases, atom ve moleküller arası kimyasal bağları etkileyerek molekül zincirlerini kırabilir.

Ultrases dalgalarının bir maddedeki yayılma hızını ve soğurulmasını ölçmek, hız ve soğurulma katsayının frekansla değişimini incelemek yoluyla bir maddenin molekül yapısı ve birçok özellikleri ortaya çıkarılabilir. Ses hızının molekül yapısına bağlı olarak değişiminden faydalanarak kompleks oluşumlar, bir kimyasal reaksiyonun gidişi ve hızı da ölçülebilir.

1.1.12.3. Ultrasesin biyolojik etkileri

a) Isı etkisi: Ultrasese maruz kalmış bir organın sıcaklığının arttığı gözlenir. Sıcaklık yükselmesi uygulanan ultrasesin şiddetine, derinliğe, uygulama süresine, soğurma katsayısına, organın büyüklüğüne ve kan dolaşımına bağlıdır.

b) Mikro masaj etkisi: Ses dalgaları bir ortamda yayılırken titreşim hareketini alan atom veya molekülde titreşmeye başlar. Atom veya moleküllerin bu titreşim hareketlerinin sonucu olarak ortamda sıklaşma ve seyrekleşmeler meydana gelerek periyodik olarak tekrarlanır. Sıklaşma basınç artması, seyrekleşme basınç düşmesine neden olur ve böylece peryodik basınç değişimi meydana gelir. Bunun gibi ultrases bir organda yayılırken hücre grupları periyodik basınç değişimine maruz kalır. Bu olaya sesin mikromasaj etkisi denir. Peryodik basınç değişimi sinüzoidal olup ultrases ile aynı frekanslıdır. Ultrasesin bu özelliğinden tıpta bazı hastalıkların tedavisinde yararlanılmaktadır.

c) Elektriksel etkisi: Bazı protein veya selüloz molekülleri gibi büyük biyolojik moleküller üzerinde yapılan araştırma sonuçlarından bunların piezoelektrik (basınç elektriklenmesi) olay gösterdikleri tespit edilmiştir. Piezoelektrik olay, basınç etkisi altında bazı büyük moleküllerin veya kristallerin yüzeylerinde zıt elektrik yüklerinin oluşarak molekül veya kristalin elektriksel kutuplanması olayıdır. Ultrasesin oluşturduğu basınç değişimi iri biyolojik parçacıkların elektriksel kutuplanmasına yol açar. Ultrasesin meydana getirdiği basınç değişimi büyük biyolojik moleküllerin elektriksel kutuplanmasına neden olur. Elektriksel kutuplanma zamanla peryodik değişimli olup kas ve sinirleri uyarabilir.

d) İvme etkisi: Yüksek frekansla titreşen bir tanecik oldukça büyük ivmelere maruz kalabilir. Bundan dolayı ultrases titreşimini alan bir ortam parçacığı oldukça büyük mekanik ivme ile titreşir (Güzel, 1996).

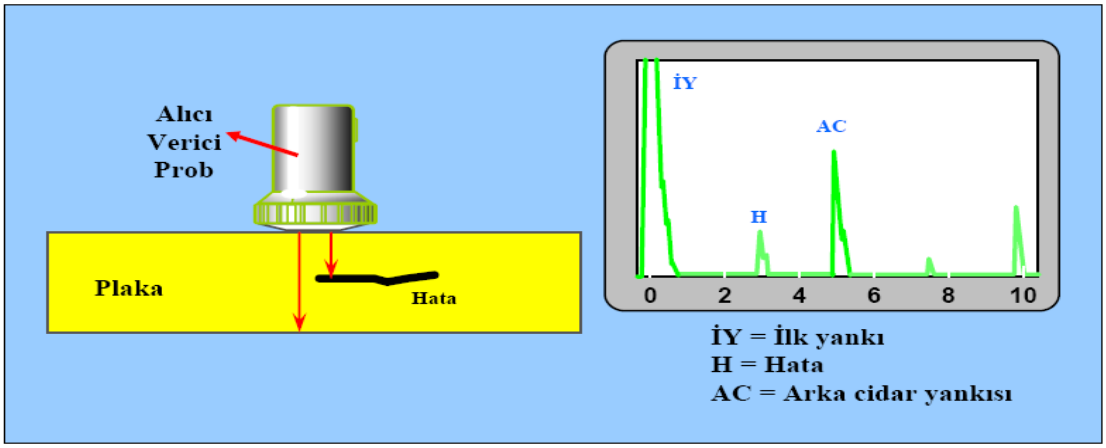
1.2. Ultrasonik Test Yöntemleri

İki ortamın ara yüzeyine gelen ultrasonik dalgaların bir kısmı geldikleri ortama yansıtılırken, diğer kısmı ikinci ortama geçerek yayılmaya devam ederler. Ultrasonik

testte yansıyan dalgaların kullanıldığı yönteme darbe - yankı yöntemi, iki yüzey arasında geçiş yapan dalgaların kullanıldığı yönteme de geçirim (transmisyon) yöntemi denir. Malzemelerin, ultrasonik dalgalarla rezonans haline uyarılarak kontrol edildiği yönteme ise rezonans yöntemi denir (Berke ve Hoppenkamps, 1990).

1.2.1. Darbe - yankı yöntemi

Darbe - yankı yöntemi malzemelerin ultrasonik muayenesinde en çok kullanılan yöntem olup, bu metotta hatanın belirlenmesi, ultrasonik dalganın yansıyan kısmının kullanılmasıyla gerçekleştirilir. Burada bir Transduser hem alıcı hem de verici olarak görev yapar (Şekil 1.30). Çok kısa elektrik pulslarının transdusere uygulanmasıyla üretilen ultrasonik dalga malzeme içine gönderilir. Dalga malzeme içinde ilerlerken aynı transduser alıcı olarak çalışmaya başlar. Arka cidardan yansıyan ultrasonik dalga transdusere ulaştığında mekanik titreşimler elektrik pulslarına dönüştürülür. Bu şekilde ultrasonik dalgaların azalan genlikte malzeme içinde yansımalarıyla ekranda bir dizi ardışık arka cidar yankıları elde edilir. Yankılar arasındaki geçen zaman aralığı katot ışınları tüpü ekranında ölçülebildiğinden, yatay skaladan hatanın yeri, düşey skaladan da hata büyüklüğü ve derinliği hakkında bilgi elde edinilebilir (Güzel, 1996).



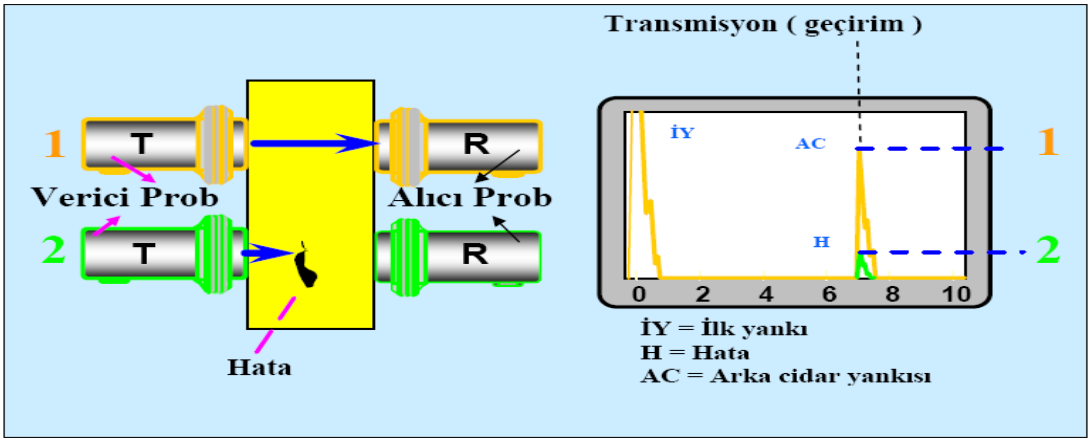
Şekil 1.30. Darbe - yankı yönteminin çalışma prensibi

Bu yöntemde, tek kristalli veya çift kristalli prob kullanıldığı gibi, iki ayrı prob da kullanılabilmektedir. İki prob kullanıldığında, problar malzemede aynı yüzey üzerine temas ettirilir ve biri gönderici diğeri algılayıcı olarak çalışır.

Tek veya çift kristalli problar kullanıldığında, cihaz ekranı malzemenin test edilen konumdaki kalınlığını kapsayacak şekilde kalibrasyon yapılmalıdır. Hatanın varlığı ve konumu, arka cidar yankısından önce algılanan yankının varlığı ve konumu ile gösterilir. Bu yöntemde ölçülen büyüklükler sesin malzeme içinde aldığı mesafe (veya zaman) ve yankı genliğidir. Darbe - yankı yönteminin çalışma prensibi Şekil 1.30' da gösterilmiştir.

1.2.2. Transmisyon yöntemi

Bu yöntemde, biri gönderici diğeri algılayıcı olmak üzere iki tane prob kullanılmaktadır. Bu problar malzemenin karşılıklı yüzeylerine ve birbirine paralel ve simetrik olacak şekilde konumlanır (Şekil 1.31). Böylece parçayı kat ederek geçen ultrasonik ses miktarı değerlendirilir. Bu yöntemde, yansıyan ultrasonik ses miktarı değerlendirilmez. Hatalar, parçayı kat eden ultrasonik ses miktarının azalması ile belirlenir. Malzemeyi geçen dalga huzmesinin genliği ölçülür. Böylece malzemenin içyapısı hakkında bilgi edinilir. Bu yöntemle hatanın büyüklüğü ve yüzey derinliği tayin edilemez.



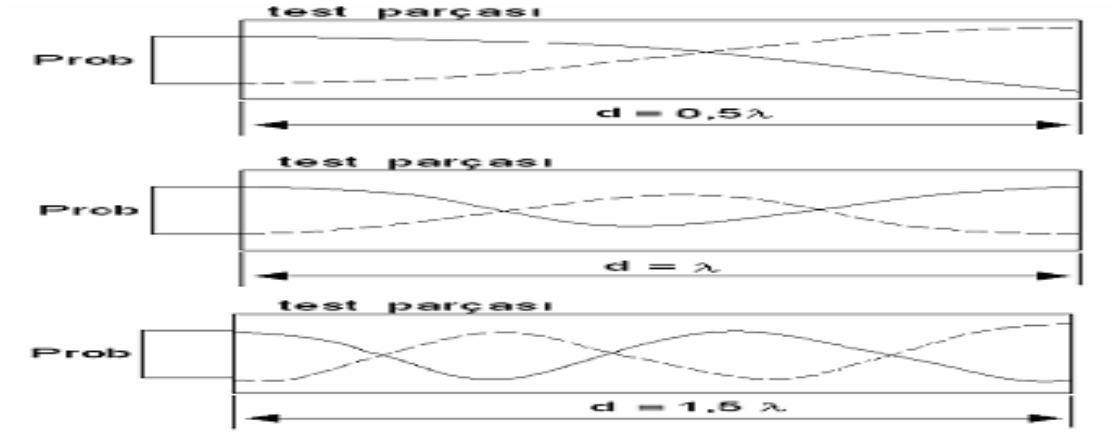
Şekil 1.31. Transmisyon yönteminin çalışma prensibi

Yöntemin en önemli avantajları, ses tek geçiş yaptığı ve geri dönmediği için zayıflama etkisinin yarıya inmesi ve geçiş süresinden dolayı transmisyon sinyalinin diğer yanıltıcı sinyallerden kolayca ayırt edilebilmesidir (Berke ve Hoppenkamps, 1992). Dezavantajları ise, bazı test elemanlarının arka yüzeyine ulaşılmasının zor olduğu durumlar ve iki yüzeye birden kuplaj uygulanma güçlüğünün olmasıdır.

1.2.3. Rezonans yöntemi

Ultrasonik ses miktarının hatalardan veya test parçasının arka yüzeyinden, açılı olarak sesin yansıması durumunda tercih edilen bir yöntemdir. İki prob kullanılmaktadır. Problardan biri, enerji gönderirken diğeri, hatalardan açılı olarak yansıyan enerjiyi algılamak üzere, farklı bir noktaya yerleştirilir. Alıcı prob, gönderici probdan biraz daha büyük çaplıdır ve test parçası içinde hatadan dolayı saçılan enerjiyi toplamak amacıyla, odaklama özelliğine sahiptir. Açılı problarla test işlemi için uygun bir yöntemdir (Kayrak, 2001).

Dışarıdan uygulanan tek bir darbenin etkisiyle serbest titreşen bir yapı rezonans frekansı ile titreşir ve titreşim sönümleninceye kadar frekans aynı kalır. Rezonansın oluşabilmesi için, test parçasının ön ve arka yüzeylerinden gelen yansımaların büyük bir kayıpla olmaması, yansımadan sonra geldikleri doğrultuda geri dönmeleri ve başka yöne saparak kaybolmamaları gerekir. Yani, test parçası paralel yüzeyli ve pürüzsüz olmalıdır.

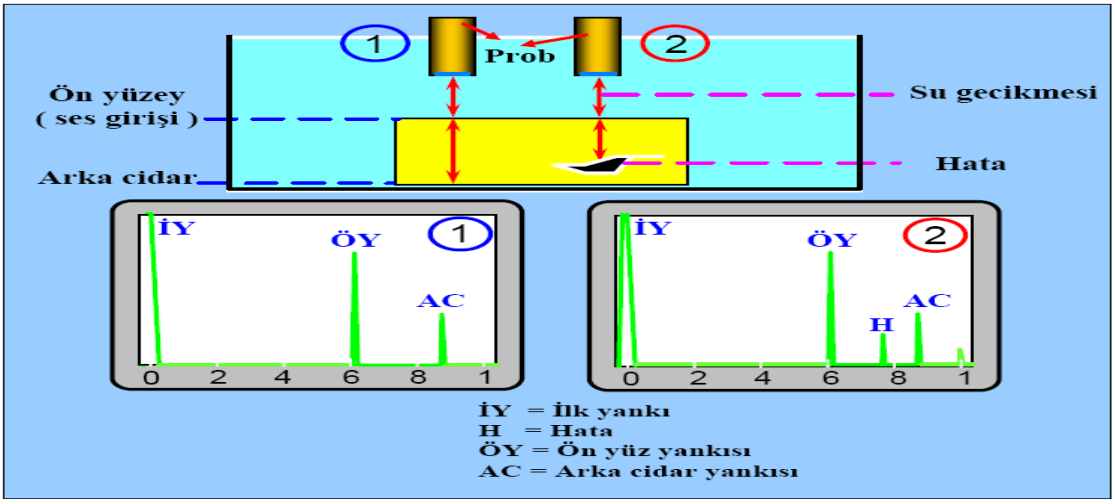


Şekil 1.32. Rezonans yönteminin çalışma prensibi

Rezonans durumunda ses kuvvetlenip duyulabilir duruma gelir. Bu da numune de süreksizlik olmadığını gösterir. Eğer dalgalar birbirini sönümlüyorsa hiçbir ses duyulmaz. Bu metodun kullanılması için gerekli olan sart, gönderilen dalganın dalgaboyunun yarısı, numunenin boyuna eşit olmalıdır. Rezonans yöntemi, ince malzemelerin cidar kalınlıklarının ve kaplama kalınlığı ölçümünde kullanılmıştır. Bu yöntem yeteri kadar duyarlı olmayıp, günümüzde artık kullanılmamakta ve yerine, çok daha duyarlı ölçüm yapabilen darbe - yankı tipi cihazlar kullanılmaktadır.

1.2.4. Daldırma yöntemi

Bu metotta ise numune ve transducer Şekil 1.33' de görüldüğü üzere bir sıvı ortamı içinde bulunur. Sıvı ortamı, gerekli kuplaj malzemesini sağlayarak numune ve transducer arasında ultrases dalgasında oluşabilecek kayıpları önlemektedir. Genel olarak tek transducer hem alıcı hem de verici olarak kullanılmaktadır.



Şekil 1.33. Daldırma yönteminin prensibi

Transducer vasıtasıyla numune içerisinden geçen ultrases dalgası yine transducer vasıtasıyla algılanarak ultrases cihazına aktırılır. Bilgisayar sistemine bağlı olan ultrases cihazından alınan veriler anolog sinyallerin dijital sinyallere çevrilmesi ile tarama yapılarak sonuçlar elde edilir.

1.3. Ultrasesin Genel Kullanım Alanları

Bugün, endüstri ve teknoloji alanında yaygın olarak ultrasonik sistemler kullanılmaktadır. Gelişen teknoloji ile artış gösteren ürün çesitliliği ve işlevselliği beraberinde kalite, teknik emniyet, dayanıklılık ve kullanım amacına uygunluk gibi ürüne dair koşulsuz güvence arayışını da beraberinde getirmektedir.

Ultrases, malzeme karakterizasyonunda, katı, sıvı ve gazların esneklik sabitlerinin ölçülmesinde, öbür yüzeyine erişilemeyen bir levhanın veya duvarın kalınlığının tespitinde, herhangi bir malzemenin iç kısmında bulunan çatlaklar, hava kabarcıkları veya yabancı maddelerin yerleri ve büyüklüklerinin tespit edilmesi gibi

değişik amaçlar için kullanılmaktadır. Ultrases yardımıyla bir maddenin molekül yapısı ve birçok fiziksel özellikleri bulunabilir.

Ultrases dalgaları canlı ve yumuşak dokularda yol alabilir. Tıp alanında iç organların ve dokuların görüntüsünü elde etmekte kullanılmaktadır. Bu çalışmalar yüksek genlikli, doğrusal olmayan yayılma karakteristikli uygulamalardır (Kak ve Dines, 1978). Sonuçlar dalga distorsiyonuna ve başlangıç frekansına göre harmoniklere bakılarak değerlendirilir.

Ultrases cihazları tıpta yaygın olarak kullanılan ve teşhiste ilk başvurulan cihazlardan biridir. Hücre ve dokularda meydana gelen bozukluklar ve hastalıklar ultrases kullanılarak yapılan ultrason adı verilen cihazlar kullanılarak tespit edilebilir. Ultrason cihazları sıvı ve katı ayrımını çok iyi yapabilen cihazlardır bu sebeple özellikle yumuşak dokuların incelenmesinde kullanılır. Tıptaki bu tür uygulamalarda dokulara zarar verilmemesi için düşük şiddetli ultrases dalgaları kullanılmaktadır. Düşük güçlerdeki ultrases dalgalarının vücut üzerinde etkisi olmaz, bu nedenle hamile kadınlarda çocuğun gelişimini inceleme ve tanıda rahatlıkla kullanılabilmektedir. Tümörlerin ve kandaki pıhtılaşmaların varlığını saptamaya yarayan ve tarayıcı adıyla anılan aygıtlarda da ultrases dalgalar kullanılır. Ultrases dalgaları böbrek taşlarının ve tümörlerin temizlenmesinde, başta romatizma olmak üzere birçok hastalığın iyileştirilmesinde kullanılmaktadır.

Yüksek şiddette ultrases dalgaları, metalleri çok ince toz haline getirmede, çok ince tanecikli fotoğraf emülsiyonları hazırlamada, civa, altın gibi metalleri gaz ve sıvılarda süspansiyon haline getirmede, özel metal alaşımları yapmada, gaz karışımlarından gazları ayırmada, yapay sis meydana getirmede, fabrikaların kirli gaz ve suları içinde süspansiyon halinde bulunan kıymetli maddeleri çökelterek kurtarmada, fabrika bacalarından çıkan gazları temizlemede, gaz karışımlarından gazları ayırmada, tekstil, metal kaplama, saatçilik gibi aşırı temizlik isteyen sanayi kollarında temizleme işlemini yapmada, meşrubat sanayinde şarabı eskitmek, birayı yabancı mayalardan arıtmada, şuruplarda enzimleri glikoz gibi diğer ürünlere dönüştürmede, sütü sterilize etmede, dökümcülükte erimiş metalleri gazdan arıtmada, kristal büyümesini kontrol etmede, sert maddeleri delmek ve işlemek için ultrasesli matkap yapımında, elektrik ve elektrik sanayisinde ultrasesli kaynak makineleri yapımında, elektronik geciktirme kanalları yapımında, ultrasesli hızölçerleri yapımında, ultrasonik çamaşır ve bulaşık makineleri yapımı gibi daha birçok alanda geniş uygulama imkânı bulmustur (Güzel, 1996).

Denizcilikte sonar cihazları yardımıyla deniz dibi temas haritalarının çıkarılmasında ve denizaltı gemilerinin çevrelerinin kontrol edilmesinde, deniz yolu ile ihracat esnasında uzun süreli depolamalarda meyve ve sebzelerin olgunluklarının tespit edilmesinde ve modern balıkçılıkta faydalanılmaktadır.

Ultrases dalgalarının önemli fizyolojik etkileri vardır. Şiddetli ultrases dalgalarının etkisi altında kalan yumurtadan eksik organlı civcivlerin çıktığı, hücre ve dokularda değişiklikler meydana geldiği görülmüştür. 16 ~ 30 kHz' lik şiddetli ses dalgaları insanda olumsuz etkiler doğurur. 10 W/cm^2 şiddetindeki ses ötesi dalgaların beyaz fareleri, sivrisinekleri, bazı böcekleri, sıvılar içerisindeki bakterileri ve diğer canlıları kısa bir süre içerisinde öldürdüğü görülmüştür. Bu özelliğinden yararlanılarak ortamdaki mikropların arındırılmasında yararlanılmaktadır (Ertaş, 1995).

Ultrases dalgalarının ziraatte de oldukça geniş kullanım alanları bulunmaktadır. Ekilecek olan tohumlara düşük şiddetli ultrases dalgaları uygulandığı zaman, tohumlar hem daha çabuk hem de daha verimli büyümektedir. Ultrases dalgalara tutularak ekilen patateslerin normal olarak ekilen patateslerden bir hafta önce olgunlaştığı ve veriminin % 50 arttığı yapılan incelemelerde gözlemlenmiştir. Filizlenmeye sebep olan önemli bazı kimyasal reaksiyonların hızı da ultrases dalgaları ile artmaktadır (Ramazanoğlu, 2010).

1.4. Ultrasesin Avantaj ve Dezavantajları

Ultrasonik, endüstrinin oldukça geniş bir alanına yayılmış uygulamalarıyla oldukça esnek ve güvenilir bir tahribatsız test yöntemidir. Tahribatsız test yöntemlerinden sadece iki tanesi x- ışınları metodu ve ultrasonik metod yüzey altı çatlaklarını tam olarak gösterir. Diğer tekniklerden, manyetik parçacık (magnetic particle) ve girdaplı akım (eddy current), bazı yüzey çizgilerini tespit edebilir; fakat sadece yüzeyin hemen altındakileri tespit eder. X-ışını tekniğinden farklı olarak ultrasonik metodlar çevresel açıdan ve sağlık açısından risk içermez. Bunlara ek olarak ultrasonik metodlar temaslı ve temassız ölçüm yapılabilmesini sağlar. Ultrasonik problar ayrıca karmaşık geometriye sahip malzemelerin analizlerini de yapabilecek özelliklerde dizayn edilebilirler. Son olarak da ultrasonik inceleme seramiklerden metallere, metallerden biyolojik hücrelere kadar tüm madde çesitleri için kullanılabilir.

Ultrasonik teknikler avantajlarının yanı sıra bazı dezavantajlara da sahiptir. İlk olarak oldukça tecrübeli teknik eleman gerektirir. Bunun yanı sıra, temassız metodları

olmasına rağmen transduserlerin çoğu, cisimle temas gerektirir. Ayrıca ultrasonik dalgalar genellikle, dalganın hareket yönüne paralel yöndeki boyuna uzanmış, düzlem kusur ve çatlakları tespit edemeyebilir. Ultrasonik metodu kullanmak biraz pahalı bir yöntemdir. Ultrasonik metodları kullanmanın avantaj ve dezavantajları kısaca Çizelge 1.3' de gösterilmektedir.

Çizelge 1.3. Ultrasonik metodların avantaj ve dezavantajları (Meyer, 1988; Özdemir, 2007; Cansu,2008)

	ULTRASESİN AVANTAJLARI		ULTRASESİN DEZAVANTAJLARI
1	Ultrasonik metodlar ile temaslı ve temassız ölçüm yapılabilir.	1	Manuel operasyonlar büyük titizlik ve uzman eleman gerektirir.
2	Ultrasonik metodlar çevresel açıdan ve sağlık açısından risk içermez.	2	Muayene prosedurleri için konu hakkında geniş bilgiye ihtiyaç duyulur.
3	Yüksek hassaslıkla çok küçük hataların bile deteksiyonu mümkündür.	3	Çok ince ve küçük, yüzeyi kaba parçaların muayenesi oldukça güçtür.
4	İç kusurların, yerinin, büyüklük, şekil ve karakterizasyonunda diğer tahribatsız muayene yöntemlerine göre daha doğru ve güvenilir sonuçlar verir.	4	Yüzeyin hemen altındaki süreksizlikler belirlenemeyebilir.
5	Ölçüm yapabilmek için yalnız bir yüzey yeterlidir.	5	Kalibrasyon için referans standartlara ihtiyaç duyulur.
6	Ultrasonik muayenelerin, muayeneyi yapan kişilere ve çevresindekilere bir zararı yoktur.	6	Dalganın ilerleme yönüne dik yüzey kusurlarını tespit edemeyebilir.
7	Ultrasonik muayenelerin, çalışılan canlı veya cansız numunelere bir zararı yoktur.	7	Çalışılacak yüzey, toz, kir ve boya gibi maddelerden temizlenmelidir.
8	Kolay taşınabilir.	8	Çok pahalı bir yöntemdir.
9	Bilgisayar ile çalışılabilir ve alınan veriler yardımı ile hataların karakterizasyonu ve malzemelerin ozellikleri belirlenebilir.	9	Çalışılacak yüzey ile transduser arasına uygun bir kuplaj sıvısı sürülmelidir.
10	Kompleks geometrik cisimlerin ölçümleri yapılabilir.	10	Çalışılacak yüzey paslanmaz ve su geçirmez olmalıdır.

1.5. Katıların Esneklik Özellikleri

Üzerine dış kuvvetler etki ettiğinde bütün cisimler elastik deformasyona uğrarlar. Yani, dış kuvvetlerin uygulanması halinde, bir cismin şeklinin veya büyüklüğünün (veya bunların her ikisinin) değişmesi mümkündür. Bu değişimler büyük ölçekli deformasyonlar olarak gözlendiği halde, deformasyona karşı koymaya çalışan iç kuvvetler, atomlar arasındaki kısa mesafeli kuvvetlerden kaynaklanmaktadır.

Malzemelerin özellikleri içyapıya büyük ölçüde bağlıdır. Uygulanan bir işlem sonucu özelliklerde meydana gelen değişmelerin nedeni ancak içyapı göz önüne alınarak açıklanabilir. İçyapılar atomlar arası bağ kuvvetleri etkisinde üç boyutlu uzayda dizilmeleri sonucu oluşur. Atomlararası bağların oluşmasında ana etken elektron yapılarıdır. Özellikle en dış yörüngede bulunan valans elektronları cisimlerin mekanik, fiziksel ve kimyasal özelliklerini belirlerler.

Atomlararası bağ kuvvetleri atomları bir arada tutarak içyapıyı oluşturur. Malzemelerin mukavemeti, elektriksel ve ısıl özellikleri büyük ölçüde içyapıya bağlıdır. Bağlar kuvvetli olursa elastisite modülü, mukavemet ve ergime sıcaklığı yüksek, ısıl genleşme düşük olur.

Zayıf bağları koparmak için gerekli enerji kuvvetli bağlarınınkinin yaklaşık onda biri kadardır. Kuvvetli bağlar egemen olduğu zaman zayıf bağların etkisi önemsizdir. Ancak bazı malzemelerde (doğrusal polimer) atom grupları arası tek bağlayıcı kuvvet olunca önem kazanır ve mekanik özellikleri belirler.

Malzemelerin özellikleri bağ türüne, bağ enerjisine ve atomların dizilişine büyük ölçüde bağlıdır. Atomlararası bağ kuvvetleri uygulanan kuvvetlere karşı direnç gösterir, şekil değiştirmeyi ve kırılmayı önlemeye çalışırlar (Onaran, 2006).

Katıların esneklik özelikleri gerilme gerinme kavramlarından yararlanılarak açıklanabilir. Gerilme; bozulmaya sebep olan kuvvetle orantılı olup cismin üzerine birim kesit başına etki eden dış kuvvettir. Kısaca birim yüzeye etki eden kuvvete gerilme (stress) denir ve σ ile gösterilir (Ilıcan, 1995; Serway, 1996; İşci ve İlk, 1999; Dinçer, 2004).

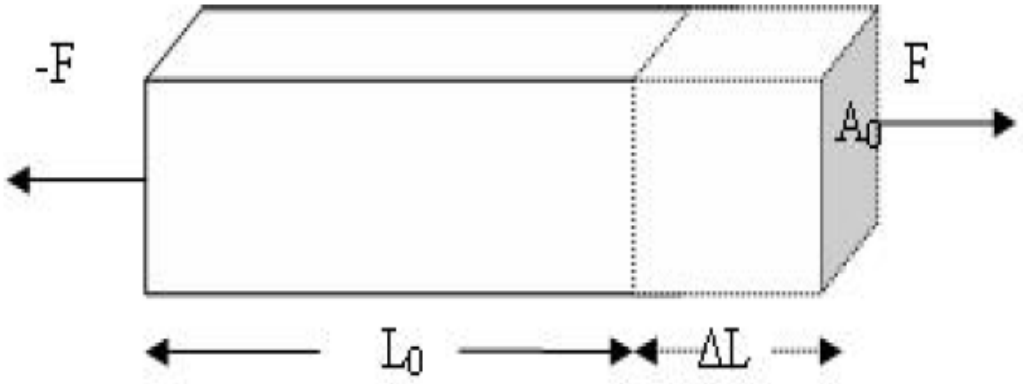
Gerinme; malzemenin bilinen bir gerilme altında akması, akışkan davranış göstermesi ve boyut değiştirmesidir. Birim yüzeyde meydana gelen elastik şekil değişimi, gerinme (strain) olarak tanımlanır ve ε ile gösterilmektedir (Ilıcan, 1995; Serway, 1996; İşci ve İlk, 1999; Dinçer 2004). Gerinme, elastik şekil değişimi derecesinin bir ölçüsüdür.

Yeteri kadar küçük gerilmeler için; gerilme, gerinme ile doğru orantılı olup orantı sabiti elastik şekil değişimine uğrayan maddenin cinsine ve elastik şekil değişiminin yapısına bağlıdır. Bu orantı sabiti, esneklik sabiti (veya esneklik modülü) olarak adlandırılır. Böylece, esneklik sabiti, gerilmenin gerinmeye oranı olarak;

$$\text{Esneklik sabiti} = \text{Gerilme} / \text{Gerinme} \qquad (1.27)$$

şeklinde ifade edilir. Şekil değişiminin şekline göre boyuna esneklik modül, enine esneklik modül, Young modülü ve hacimsel esneklik modülü gibi çeşitli esneklik modülleri tanımlanabilir. Young (1810), yeteri kadar küçük gerilmeler için; gerilmenin, gerinme ile doğru orantılı olduğunu ve orantı sabitinin bozulan maddenin cinsine ve bozulmanın yapısına bağlı olduğunu belirtmiştir (Şekil 1.34). Bu orantı sabitine Young

modülü (Esneklik Modülü) denir ve yönelimin bir fonksiyonudur. Young modülü E harfi ile gösterilir.



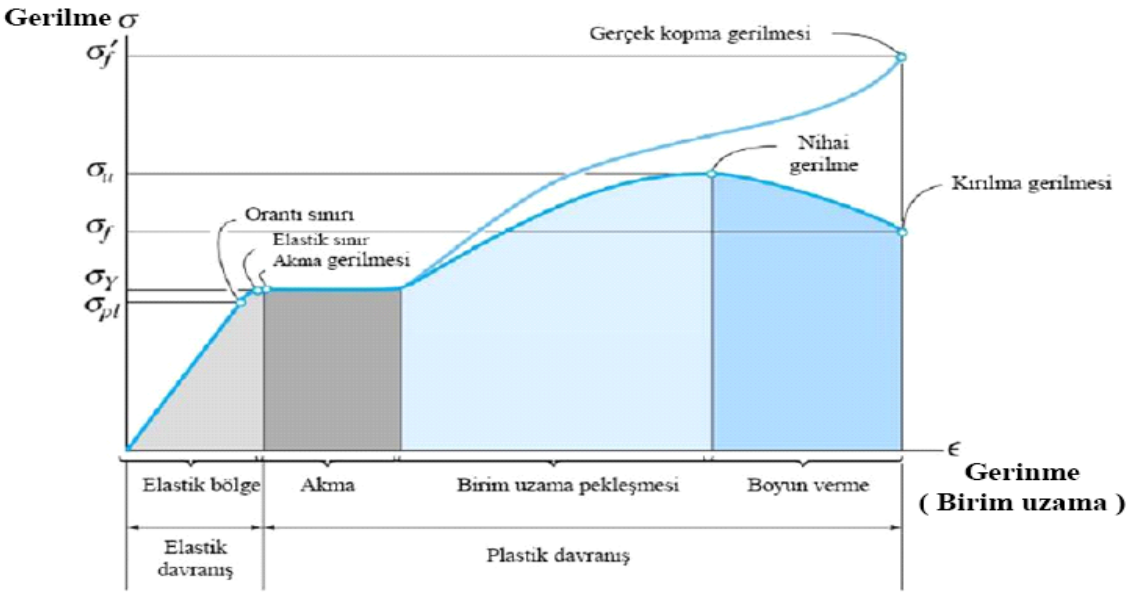
Şekil 1. 34. F kuvvetinin etkisi altında ΔL kadar uzatılmış uzun bir çubuk

Şekil 1.34' de ki gibi kesitinin alanı A_0 olan L_0 uzunluğundaki bir çubuğa kesitine dik olacak şekilde, bir F dış kuvveti uygulandığında, çubuğun içindeki iç kuvvetler uzunluk değişimine karşı koymaya çalışır. Sonuçta çubuk dengeye ulaşır. Denge durumunda, çubuğun uzunluğu biraz büyümüş ve dış kuvvet, iç kuvvetler tarafından tam olarak dengelenmiştir. Böyle bir durum için, çubuğun gerilme etkisinde olduğu söylenir. Dış kuvvetin F büyüklüğünün çubuğun A_0 kesit alanına oranı uygulanan gerilmeyi verirken çubuğun uzunluğundaki ΔL değişiminin, çubuğun ilk uzunluğu L_0' a oranı gerinmeyi vermektedir. Bunlar (1.27) eşitliğinde yerine yazılarak bu çubuğa ait Young modülü şöyle tanımlanabilir;

Esneklik sabiti = Gerilme / Gerinme ise $$E = \frac{F/A_0}{\Delta L/L_0} \quad \text{N/m}^2 \qquad (1.28)$$

Bu oran ne kadar yüksek olursa malzeme o kadar sağlam olur. Young modülü bir kristaldeki atomlar ve moleküller arasındaki bağlar hakkında bilgi verir (Tagieva ve Perelomova, 1983; Dinçer, 2004). Young modülünün değerinin artması, atomlar arası bağların daha kuvvetli olduğunu gösterir ve cisim bu doğrultuda gerilim ve basınca

daha fazla dayanmaktadır. Bu sabitin küçük olduğu doğrultularda, maddenin elastik deformasyonu daha kolaydır.



Şekil 1. 35. Esnek bir katıda gerilmenin (σ), gerinmeye (ε) bağlı olarak değişimi

Çekmeye tabi tutulan malzemelerin büyük bir bölümü için elastik bölgede gerilme-gerinme ilişkisi aşağıdaki gibidir:

$$\sigma = E.\varepsilon \tag{1.29}$$

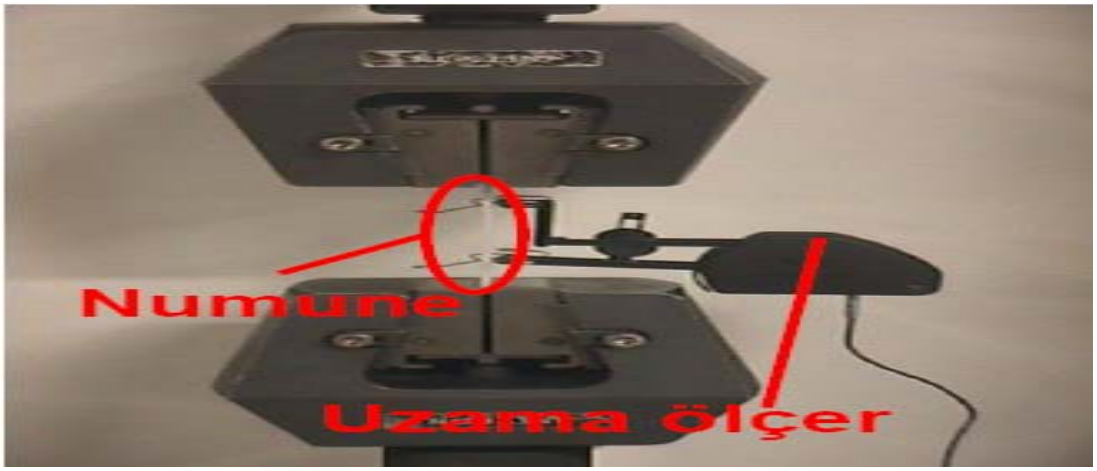
Bu denklem Hook kanunu olarak bilinir. Şekil 1.35' den de görüldüğü gibi esneklik sınırına kadar grafiğin eğimi E Young modülünü vermektedir. Yeteri kadar büyük zor uygulayarak, bir cismin esneklik sınırını aşmak mümkündür (Şekil 1. 35). Gerilme esneklik sınırını geçtiğinde, cisim giderek aşırı derecede bozulur ve artık gerilme ortadan kalktıktan sonra bile başlangıçtaki şekline geri dönemez. Esneklik sınırının ötesinde, gerilme-gerinme eğrisi doğru çizgiden uzaklaşır. Bunun sonucu olarakta, eğrinin şekli giderek değişir. Gerilme daha fazla arttırıldığında, cisim sonunda kopar.

Young modülünün mekanik yoldan hesaplanmasında en çok çekme testi kullanılmaktadır. Çekme testi, malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi ve

mekanik davranışlarına göre sınıflandırılması amacıyla yapılır. Çekme testi sonucunda elde edilen veriler doğrudan mühendislik hesaplarında kullanılır. Bu yüzden çekme testi, en yaygın olarak kullanılan tahribatlı malzeme muayenesi yöntemlerinden biridir.

Çekme testinde, standartlara göre hazırlanmış numunenin iki ucu, standart deney sisteminde çeneler arasına sıkıştırılır, çeneler birbirinden, seçilen belirli, sabit, bir hızla uzaklaştırılırken örnek iki ucundan bu belirli hızla gerdirilir. Gerdirme hızları denenen malzemenin türüne göre seçilir. Çekme işlemi tek eksende, belirli bir hızla ve sabit sıcaklıkta numune koparılıncaya kadar devam ettirilir. Deney sırasında, standart numuneye devamlı olarak artan bir çekme kuvveti uygulanır, aynı esnada da numunenin uzaması kaydedilir (ASTM, 1993; Savaşçı ve ark., 1998; Savaşkan, 1999). Bu testte gerekli güç dayanımları belirlenebilmekte, uzama miktarları ve uygulanan yük göz önünde bulundurularak esneklik ve kırılganlık hakkında yargıya varılabilmektedir. Şekil 1.36' da örnek bir çekme testi aparatı gösterilmektedir.

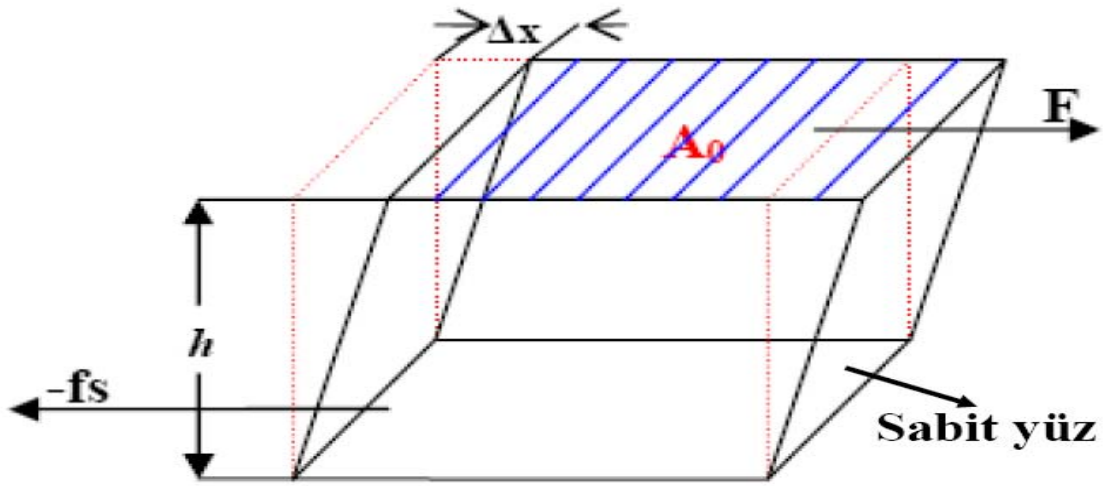
Çekme testi sonucunda gerilme-birim uzama eğrisi yani çekme diyagramı çizilerek malzemenin orantı sınırı, elastiklik sınırı, akma sınırı ve çekme dayanımı gibi mukavemet değerleri ile kopma uzaması, kopma büzülmesi ve tokluk gibi süneklik değerleri belirlenir (Savaşkan, 1999). Ayrıca çizilen gerilme-birim uzama eğrisinin eğiminden yararlanılarak malzemenin Young modülü de hesaplanabilir.



Şekil 1. 36. Çekme testi düzeneği

Şekil 1.36' da görüldüğü gibi bir cismin bir yüzü F_s sürtünme kuvveti tarafından sabit bir konumda tutulurken, öteki yüzüne, yüzeye teğet bir F kuvveti uygulandığında, bozulmanın bir başka şekli ortaya çıkar. Cisim başlangıçta dikdörtgenler prizması şeklinde bir bloksa, kesme gerilmesi, onun şeklini ara kesiti paralelkenar olan bir yapıya

dönüştürür. Bu durumun doğmasına sebep olan gerilmeye, kesme (kayma) gerilmesi denir ve τ ile gösterilir. Bu bozulma neticesinde cismin hacmi değişmez. Kesme gerilmesinin uygulandığı yüzeyin alanı A_0 ise, kesme gerilmesi, teğet F kuvvetinin yüzeyin alanına oranı olarak $\tau = F/A_0$ şeklinde tanımlanır.



Şekil 1. 37. Paralel iki yüzüne aynı büyüklükte fakat zıt yönlerde iki kuvvet uygulanan dikdörtgenler prizması şeklindeki bir blokta meydana gelen kayma elastik şekil değişimi

Kesme gerinmesi ise γ ile gösterilir ve $\gamma = \Delta x/h$ şeklinde tanımlanır. Burada Δx, kesilen yüzün uygulanan kuvvet doğrultusundaki yerdeğiştirmesi, h ise cismin yüksekliğidir. Malzemelerin elastik deformasyonunda kesme gerilmesi ile kesme birim uzaması (gerinme) doğru orantılıdır. Bu orantı sabiti enine (kesme) modülü olup G ile gösterilir. Buna göre, kesme gerilmesi $\tau = F/A_0$ ve kesme gerinmesi $\gamma = \Delta x/h$ olmak üzere bunlar oranlanırsa;

$$G = \frac{\tau}{\gamma}, \quad G = \frac{F/A_0}{\Delta x/h} \tag{1.30}$$

şeklinde elde edilir. Enine esneklik modülü; katının, onun atomik düzlemlerinin birbiri üzerinde kayması şeklinde ortaya çıkan harekete karşı gösterdiği direncin ölçüsüdür. Enine esneklik modülü oldukça zayıf olan Van der Waals veya hidrojen bağlarına bağlıdır (Akkurt, 1991; Serway, 1996).

Hacimsel esneklik modülü, düzenli bir şekilde sıkıştırılan bir cismin buna karşı koyma özelliğini ifade etmektedir. Bir cisme etki eden dış kuvvetlerin, cismin bütün yüzeylerine dik açılarda etki ettiğini ve bütün yüzlere düzgün olarak dağıldığını kabul edelim. Bu yapıdaki bir bozulmaya uğrayan cismin hacmi azalır fakat şekil aynı kalır. ΔP hacim gerilmesi, yüzeye dik olan F kuvvetinin büyüklüğünün, yüzeyin A alanına oranı olarak tanımlanır. ΔP = F/A niceliğine basınç denir. Hacim gerinmesi, hacimdeki ΔV değişiminin başlangıçtaki V hacmine bölümüne eşittir. Hacimdeki küçülme K hacim esneklik modülü cinsinden,

K = Hacim gerilmesi / Hacim gerinmesi, $$K = -\frac{F/A}{\Delta V/V} = -\frac{\Delta P}{\Delta V/V} \qquad (1.31)$$

şeklinde ifade edilebilir. Bu tanım ifadesindeki – (eksi) işareti K' nın artı işaretli bir sayı olmasını sağlamak için konulmuştur. Çünkü başlangıçtaki bir artma (artı ΔP), hacmin küçülmesine (eksi ΔV) sebep olur. Basınç küçülürse (eksi ΔP), hacim büyür (artı ΔV) (Serway, 1996).

Hacim sabitinin tersi, maddenin sıkışabilme özelliği olarak adlandırılır. Katı ve sıvıların hacim sabitleri varken sıvılar için kayma modülü ve Young modülü yoktur. Çünkü bir sıvıya kayma zoru veya gerilme zoru uygulanamaz. Çünkü o gerçek bir akışkandır.

Ayrıca önemli diğer önemli bir elastiklik sabiti Poisson oranıdır. Simon Poisson (1825), malzemelerin yanal sehimleri (daralma) hakkında önemli gözlemler yapmış ve teoriler ortaya koymuştur. Lineer elastik malzemelerde küçük gerilmeler altında, yanal şekil değiştirme (daralma) ε_y, boyuna uzama şekil değişimi (ε_a) ile orantılıdır ve orantı katsayısına Poisson oranı denir (Onaran, 2006; Abi, 2007), μ ile gösterilir (Perepechko, 1975) . Poisson oranı*;*

$$\mu = -\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_a} \qquad (1.32)$$

şeklinde ifade edilir. μ, bir pozitif malzeme sabitidir. Çekme halinde $\varepsilon_a > 0$, $\varepsilon_y < 0$ olduğundan yukarıdaki denklemde yerine konursa $\mu > 0$ elde edilir.

Bir çubuk çekmeye uğratılırsa, uzamaya yanal sehimler (daralma) eşlik eder. Tek eksenli çekme için Poisson, y ve z yönündeki birim uzamaların x yönündeki birim uzama ile orantılı olduğunu bulmuştur. Yanal deformasyonlar bu yönlerde uygulanan hiç bir kuvvet olmaksızın ortaya çıkmaktadır. Poisson oranının azalması malzemenin kalite ve dayanımının arttığını gösterir.

Poisson oranının varlığı sayesinde tek eksenli gerilme halinde kuvvete dik doğrultudaki deformasyonlar, ölçülmesine lüzum kalmadan, bilinmektedir. Poisson oranının bilinmesi, ayrıca deformasyon neticesinde cismin hacmindeki değişikliğin hesaplanmasını mümkün kılar (Postacıoğlu, 1981).

Doğrusal izotrop elastik cisimlerde E, G, μ ve K elastik sabitlerinden yalnız ikisi bağımsızdır, aşağıdaki bağıntılar yardımıyla diğer ikisi hesaplanabilir.

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)} \tag{1.33}$$

$$K = \frac{E}{3(1-2\mu)} \tag{1.34}$$

Buna göre poisson oranının 1/2 den küçük olması gerektiği kolaylıkla görülmektedir. $\mu = 0{,}5$ olursa K sonsuz olur ki bu durumda cisme uygulanan basınç sonsuz olsa dahi hacim değişmez. Bu özelliğe sahip malzemeye sıkıştırılamaz malzeme denir. Sıkıştırılamaz cisim için $\mu = 0{,}5$ olup polimerler az da olsa sıkıştırılabilir malzemeler olduğundan $\mu < 0{,}5$' tir (Akkurt, 1991; Onaran, 2006). Kauçukta $\mu = 0{,}49$ olduğu için şekil değiştirme hesaplarında kauçuk için sıkıştırılamaz malzeme varsayımı kullanılabilir.

1.6. Polimer Karakterizasyonu için Geleneksel Analiz Teknikleri

Polimerlerin karakterizasyonu için Dinamik Mekanik Analiz (DMA), Reolojik Analiz ve Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) gibi değişik geleneksel analiz teknikleri vardır. Burada sadece Dinamik Mekanik Analiz (DMA) den söz edilecektir.

1.6.1. Dinamik mekanik analiz (DMA)

Polimerlerin dikkate değer özelliklerinden birisi, temel fiziksel ve mekanik özelliklerine ait tek bileşik kaynak veren elastik özelliklerinin kesin olarak açıklanmasıdır.

Katıların büyük çoğunluğu ufak bir deformasyona maruz kaldıklarında Hook Kanununa uyarlar.

$$\sigma = E.\varepsilon \tag{1.29}$$

σ = Gerilme
E = Elastiklik modülü
ε = Gerinme

Düşük vizkozluğa sahip sıvıların davranışları genellikle Newton kanunu ile iyi tanımlanır.

$$\sigma_{xy} = \eta \frac{\delta Vx}{\delta y} \tag{1.35}$$

σ_{xy} = Kesme gerilmesi
η = Vizkozluk
$\frac{\delta Vx}{\delta y}$ = Sıvıların hız gradyanı

Gerçek durumlarda bütün yönlerdeki deformasyonlarda Hook kanununa uyan ideal bir elastik katı olmadığı gibi tamamen elastikiyetten yoksun ideal Newtonsal sıvılarda yoktur. Bu gerçeğe ilk kez dikkat çeken J. Maxwel' dir (Perepechko, 1975). Katı boyutta bütün gerçek katılar hem elastik hem de vizkoz özelliklere sahiptir. Birçok materyallerin esneklik davranışları hafifçe kendini göstermektedir. Ancak bu sebepten dolayı yukarıda gösterilen iki çeşit katıdan birisi ile ilişkilendirilirler. Polimer materyaller bir kural olarak hem esnek katıların hem de sıvıların özelliklerini

göstermektedirler. Bu gerilme ve gerinme arasında özel bir ilişkinin olduğunu göstermektedir.

Gerilme (σ) ve gerinme (ε) arasındaki ilişki (elastik maddeler için periyodik bir kurala göre değişmektedir);

$$\sigma = E^*.\varepsilon \tag{1.36}$$

şeklinde gösterilebilir (Alfrey, 1948; Bland, 1960; Kolsky, 1963; Ferry, 1980). Burada kompleks esneklik modülü olan E*;

$$E^* = E' + iE'' \tag{1.37}$$

Esneklik modülünün gerçek kısmı Ge [E*] = E´ dinamik esneklik modülü, imajiner (sanal) kısım ise Im [E*] = E´´ kayıp esneklik modülü olarak isimlendirilir. (1.36) numaralı denklem, polimerlerde gerilmenin periyodik olarak değişimi ile ilgili davranışın açıklanmasında çok önemli bir yere sahiptir. Bir cisme bir kuvvet uygulandığı varsayılırsa sinüzoidal olarak değişen gerilme;

$$\sigma = \sigma_0 \sin \omega t \tag{1.38}$$

Burada;
σ_0 = Gerilmenin genliği
ω = Açısal frekans ($\omega = 2\pi f$, f = salınım frekansı)
t = zaman

Bu durumda, eğer bir cisim doğrusal elastik davranış gösterirse, onun gerinmesi o zaman sinüzoidal olarak fakat gerilmeden bir faz farkı ile değişir. Yani,

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \sin(\omega t - \delta) \tag{1.39}$$

Burada;
ε_0 = Gerinmenin genliği

δ = Gerilme ve gerinme arasındaki faz farkı

Herhangi bir zamanda;

$$E^* = \frac{\sigma}{\varepsilon} \tag{1.40}$$

Gerinme ile aynı fazda olan ve değeri gerinme ile π/2' lik bir faz farkına sahip olmak üzere, sinüzoidal olarak değişen ve gerinme ile bir fazda çakışmayan bir gerilme, iki bileşenli olarak kararlaştırılabilir. Bu E' ve E'' niceliklerinin anlamını anlaşılır hale getirmektedir.

Esneklik modülü; bir materyalin gerinmesi (bağıl deformasyon) için uygulanması gereken gerilmenin büyüklüğü anlamına gelir. Esneklik modülü E* hesaplanmadan önce numunenin geometrisi ve yüklenme çeşidinin dikkate alınması gerekir.

Dinamik esneklik modülü E′, kompleks katsayının gerçek kısmıdır. Gerinme ve bu gerinmenin değeri ile aynı fazdaki gerilmenin bileşeni arasındaki orana eşittir. Dinamik esneklik katsayısı, verilen bir kütlenin bir peryot boyunca bir birim hacmi tarafından alınan ve salınan enerji miktarını karakterize etmektedir. Modülün gerçek kısmı E′, bazen depolama modülü olarakta adlandırılmaktadır. Çünkü potansiyel enerjisinde olduğu gibi depolanan enerji ile ilgilidir ve ondaki enerji peryodik deformasyonlar ile salınır.

Modülün imajiner kısmı E′′, kayıp modül olarak adlandırılır. Kayıp esneklik modülü E'', gerilmenin, gerinmeden π/2' lik bir faz farkı ile geride olan bileşeni ve gerinmenin değeri arasındaki orandır. Kayıp esneklik modülü E'', malzemeler şekil değişimine uğradıklarında ısı şeklinde harcanan enerji ile ilgilidir ve salınımların bir peryodu boyunca elastik salınımların ısıya dönüşen enerji kısımlarını karakterize etmektedir. Gerilme ve gerinme arasındaki faz değişimi (kayması) maksimum olduğunda E'' bir maksimuma düz geçiş yapar. Böylece E'', salınım enerjisinin bir elastik cisimdeki harcanımını karakterize eder. Kompleks esneklik katsayısının mutlak değeri;

$$\left|E^*\right| = \sqrt{\left(E'^2 + E''^2\right)} \tag{1.41}$$

Diğer taraftan, gerilme ve gerinmenin genlik değerleri arasındaki ilişki şu şekilde yazılabilir;

$$\frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} = \sqrt{\left(E'^2 + E''^2\right)} \tag{1.41a}$$

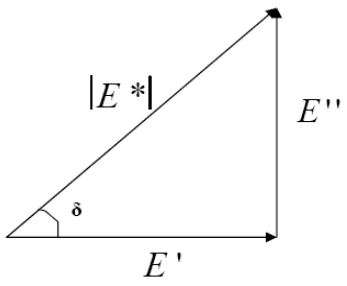
Gerilme ve gerinme arasındaki faz farkı kayıp tanjantı [tan (δ)]' nın belirlenmesinde kullanılmaktadır. Kayıp tanjantı iç sürtünmeleri ve sönümlemeleri tanımlayan ve çevrim başına sönümlenen enerjinin, bir çevrim başına depolanan maksimum potansiyel enerjiye oranıdır.

$$\tan\delta = \frac{E''}{E'} \tag{1.42}$$

E*' ın bileşenleri ve faz kayması δ arasındaki ilişki Şekil 1.38' de verilen vektör diyagramından kolayca belirlenebilir.

$$E' = |E^*| Cos\,\delta \tag{1.43}$$

$$E'' = |E^*| Sin\,\delta \tag{1.44}$$



Şekil 1. 38. Kompleks esneklik katsayısı E*'ın bileşenleri ve faz kayması arasındaki ilişki

(1.41) ve (1.43) numaralı denklemlerden görülebileceği gibi sadece ideal elastik bir madde için $\delta = 0$ ve $|E^*| = E'$ alınabileceği unutulmamalıdır. Bazen kompleks uyum kavramı;

$$J^* = \frac{1}{E^*} = J' - iJ'' \tag{1.45}$$

şeklinde tanımlanmaktadır. J' miktarı dinamik veya depolama uyumu ve J'' kayıp uyumu olarak adlandırılmaktadır. Yine de J* ve E* onların bileşenleri arasındaki basit ilişki daha karmaşık bir yoldan birbirine şöyle bağlıdır;

$$J^* = \frac{\frac{1}{E'} - i\frac{1}{E'}\tan\delta}{1 + \tan^2\delta} \tag{1.46}$$

(1.45) ve (1.46) denklemlerinin bir karşılaştırması bize;

$$J' = \frac{\frac{1}{E'}}{1 + \tan^2\delta} \tag{1.47}$$

$$J'' = \frac{\frac{\tan\delta}{E'}}{1 + \tan^2\delta} = \frac{\tan^2\delta}{E''(1 + \tan^2\delta)} \tag{1.48}$$

J' dinamik uyumu ve J'' kayıp uyumunu verir. İzotropik bir cismin esneklik (elastik) davranışı, iki tane bağımsız kompleks (karmaşık) esneklik katsayısı yardımıyla tamamen tanımlanabilir. Örneğin kompleks Young Modülü E* ve kompleks enine (kesme-kayma) modülü G*. Kalıcı esneklik fonsiyonları (işlevleri), eğer E* ve G* değerleri bilinirse hesaplanabilir. Kompleks Poisson oranı şu şekilde yazılabilir (Cowie, 1991):

$$\mu^* = \mu' - i\mu'' = \frac{E^*}{2G^*} - 1 \tag{1.49}$$

(1.49) ifadesi dinamik Young modülü için düzenlenirse;

$$E' = 2G'(1 + \mu') \tag{1.49a}$$

elde edilir. Kompleks bulk modülü ise;

$$K^* = K' + iK'' = \frac{E^*}{3(1 - 2\mu^*)} \tag{1.50}$$

şeklinde verilebilir (Cowie, 1991).

1.7. Esneklik Modülleri Arasındaki İlişki

Boyuna dalgaların bir katıdaki hızı dalgaların içinde yayıldığı numunenin (ortamın) boyutlarına bağlıdır. Gerilme yükü altındaki çubuk şeklinde bir numune alınırsa (yanal boyutları dalga boyuna göre küçük olan) kompleks dinamik modülü M* yerine bir kompleks gerilme modülü E* alınabilir. Diğer yandan bir ortamda ilerleyen bir boyuna dalga o ortamı sıkıştırır ve yanal olarak onun şeklini bozar. Çünkü bir katı, bir enine kesme ile beraber bir yanal şekil bozukluğundaki gibi herhangi bir doğrultuda enine bir kuvvet oluşturabilir. Bununla birlikte hacimli katılarda olduğu gibi boyuna ve enine dalga türleri ayrı ayrı dikkate alınabilir. Eğer düz çubuk şekilli bir numune (boyutları dalga boyuna göre daha büyük olan) bir gerilim veya basınca maruz bırakılırsa o zaman kompleks modül M*, yayılan dalganın türüne bağlı olarak bir kompleks boyuna modül L* veya bir kompeks enine modül G* ile yer değiştirebilir. Bu yüzden aşağıdaki formulasyon M* için geçerlidir ve her biri gösterilen dalga denkleminden elde edilebilir.

$$M^* = M' + iM'' \tag{1.51}$$

Katılarda birkaç çeşit dalga yayılabilir (Bergmann, 1949). Sıkıştırılmamış bir ortamda, dalga boyu (λ) bir maddenin yanal boyutu (b) den küçükse ($\lambda << b$), atenuasyonun yeteri kadar küçük olduğu bir durumda boyuna dalga hızı şu bağıntı ile ifade edilebilir;

$$V_b = \sqrt{\frac{Ks' + \frac{4}{3}G'}{\rho}} \tag{1.52}$$

Burada;

Ks' = Sabit entropide dinamik hacimsel esneklik modülü

G' = Dinamik enine (kayma- kesme) esneklik modülü

ρ = Dalganın içinde yayıldığı ortamın yoğunluğu

Sıkıştırılmamış bir ortamda yayılan boyuna dalga hızı ifadesi başka bir formatta da şöyle yazılabilir;

$$V_b = \sqrt{\frac{E'(1-\mu')}{\rho(1-2\mu')(1+\mu')}} \tag{1.53}$$

E' = Dinamik Young modülü

μ' = Dinamik Poisson oranı

Bazen boyuna dalga hızı şu şekilde yazılıyor;

$$V_b = \sqrt{\frac{L'}{\rho}} \tag{1.54}$$

(1.54) ifadesi tekrar düzenlenirse;

$$L' = \rho . V_b^{\,2} \tag{1.54a}$$

elde edilir. Burada L' Boyuna dinamik esneklik modülü veya bir boyuna dalganın etkin modülüdür (Waterman, 1963). Boyuna dalgalar için modül Love' nin matematiksel esneklik teorisi ile verilmiştir (Love, 1927). Love teorisi;

$$L^* = K^* + \frac{4}{3}G^* \tag{1.55}$$

$$L' = K' + \frac{4}{3}G' \quad \text{ve} \quad L'' = K'' + \frac{4}{3}G'' \text{ (Nolle, 1952)} \tag{1.56}$$

Boyuna esneklik modülü malzeme bilimi alanında oldukça iyi bilinmeyen bir terim olup enine esneklik modülü veya Young modülü değerleri daha yaygındır. İnce çubuk ve şeritlerde boyuna dalga yayımı ile Young modülü elde edilebilir fakat yüksek frekanslarda dalga boyu şeritlerin kesitsel boyutları ile karşılaştırılabilir duruma geldiği zaman bu teknik aksamaktadır. Bu durumda boyuna dalgalar E´ yi vermez ancak K´+4/3(G´) niceliği veya Denklem 1.56' da ki gibi basitçe boyuna esneklik modülü L´ elde edilebilir. Boyuna esneklik modülü sıcaklık aralığının üzerinde ince geometrileri kestirmenin zor olduğu durumlarda çok daha kullanışlı bir değerdir. (1.56) denkleminde K' yalnız bırakılırsa dinamik hacimsel esneklik modülü (K'), L' ve G' cinsinden;

$$K' = L' - \frac{4}{3}G' \tag{1.57}$$

elde edilir. Bu gibi formülasyonlar özellikle (L´ ve L´´) gibi deneysel ölçümlerden elde edilen terimlerle diğer çeşitli modülleri ilişkilendirmekte yararlıdır. Sadece boyuna ve enine dalgaların her ikisi için ses hızı ve attenuasyon elde edilebildiği zaman K´ ve K´'' nın değerlendirilebileceği açıktır. Sıvılarda enine dalgaların yayılması mümkün olmadığı için L* = K* olduğu kolaylıkla değerlendirilebilir. Bir başka deyişle sıvılarda boyuna modül bulk modülüne eşittir. Aynı malzemenin çeşitli modülleri arasındaki ilişki; L* > K* > E* > G* şeklindedir. Buna göre kabaca **G* = L*/5** (Vogel, 1966) olduğu söylenebilir. Değişik ölçüm teknikleri ile karşılaştırıldığında açıkça burada olduğu gibi malzemelerin hacim özelliklerinin akustik karakterizasyonu için modüller arasındaki ilişki ilginçtir.

Dalgalar ince şeritlerde (polimer lifler, filmlerin dar şeritlerinde) yayılırken eğer $\lambda >> b$ (b bir cismin yanal boyutu) ise;

$$V = \sqrt{\frac{E'}{\rho}} \tag{1.58}$$

Benzer şekilde enine dalga yayılımı kullanılarak enine modül belirlenebilir fakat enine yayılımını destekleyecek yetenekleri olmadığı için sıvılarda ve yumuşak polimerlerde doğru değerlerin elde edilmesi çok zordur. Yayılma doğrultusu, salınımların yayılma doğrultusuna dik, enine dalgaların hızı, şu şekilde gösterilebilir;

$$V_e = \sqrt{\frac{G'}{\rho}} \tag{1.59}$$

(1.59) ifadesi yeniden düzenlenirse;

$$G' = \rho . V_e^{\,2} \tag{1.59a}$$

Burada; **G´** dinamik enine esneklik modülüdür.

Çeşitli modüller Poisson oranı μ kullanılarak birbiri ile ilişkilendirilebilir. Gerilme yüküne maruz bırakılan uzun bir çubuk şeklindeki numune örneği için μ, birim uzunluk başına uzunluk değişiminin birim uzunluk başına en değişimine oranı olarak tanımlanabilir. Poisson katsayısını ölçmenin en güvenilir yolu, ses hızını ölçmektir. Kompleks Poisson oranı;

$$\mu^* = \mu' - i\mu'' = \frac{L^* - 2G^*}{2(L^* - G^*)} \tag{1.60}$$

μ*' ın gerçek kısmını ölçmek çok büyük öneme sahiptir. O, şu yaklaşık denklemle bulunabilir (Waterman, 1963).

$$\mu' = \frac{L' - 2G'}{2(L' - G')} \tag{1.61}$$

Polimerlerde, elastik dalgalar farkına varılacak derecede zayıflarlar. Açıkça ifade edilen frekans ses hızına bağlı olarak gözlenmiştir. X ekseni yönünde uzunlamasına (boyuna) yayılan bir dalga ile beraber hareket eden parçacıkların yer değiştirmesi için şöyle bir ifade yazılabilir;

$$U = U_0 e^{i(\omega t - kx)} \tag{1.62}$$

Burada;
U_0 = Maksimum genlik
t = Zaman
k = Kompleks dalga sayısı

$$k = \alpha + i\beta = \alpha + i\frac{\omega}{V} \tag{1.63}$$

Burada;
α = Absorpsiyon katsayısı
V = Elastik dalga hızı ($V = \lambda f$, λ dalga boyudur)

(1.62) ve (1.63) denklemlerinden parçacıkların salınım genlikleri, yayılan bir dalgada uzaklıkla üstel olarak azalmaktadır.

$$U = U_0 e^{-kx} \tag{1.64}$$

Eğer bir düzlem dalgada x_1 ve x_2 koordinatlarındaki u_1 ve u_2 değerleri bilinirse attenuasyon faktörü;

$$\alpha = \frac{1}{X_2 - X_1} \ln \frac{U_1}{U_2} \tag{1.65}$$

Zayıflama faktörü cm^{-1} boyutundadır. Bazen neper/cm (Np/cm) olarak da ifade edilir. Mademki bir neper aynı boyuta sahip iki nicelik arasındaki oran ve e = 2,71' e eşit öyleyse 1/α, e sürede zayıflama uğrayan genliğin akustik yolunun uzunluğunu

gösterir. Bazen zayıflama faktörü cm başına desibel (dB/cm) olarak da ölçülür. 1 Np/cm = 8,686 dB/cm dir. 8,686 çarpanı zayıflama katsayının birimini Neper (Np)' den desibel (dB) dönüştürmekte kullanılmaktadır. Akustik uygulamalar için zayıflama katsayısı Np' den çok dB biriminde hesaplanmaktadır.

Yukarıda listelenen çeşitli dalgaları ilişkilendirmek için denklem 1.12-1.15' de ki kompleks modülü M*' ın bileşenleri yerine L*, K*, E* ve G* nin bileşenleri, V yerine, yayılma hızları V_b ve V_e ve α yerine ilişkilendirilen dalgaların sönümleme katsayısı yazılmalıdır.

1.8. Akustik Parametreler ve Polimer Hal Arasındaki İlişki

Günümüzde ultrasonik tekniklerin çok geniş kullanım alanı vardır. Bunlardan bir tanesi de malzemem karakterizasyonu ve özellikle polimer karakterizasyonudur. Bir polimerin kompleks esneklik modüllerinin bileşenlerinin belirlenmesinin en kolay ve en güvenilir yolu, onların sesin sönümleme katsayısı ve hızın deneysel olarak ölçülmesinden elde edilen verilerden hesaplanmasıdır. Mesela polimer karışımların değişik bileşimlerinin ultrasonik olarak incelendiği bir çok çalışma yapılmıştır (Gendron ve ark., 1992; Abd El-A1l ve ark., 1994; Piau ve Verdier, 1996; Verdier ve Piau, 1996; Sidkey ve ark., 2001a; Sidkey ve ark., 2001b).

Malzemedeki U genlikleri ve sinyal geçiş süresi τ ile malzemelerin elastik özellikleri ile ilgili akustik parametreler elde edilmektedir. Örnek kalınlığı bilinirse ses hızı V ve zayıflama katsayısı α kolaylıkla hesaplanabilir ve bu kompleks dinamik modülünün hesaplanması için temel oluşturmaktadır. Kayıp faktörü tan (δ) çoğunlukla malzeme kayıplarını tanımlamak için kullanılır ve L′′/L′ arasındaki ilişki ile tanımlanmaktadır. Genellikle ultrasesle malzeme özelliklerinin tanımlanmasında kullanılan standart parametreler yoktur. Mesela birkaç yazar esneklik modülünü tanımlamak için sadece zayıflama ve ses hızını (Ferry, 1980) kullanırken diğerleri boyuna modülü, kompleks Poisson oranının gerçek kısmını (Kono, 1961; Waterman, 1963; Waterman, 1977), grup ve faz hızlarını (Sutherland, 1972; Freemantle, 1998), gevşeme sürelerini (Sahoune, 1996; Challis, 2003), dalga boyu başına attenuasyonu (Ivey, 1949; Cunningham, 1956), kompleks modülün gerçek ve imajiner kısmını (Nolle, 1946; Alig ve ark., 1994; Richeton, 2005; Kroll, 2006) ve tan (δ) (Parthun, 1995) tercih etmişlerdir. Geçmişten bugüne kadar akustik parametrelerin seçimi ile ilgili kullanılan

bu geniş dağılımın hala devam etmesi oldukça ilginçtir. Yukarıdaki tercihler gerçek uygulama ile yakından ilgili olduğu için her araştırmacı kendi bakış açısından haklıdır.

Zayıflama α, kayıp modül L´´ ve tan (δ)' nın hepsi polimer malzemelerdeki sönüm kayıplarını tanımlamak için kullanılmaktadır. Polimerlerdeki akustik ölçümler için üç parametre [zayıflama α, kayıp modül L´´ ve tan (δ)] arasındaki ilişki açık net değildir. Mesela Pethrick (1983) tarafından daha açık bir açıklama olmaksızın tan (δ) = αλ olarak belirtilmiştir. Bu çok basit bir ilişkiyi göstermekte ve α ve λ' nın her ikisi de frekansa bağlı değişkenler olduğundan her ikisinin birbirinden bağımsız olarak hesaplanması biraz yanıltıcı olur. Ayrıca, Denklem 1.17' de gösterildiği gibi, sadece r << 1 olması durumunda tan (δ) = αλ/π olur. Zayıflama α ve dalgaboyu λ' nın her ikisi deneysel ölçümlerden doğrudan elde edilebildiğinden bu denklem daha kullanışlıdır.

Polimerlerin kimyasal yapıları, fiziksel yapıları ve moleküler mobiliteleri (hareketlilikleri) ve ses hızı, sesin sönümleme katsayısı ve kompleks esneklik katsayısının bileşenleri gibi parametreler arasında sıkı ilişki vardır. Dinamik esneklik modülündeki doğal değişim ve büyüklük ile ses hızının her ikisi de polimerlerin ana zincirlerini oluşturan atomların bağ enerjisi ve bitişik polimer zincirlerinin elementleri arasındaki etkileşim enerjisi aracılığıyla belirlenirler.

Değişik akustik deneylerde bütün etkileşim çeşitleri kendilerini tam olarak belirli bir biçimde ortaya koymaktadırlar. Örneğin, makro molekülleri uyuma sahip bir polimer lif (elyaf) veya filmde bir doğrultu boyunca çok yönlü ölçülen ve bir doğrusal doğrultuda ölçülen değerleri birbirine yakın olan ses hızı, en çok moleküller arası etkileşim enerjisi ile belirlenir ve (8-12).10^5 cm/s değerlerine ulaşabilir (Moseley, 1960; Grechishkin ve ark., 1970). Bu yönlenmemiş metallerdeki ses hızını oldukça geçmektedir.

Makro moleküllerin, süper moleküler düzenlerinin doğasındaki bir değişim, yapısal değişimleri, polimer bileşenlerinin doğasını ve içeriklerindeki değişimleri diğer yandan bir polimerin sıcaklığındaki bir değişim ise moleküller arası etkileşimin etkililiğini etkiler. Bu yüzdendir ki bütün bu faktörler ses hızı ve dinamik esneklik modülünün doğasındaki değişimi ve büyüklüğünü fazlasıyla etkilerler. Böylece son iki nicelik, iki çeşit bilgi elde etmemize izin verir, birincisi, polimerlerin en önemli mekanik özellikleri hakkındaki bilgi, ikincisi, polimerin hali, bileşimi, fiziksel ve kimyasal yapısı hakkındaki bilgi.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Konu ile ilgili yapılan detaylı literatür araştırmalarına göre Türkiye de (Öncül-Koç ve Çatalgil-Giz, 1995; Erim ve ark., 1996; Demirata-Öztürk ve ark., 1996; Mirzaoğlu ve ark., 1997; Çatalgil-Giz ve ark., 1998; Okudan, 1998; Çatalgil-Giz ve ark., 2002; Ahmetli ve ark., 2006) ve yurt dışında (Mets ve Mersobian, 1971; Swiger, 1976; Frect ve ark., 1979; Venwo ve ark., 1977; Gibson, 1980; Goodman, 1998; Gaylord ve Mehta, 2003; Gaylord ve ark., 2003**)** polistiren ve epoksi reçinesinin modifikasyonu ve karakterizasyonu ile ilgili çok sayıda çalışmaya rastlanmıştır.

Yurt dışında polistiren ile ilgili olmasa da genel olarak polimer ve kompozitleri ile ilgili çok sayıda ultrasonik çalışmaya ulaşılırken (Alig ve ark., 1988; Perepechko ve ark., 1996; Maffezoli, 1999; Challis, 2000; Higazy ve ark., 2000; Somanathan ve ark., 2001; Toti ve Aminabhavi, 2001; Afifi ve ark., 2002; Döring, 2003; Lionetto, 2004a; Wróbel ve Pawlak, 2006, 2007; McHugh, 2008; Challis ve ark. 2009; Dong ve ark., 2009), Türkiye de yine polistiren ve epoksi kompozitleri dışındaki polimerlerde ultrasonik yöntemlerin kullanıldığı az sayıda çalışmaya ulaşılmıştır (Güney, Oskay ve Özkan, 1995; Çatalgil-Giz, Giz ve Öncül-Koç, 1999; Öncül-Koç, 2001; Yıldız, Çatalgil-Giz ve Giz, 2002; Değirmenci, Çatalgil-Giz ve Yağcı, 2003; Öncül-Koç, Giz ve Çatalgil-Giz, 2004; Güney, 2005).

Türkiye de polimer ile ilgili ultrasonik çalışmaların sayısı az olsada polimer dışında çeliklerde, dökümlerde, metal matrisli kompozitlerde ve seramik malzemelerde ultrasonik ses hızı ve zayıflama katsayısı ile yapılmış çok sayıda karakterizasyon çalışması mevcuttur (Savaroğlu, 1996; Gür ve Ögel, 2001; Gür, 2001, 2003; Gür ve Keleş, 2003; Sarpün, 2004; Gür ve Yıldız, 2004; Öztürk ve Gür, 2005; Gür ve Tuncer, 2005; Demircioğlu, 2006; Sarıkaş, 2008; Gür ve Yıldız, 2008).

2.1. Polistiren ile İlgili Çalışmalar

2.1.1. Polistirenin modifikasyonu ile ilgili çalışmalar

Polistiren aromatik karbon zincirli bir polimerdir. Yapısında bulunan fenil halkası, onun kimyasal aktifliğini arttırarak benzen ve türevlerinin verdiği tüm kimyasal reaksiyonları vermesini sağlar. Polistirenin aromatik halkasına çeşitli fonksiyonel grupların bağlanması hem yeni polifonksiyonel polistirenlerin sentezine, hem de bazı

özelliklerinin geliştirilmesine imkan verir (Kurbanova ve ark., 1996; Mets ve Mersobian, 1971; Frect ve ark., 1979; Gibson, 1980; Gaylord ve Mehta, 2003; Gaylord ve ark., 2003**).**

Polistirenin önemli eksikliklerinden biri olan çeşitli substratlara karşı adhezyon kabiliyetinin olmaması onun polimerik kaplama maddesi olarak kullanılmasını engellemektedir. Bu eksik özelliklerinin giderilmesi için kimyasal modifikasyon metodu kullanılabilir.

Yapılan birçok çalışmada, kimyasal modifikasyonla elde edilmiş modifiye polistirenin, polistirenden farklı olarak yüksek fizikomekanik özelliklere, darbeye karşı dayanıklılığa, nisbi uzamaya, ayrıca termik özelliklere sahip olduğu tespit edilmiştir (Swiger, 1976; Venwo ve ark., 1977; Kurbanova ve ark., 1979; Okudan, 1998; Kaya, 2005).

Okudan (1998) tarafından blok ve emülsiyon polistirenin maleik anhidritle (MA) kimyasal modifikasyonları incelenerek olumlu sonuçlara ulaşılmıştır. Molekül ağırlığı $2{,}5.10^5$ ve $5{,}0.10^5$ olan polistirenlerin maleik anhidrit modifikatörlüğünde yapılan reaksiyon sonucunda kimyasal modifikasyon için optimum şart tespit edilmiştir (Özkeçeci, 2006).

Kurbanova ve ark. (1974) tarafından yapılan çalışmalarda molekül ağırlığı $5{,}0.10^5$ olan emülsiyon polistirenin maleik anhidritle, epiklorhidrinle, bütadien ve izoprenle katyonik katalizörler ortamında olan açillenmesi, alkillenmesi ve alkenillenmesi reaksiyonları incelenmiş, değişik fonksiyonel gruplu polistirenler sentezlenmiş, elde edilen ürünlerin ise fiziko-mekanik özelliklerinin artmış olduğu tespit edilmiştir (Kurbanova ve ark., 1974).

Kaya (2005) yaptığı çalışmada yüksek molekül ağırlıklı blok polistirenlerin asetik anhidritle kimyasal modifikasyon reaksiyonu ve ürünlerini incelemiştir. Molekül ağırlığı $2{,}3.10^5$ g/mol ve $3{,}5.10^5$ g/mol olan polistirenler kullanılarak, asetik anhidritle, $BF_3.O(C_2H_5)_2$ katyonik katalizörü ortamında gerçekleştirilen açilasyon reaksiyonu sonucu elde edilen modifiye polistirenin aromatik halkasına bağlanan açil grubu miktarı bulunmuştur **(**Kaya, 2005).

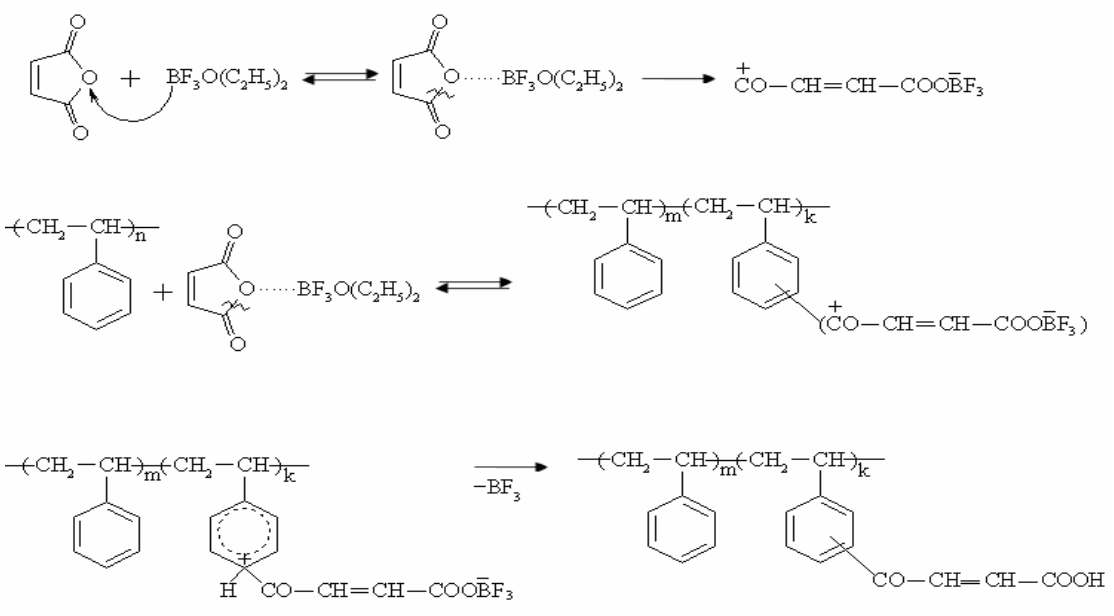
Polistiren düşük molekül ağırlıklı bileşiklere göre çok daha az aktif bir bileşiktir ve reaksiyon kabiliyeti zayıftır. Ancak muayyen reaksiyon şartlarında polistiren, hem düz zincirden yani alifatik karbon zincirinden hemde aromatik halkasından yerdeğiştirme reaksiyonları verir (Tonimato, 1968). Fonksiyonel grup, katyonik

katalizör kullanıldığında polistirenin aromatik halkasına, radikalik katalizör kullanıldığında ise polistirenin alifatik zincirine bağlanır.

Polistirenin aromatik halkasındaki reaksiyonlar, gün geçtikçe alifatik düz zincirdeki reaksiyonlara göre daha fazla artış göstermektedir. Polistirenin aromatik halkasında alifatik zincire göre daha fazla reaksiyon yapılmasının nedeni polistirenin aromatik halkasındaki aktif fenil grubundan ileri gelmektedir. PS aromatik halkası üzerinde halojenleme, nitrolama, sülfolama, açilleme gibi bir çok kimyasal modifikasyon reaksiyonları incelenmiştir (Garney ve ark., 1967; Mets ve ark., 1971; Swiger, 1976; Mogno, 1977; Gibson, 1980).

Polistirenin modifikasyonu konusunda yapılan çalışmalarda değişik molekül kütleli polistirenler kullanılmış, modifikasyona ortam şartlarının etkisi ve polistirenin aromatik halkasına bağlanan fonksiyonel grupların ürün özelliklerine olan etkisi incelenmiştir. Modifikasyon reaksiyonları genelde katyonik katalizör ortamında gerçekleştirilmiştir (Kaya, 2005; Kurbanova ve ark., 1996; Okudan, 1998; Ahmetli ve ark., 2006; Mirzaoğlu ve ark., 1997).

Kurbanova ve ark. (1996) tarafından yapılan bir çalışmada yüksek molekül kütlesine sahip emülsiyon PS maleik anhidritle kloroform ortamında Lewis asidi katalizörleriyle ($BF_3.O(C_2H_5)_2$, $AlCl_3$, $TiCl_4$, $ZnCl_2$, $FeCl_3$ ve $SnCl_4$) kimyasal olarak modifiye edilmiştir ve reaksiyonun ilerlemesi ise Şekil 2.1'deki gibidir (Kurbanova ve ark., 1996).



Şekil 2.1. Polistirenin maleik anhidritle modifikasyon mekanizması

Karboksil gruplarının miktarı ve kullanılan katalizörün aktivitesi arasında bir bağ kurulmuştur ve karboksil gruplarının en yüksek değere $BF_3O(C_2H_5)_2$ katalizörü kullanıldığında ulaşıldığını bulmuşlardır. PS' nin açilleme derecesinin esasen, kullanılan katalizörün tipine ve açillemede kullanılan PS' nin molekül kütlesine bağlı olduğunu bildirmişlerdir. PS' nin maleik anhidrit ile açilleme reaksiyonunda katalizörlerin (Lewis asitlerinin) etkinlikleri şöyledir; $BF_3O(C_2H_5)_2 \geq TiCl_4 > AlCl_3 > SnCl_4 > FeCl_3 > ZnCl_2$.

Mirzaoğlu ve arkadaşlarına (1997) göre, PS' nin modifikasyonu konusunda, fiziksel ve kimyasal olmak üzere iki metot düşünülebilir. Bu metotlar polistirenin basınç, sıcaklık ve havanın etkisine karşı fiziko-mekanik özelliklerini artırmak için kullanılır. Polistirenin fiziksel modifikasyonu polistirenin, polibütadien, polibütadien-stiren, poliizopren, polikloropen, polibutadien-stiren-akrilonitril kopolimerleri gibi çeşitli sentetik kauçuklar ve plastiklerle mekaniksel olarak karıştırılmasıyla yapılmaktadır. Kimyasal modifikasyonda, polistiren katyonik katalizörler ortamında polifonksiyonel modifikatörlerle modifiye edilmektedir (Mirzaoğlu ve ark., 1997).

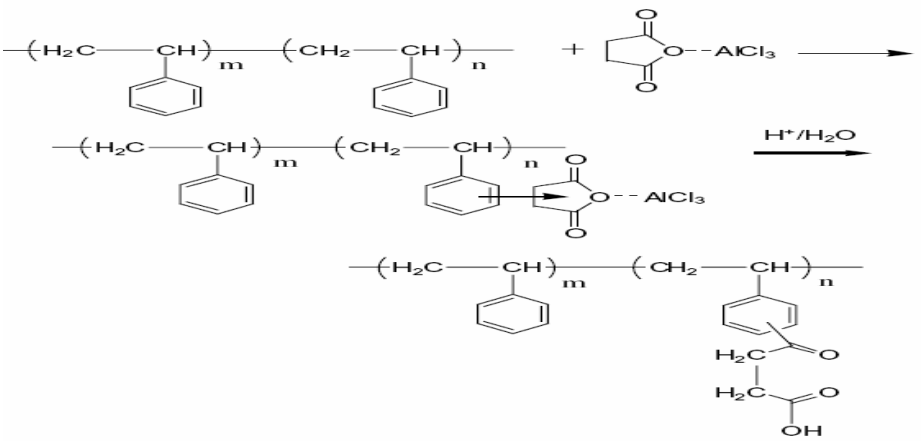
Modifiye polistirenlerin yapısı x-ışını foto-elektron spektroskopi, FTIR, ^1H NMR spektroskopi metotları ile aydınlatılmıştır (Nakao ve ark., 2002; Siqueira-Petri ve ark., 1999; Velasco ve Lopez, 1997; Li ve Li, 2005).

Nakao ve ark. (2002) tarafından yapılan çalışmada potasyum iyonu aşılanması ile yüzey modifikasyonu yapılmış, polistirenin özellikleri ve hidrofilik fraksiyonların katılma mekanizması araştırılmış ve potasyum iyonlarının derinlik dağılımı Rutherford geri dağılma spektroskopisi ile incelenmiştir. Sonuçta modifiye ürünün temas açısındaki düşmenin, X-ışını foto-elektron spektroskopi çalışmalarındaki potasyum atomik konsantrasyonu artışı ile ilgili olduğu bulunmuştur (Nakao ve ark., 2002).

Siqueira-Petri ve ark. (1999) tarafından yapılan bir çalışmada zamanın bir fonksiyonu olarak % 50 ve % 96' lık sülfürik asit ile polistiren filmlerinin sülfolanması incelenmiştir. Elde edilen verilere göre seyreltik sülfürik asitli polistiren filmlerinin sülfolama işlemi 30 saniye ile 1 saatlik reaksiyon zaman aralığı içerisinde gerçekleşmiş ve modifiye edilmiş polstirenin hidrofilikliği, reaksiyona girmemiş polistirene kıyasla oldukça artmıştır. Yüzeydeki polistirenin sülfolanması x-ışını fotoelektron spektroskopisinde incelenmiştir (Siqueira-Petri ve ark., 1999).

Sindiotaktik polistiren CS_2 içindeki susuz $AlCl_3$ varlığında Friedel-Crafts reaksiyonuyla suksinik anhidrit ile kimyasal olarak modifiye edilmiştir. Modifiye

polistirenin fenil halkalarının $–COCH_2CH_2COOH$ gruplarını içerdiği Şekil 2.2' de görülmektedir.



Şekil 2.2. Polistirenin suksinik anhidritle modifikasyon reaksiyonu

Modifiye polistirenin yapısı FT-IR ve ^1H NMR spektroskopileri ile aydınlatılmıştır. Reaksiyon koşullarının modifikasyon üzerine etkileri araştırılmıştır. Polistirene bağlanan karbonil gruplarının modifiye olmamış polistirenin termal davranışı üzerine etkileri araştırılmıştır. Sonuç olarak modifiye polistirenin kristallenme sıcaklığının, erime sıcaklığının ve kristallenme derecesinin modifikasyon derecesiyle (karbonil grubunun artması ile) arttığı, camsı geçiş sıcaklığının ise azaldığı tespit edilmiştir (Li ve Li, 2005).

PS ile ilgili yapılan çalışmalarda yüksek molekül kütleli blok polistirenler ve emülsiyon polistirenlerin asetik anhidritle kimyasal modifikasyon reaksiyonu ve ürünleri incelenmiş, elde edilen modifiye polistirenlerin aromatik halkasına bağlanan maksimum açil grubu miktarı bulunmuş ve PS' nin aromatik halkasına maksimum miktarda açil grubu ($-COCH_3$) bağlanması için en uygun deney şartı belirlenmiştir (Kaya, 2005; Özkeçeçi, 2006).

Polimer kimyasında modifikasyon reaksiyonları içinde açilleme reaksiyonları özellikle PS' den yeni plastik materyaller üretmek için çok önemlidir. Yapılan birçok çalışmada kimyasal modifikasyonla elde edilmiş modifiye PS' nin, PS' den farklı olarak yüksek fiziksel ve mekanik özelliklere, darbeye karşı dayanıklılığa, nispi uzamaya ve ayrıca termal özelliklere sahip olduğu tespit edilmiştir. Yüksek molekül kütleli emülsiyon polistirenin $AlCl_3$, $FeCl_3$, $BF_3.O(C_2H_5)_2$, $ZnCl_2$, $TiCl_4$ ve $SnCl_4$ gibi katyonik katalizörler ortamında çeşitli modifikatörlerle kimyasal modifikasyonu son 16 boyunca

(1974-1990) çeşitli şartlar altında geniş olarak çalışılmış ve polimer yapısına bağlanan fonksiyonel grupların polimerin özelliklerine etkisi araştırılmıştır (Kurbanova ve ark., 1990).

Ahmetli ve ark. (2005) $1{,}0.10^5$, $2{,}0.10^5$ve $3{,}0.10^5$ molekül kütleli blok PS' lerin $BF_3.O(C_2H_5)_2$ katyonik katalizörü ortamında asetik ve maleik anhidritle modifikasyon reaksiyonlarını ve reaksiyonların kinetiğini araştırmışlardır. Yapıya bağlanan fonksiyonel grup miktarını spektral ve kimyasal analiz yöntemleriyle belirlemişlerdir. Daha düşük molekül kütleli PS' nin aromatik halkasına bağlanan fonksiyonel grup miktarının, daha yüksek molekül kütleli PS' lerin aromatik halkasına bağlanmış fonksiyonel grup miktarından daha fazla olduğunu belirtmişlerdir (Ahmetli ve ark., 2005).

Düşük molekül kütleli polistirenler (50, 70, 100 ve 140.000) epiklorhidrin, maleik anhidrit ve asetik anhidrit ile modifiye edilmiş ve modifiye polistiren kaplamaların adhezyon ve antikorozyon dayanımlarını incelemişlerdir. Adhezyon ve antikorozyon özelliklerinin polimerin yapısına bağlanan fonksiyonel grup miktarıyla bağlantılı olduğunu belirtmişlerdir. Düşük molekül kütleli polistirenlerin kimyasal modifikasyon sonucunda agresif deniz şartlarında daha dayanıklı olduğunu, yüksek adhezyon özelliğine sahip polimer boya kaplamaların elde edilebileceğini söylemişlerdir (Ahmetli ve ark., 2006 a).

Ahmetli ve ark. (2006b) endüstriyel atık oligostirenler, maleik anhidrit ve asetik anhidrit ile $BF_3O(C_2H_5)_2$ katalizörü yardımıyla modifiye edilmiş ve elde edilen modifiye ürünlerin adhezyon, korozyona karşı dayanımı ve darbe etkisine dayanımları incelenmiştir. Modifiye edilen endüstriyel atık oligostirenlerin yapısına bağlanan fonksiyonel grupların yapısına ve miktarına bağlı olarak yüksek darbe dayanımına, adhezyon ve antikorozyon özelliklerine sahip olduğu belirlenmiştir (Ahmetli ve ark., 2006b).

Thomas ve arkadaşları (2003), TiO_2 ile doldurulan polistiren mikrokompozitlerinin mekaniksel özelliklerini incelemişlerdir. Çeşitli miktarlarda titanyum dioksit katkı maddeleriyle polistiren mikrokompozitler hazırlanarak, katkı maddelerinin doldurma işlevi, kuvvet ve bükme davranışları ile gerilme gibi davranışları araştırılmıştır. Titanyum dioksit içeren kompozitlerin gerilme modülü artmıştır. Başlangıçta gerilme kuvvetinde artış gözlenirken daha yüksek miktarlarda ise azalma olmuştur. Dolgu maddesiyle matris arasında amino silan gibi bir bağlayıcı ajan kullanılmasıyla yapışma özelliği geliştirilmiştir. Aynı zamanda bağlayıcı ajanların

kullanılması kompozitlerin mekanik özelliklerini arttırmıştır. Katkı maddeleri/matris etkileşimini ve katkı maddelerinin dağılımını anlayabilmek için, SEM' de yüzey kırılması incelenmiştir. Sonuç olarak, deneysel ve teoriksel sonuçların benzerlik gösterdiği tespit edilmiştir (Selvin ve ark., 2004).

Literatür araştırmalarından görüldüğü gibi polistirenin alifatik ve aromatik halkasında gerçekleşen kimyasal modifikasyon sonucu elde edilen modifiye polistirenlerin fenil halkasında yapılan kimyasal modifikasyon reaksiyonları büyük öneme sahiptir. Kimyasal modifikasyon reaksiyonlarının çoğunlukla PS' nin aromatik halkasında meydana geldiği görülmektedir. Öyle ki, polistirenin aromatik halkasına çeşitli polifonksiyonel grupların bağlanması, polistirenin bazı eksik özelliklerinin iyileştirilmesine ve polimerin yeni özellikler kazanmasına sebep olmaktadır. PS yüksek dielektrik ve yüksek sertliğe sahiptir fakat sıcaklığa ve darbeye karşı dayanımı az olup metallere karşı da adhezyon özelliği yoktur. Bu nedenle PS' nin aromatik halkasına bazı fonksiyonel grupları bağlamakla yüksek fiziko-mekanik, termal, adhezyon vb. özelliklere sahip polimerler sentezlenebilir.

2.1.2. Polistirenin ultrasonik karakterizasyonu ile ilgili çalışmalar

Malzemelerde ultrasonik boyuna ve enine hızlar ve atenuasyonun ölçümü malzemelerin esneklik özellikleri ile doğrudan ilişkilidir (Mason, 1965; Baldev ve ark., 2004). Malzemelerdeki yapısal değişimler yoğunluk, hız ve dolayısıyla esneklik modüllerinden kaynaklanmaktadır (Vary, 1980). Porozite, eskime malzemenin dayanıklılığı gibi olgular ultrasonik hızlardaki değişimler aracılığıyla açıklanabilir. Benzer şekilde tane büyüklüğü, boşluklar vb. de attenuasyon ölçümleri ile açıklanabilir (Vary, 1980, Baldev ve ark., 2004). Bu nedenle ultasonik hızlar, attenuasyon ve esneklik katsayılarının ölçümü malzemelerin ultrasonik tahribatsız kalite kontrolleri için çok önemli faktörlerdir (Stefan ve Zdenko, 1996; Krautkramer ve Krautkramer, 1963).

Gelişmiş mekanik özelliklere sahip hassas kauçukların üretilmesi için değişik tipte kauçuklar sık sık karıştırılır. Bu alanda birçok deneysel ve teorik çalışmalar rapor edilmiş, son zamanlarda solüsyon ve katı polimer karışımlarda boyuna ultrasonik dalga hızları ve onların attenuasyonunu araştıran kapsamlı çalışmalar ele alınmıştır (Hourston ve Hughes, 1977; Hourston ve Hughes, 1978; Sigh ve ark., 1981; Sigh ve Singh, 1983a; Sigh ve Singh, 1983b; Sigh ve Singh, 1984; Bagchi ve ark., 1986; Arman ve ark., 1986; Show ve Singh, 1987; Seshadri ve ark., 1987; Afifi ve ark., 2003).

Polimerik karışımların uyumluluğunun çalışıldığı çeşitli teknikler vardır (Krause, 1978). Basit ultrasonik hız ölçümü, vizkoz ve katı polimer karışımlarının uyumluluğu ile ilgili değişik bakış açıları göstermektedir. Higazy ve ark. (2000), cam fiber ile doldurulmuş PS/SBR ve talk ile doldurulmuş PS/SBR gibi katı karışımların uyumluluğunu ultrasonik puls-eko tekniği ile çalışmışlardır. Çalışmada ölçümler oda sıcaklığında (298 ^{0}K) ve 3 MHz frekansında yapılmıştır. Hazırlanan karışımların yoğunluğu Arşimet terazisi yardımıyla ölçüldükten sonra ölçülen boyuna ve enine ultrasonik dalgaların ultrasonik hızları yardımıyla esneklik modüleri belirlenmiştir. Cam fiber ve talk ile doldurulmuş PS/SBR karışım sistemlerinin uyumluluğu esneklik modüllerinin değişimlerine göre yorumlanmıştır. Yapılan çalışmanın sonuçlarına göre esneklik modüllerindeki artış, cam fiber ve talk katkısının PS ve SBR arasındaki uyumun derecesini arttırdığını göstermiştir (Higazy ve ark., 2000).

Somanathan ve arkadaşları (2001) tarafından yapılan çalışmada saf PS ve Poli-n-Bütil Metakrilat (PnBMA) değişik oranlarda karıştırılarak iki polimer arasındaki ilişkiler vizkometri, ultrasonik ve mekanik yöntemlerle araştırılmıştır. Çeşitli oranlardaki PS:PnBMA karşımının uyumluluğu ultrasonik olarak incelenmiş ve bileşim oranı ile ultrases hızı, absorpsiyon ve yansıma arasındaki ilişkiye göre karışım sistemi, uyumlu, yarı uyumlu ve uyumsuz olarak belirlenmiştir (Somanathan ve ark., 2001).

Afifi ve arkadaşları (2002) tarafından yapılan çalışmada, PMMA, PS ve PVC gibi termoplastiklerin esneklik katsayıları, boyuna, enine ultrases dalga hızı ve yoğunluk değerleri yardımıyla belirlenmiştir. Bunun için daldırma sıvısı su olan ultrasonik sing around yöntemi kullanılmıştır. Çalışmada, su içinden malzemeye gönderilen boyuna ses dalgasının kritik açıdan küçük olması durumunda hem boyuna hem de enine ses dalgalarının malzemede yayılabileceği, ancak kritik açıdan büyük açı ile malzemeye ses dalgalarının gönderilmesi durumunda ise malzemede sadece enine dalgaların yayılabileceği belirtilmiştir. Bu olgudan yola çıkarak malzemedeki hem boyuna hemde enine ultrases dalga hızlarının birbirinden bağımsız olarak ölçülebileceği belirtilmiştir. Elde edilen deneysel verilerden PMMA, PS ve PVC' ye ait Young Modülü, Enine modül, Poisson oranı ve Bulk modülü değerleri hesaplanmıştır (Afifi ve ark., 2002).

Toti ve Aminabhavi (2001), tarafından yapılan çalışmada 25 ^{0}C deki 1,4-dioksan ve tetrahidrofuran ikili karışımında polistiren solüsyonların yoğunluk, kırıcılık indeksi ve ultrasonik hız sonuçları kullanılarak Rao sabiti, gevşeme kuvveti, boşluk doldurma faktörü, Van der Waals sabitleri, serbest hacim ve molar kırıcılık değerleri

hesaplanmıştır. Bu sonuçlar 1,4-dioksan ve tetrahidrofuran karışımlarındaki polistirenin termodinamik etkileşimlerinin anlaşılması için tartışılmıştır (Toti ve Aminabhavi,2001).

2.2. Epoksi Reçine ile İlgili Çalışmalar

2.2.1. Epoksi reçinesinin modifikasyonu ile ilgili çalışmalar

Epoksi reçineler genellikle üstün performanslı fakat daha yüksek maliyetteki reçine sistemlerinin kullanımını öngören kritik uygulamalarda tercih edilmektedir. Epoksi reçineler denizcilik, otomotiv, elektrik/elektronik ve diğer çesitli sektörlerdeki kompozit parçaların üretiminde performans faktörünün maliyet faktöründen daha önemli olduğu uygulamalarda kullanılmaktadır. Birçok uygulamada doğrudan reçine ile sertleştirici maddenin kullanımı hemen kullanılabilecek uygun ürün verir. Diğer uygulamalar için esas formülasyonda işleme, mekanik ve sertleşme özelliklerini geliştirmek için bazı modifikasyonlar yapmak gerekebilir. Bu modifikasyonlar seyrelticiler, pigmentler, dolgu ve katkı maddeleri, alev geciktiriciler ve hızlandırıcıların eklenmesiyle elde edilir (Lubin, 1969; Goodman, 1998).

Kısa elyaflarla mukavemetlendirilmiş polimer esaslı kompozit malzemeler otomotiv, denizcilik, taşımacılık ve inşaat sektörü ile askeri alanda metallere oranla çok daha hafif olmaları, korozyona uğramamaları nedeni ile oldukça hızlı bir şekilde uygulama alanı bulmaktadır. Özellikle, roket ve füze sistemlerinde yüksek ısıya maruz kalan bölgelerde kısa elyaf termoset kompozitler yaygın olarak kullanılmaktadır.

Demircioğlu (2006) tarafından yapılan çalışmada, kırpılmış cam elyaflardan oluşan takviye sisteminin epoksi matrisle birleştirilmesiyle rastgele cam elyaf takviyeli epoksi kompozit malzemeler üretilerek; değişen cam elyaf boyunun ve oranının kompozit yapı üzerine etkileri incelenmiştir. Bu amaçla, diglisidil eter bisfenol-A (DGEBA) türü epoksi reçine (NPEL 128) ve sikloalifatik amin türü sertletirici (ACR H-3895) matris sistemi olarak, kırpılmış E camı elyafı (BMC1) ise takviye sistemi olarak kullanılmıştır. Toplam matris sisteminin ağırlıkça % 5, % 10, % 15 ve % 20’ si olacak şekilde, 3 mm, 4,5 mm ve 6 mm kırpılma boylarında E camı elyaflarının her biri matris sistemine eklenerek, sıkıştırmalı kalıplama yöntemiyle kompozit malzemeler hazırlanmıştır. Hazırlanan kompozit malzemelerin karakterizasyonu aşamasında; mekanik özelliklerin belirlenmesi için çekme ve üç noktadan eğilme testleri yapılmış, termal özelliklerin eldesi için ise diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) ve

termogravimetrik analiz (TGA) kullanılmıştır. Kırılma yüzeylerinin karakterizasyonunda ise taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır. Yapılan mekanik karakterizasyon çalışmaları sonunda, artan elyaf boyu ve oranının kompozit malzemelerin çekme ve eğilme, dayanımlarını ve modüllerini arttırıcı yönde etkilediği görülmüştür. Eğilme ve çekme uzaması değerlerinin ise artan elyaf oranı ile azaldığı, artan elyaf boyu ile arttığı görülmüştür (Demircioğlu, 2006).

Arıkan ve arkadaşları (2002) yaptıkları çalışma ile, hidroksi termine polibutadien kauçuk (HTPB) modifikasyonuyla kısa cam elyaf takviyeli DGEBA epoksi reçinenin mekanik ve termal davranışları geliştirilmeye çalışmışlardır. Ağırlıkça % 10, 20, ve 30 cam elyaf takviyeli kompozit numuneleri, silan kaplamalı ve kaplamasız elyaflarla ve epoksi karışımının HTPB modifikasyonuyla üretmişlerdir. Tüm numunelerin kırılma yüzeyleri ve termal özellikleri taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve dinamik mekanik analizleyici (DMA) kullanılarak belirlenmiştir. Artan cam elyaf oranlarıyla, numunelerin çekme ve darbe dayanımlarının arttığı belirlenmiştir (Arıkan ve ark., 2002).

Bağcı (2006) tarafından yapılan çalışmada, matris sistemi olarak epoksi reçine, takviye sistemi olarak silika ve modifiye edici olarak polieter poliol kullanılmıştır. Çalışma sırasında, bisfenol-A yapısındaki reçine, toplam matrisin ağırlıkça yüzde 1, 3, 5, 7 oranında silika ile karıştırılmıştır. Ayrıca bu karışımların her biri ağırlıkça yüzde 1, 3, 5 oranında polieter poliol eklenerek nanokompozit malzemeler hazırlanmıştır. Hazırlanan malzemelerin mekanik özellikleri, termal özellikleri analiz edilmiştir. Malzemelerin kırılma yüzeyleri SEM ile incelenmiştir. Eğilme dayanımı ve eğilme uzamasının artan silika oranıyla azaldığı, eğilme modülü değerinin ise silika oranının artmasıyla arttığı belirtilmiştir. Çekme dayanımı ve çekme uzamasının artan silika oranıyla azaldığı çekme modül değerinin ise silika oranı arttıkça küçük oranlarda azaldığı belirtilmiştir (Bağcı, 2006).

Kaushik ve arkadaşları (2006) yaptıkları çalışmada, epoksi-kısa cam elyaf kompozitleri, Araldite (CY-230) ve sertleştirici (HY-951) ikili paket sisteminin kısa cam elyaflar ile direkt olarak birleştirilmesi ile hazırlanmıştır. Kısa cam elyaf oranını toplam matriksin ağırlıkça % 2' si ile %10' u arasında değiştirmişlerdir. Kompozitlerin yapısal karakterizasyonu, taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak yapılmıştır. Mekanik karakterizasyonları ise çekme ve bükme testleri kullanılarak yapılmış ve çeşitli kimyasallara dayanımları incelenmiştir. Epoksi-cam elyaf kompozitlerin gelişmiş çekme ve bükme özellikleri gösterdiği görülmüştür. Ayrıca artan elyaf oranlarıyla

mekanik özelliklerin daha da geliştiği görülmüştür. Kompozitlerin, kimyasalların çoğunda kararlı oldukları ancak yoğunlaştırılmış sülfürik asit, nitrik asit ve piridin içinde tamamen yok oldukları görülmüştür (Kaushik ve ark., 2006).

Lee ve arkadaşları (2005) yaptıkları çalışmada, kırpılmış elyaf uzunluğunun ipek elyaf katkılı polybütilensüksinat (PBS) biokompozitlerinin mekanik ve termal özelliklerine etkisini, çekme ve bükme özelliklerine, termal kararlılık, termal uzama ve dinamik mekanik özelliklerine göre incelenmişlerdir. 3,2 mm, 6,4 mm, 12,7 mm ve 25,4 mm' lik elyaf uzunlukları ile çalışmışlardır. Sonuçlar, kırpılmış ipek elyafın sistemdeki matrisin mekanik özelliklerini geliştirmede etkin rol sahibi olduğunu göstermiştir. Ayrıca PBS reçinesinin termal özelliklerinin de kırpılmış ipek fiberin kompozit matriksine eklenmesi ile arttığı görülmüştür (Lee ve ark., 2005).

Fu ve arkadaşları (2000) yaptıkları çalışmada, kısa cam elyaf ve kısa karbon elyafla takviyelendirilmiş polipropilen kompozitler, ekstrüzyon bileşimi ve enjeksiyon kalıplama tekniği ile hazırlanan bu kompozitlerin çekme özelliklerini incelemişlerdir. Her iki çeşit kompozit için de elyaf verimlilik faktörlerinin artan hacim oranıyla azaldığı ve daha gevrek elyaf olan karbon elyafın cam elyafa göre daha düşük verimlilik oranı gösterdiği bulunmuştur (Fu ve ark., 2000).

Thomason ve Vlug (1997) cam elyaf takviyeli propilene elyaf boyu ve konsantrasyonunun etkilerini inceledikleri çalışmada, kompozit darbe dayanımının artan elyaf oranıyla arttığı görülmüştür. Charpy darbe, çekme darbe ve yüksek hız darbe özellikleri elyaf boyunun 6 mm' nin üstüne çıkmasıyla artmıştır. Charpy darbe dayanımının -50°C ile 40°C arasındaki sıcaklık aralığında hemen hemen bagımsız olması şaşırtıcı bir sonuç olarak belirtilmiştir. Kompozit darbe dayanımının çekme dayanımıyla direk ilişkili olduğu gösterilmiştir (Thomason ve Vlug, 1997).

Deng ve arkadaşları (1999) yaptıkları çalışmalarda, elyaf kesiti en/boy oranının cam elyaf/epoksi kompozitlerin mekanik özelliklerine etkilerini incelemiştir. Çalışmalarının ilk kısmında DGEBA tipi epoksi matrisli büyük kesit en/boy oranına sahip cam elyaflarla takviyeli kompozit sistemleri filament sarma prosesi ardından da otoklav kullanarak üretilmiştir. Tercih ettikleri elyaf yönlenmesi basınç etkisiyle elyafların kompozit içinde kesitlerinin uzun ekseni boyunca yayılmalarıdır. Yuvarlak, oval ve yer fıstığı biçiminde kesit sekline sahip cam elyafları kullanılan çalışmada boyuna çekme ve eğme testlerinde diğer elyaflarla hazırlanan numunelerin kopma uzamalarının geleneksel yuvarlak kesitli elyafla hazırlananlara göre daha yüksek olduğu, ancak üç kompozit sistemi için çekme dayanımı ve modül değerlerinin yaklaşık

aynı olduğu belirlenmiştir. Enine çekme dayanımları da yaklaşık olarak aynı bulunmuştur. Ayrıca, yüksek kesit en/boy oranına sahip elyaflarla takviyeli kompozitlerin yüksek kopma uzaması ve düşük enine çekme modülüne sahip oldukları görülmüştür (Deng ve ark., 1999).

Iba ve arkadaşlarının (2002) yaptığı çalışmada, tek yönlü yönlenmiş sürekli cam elyaf takviyeli epoksi matrisli kompozitler, özel olarak hazırlanmış 18, 37 ve 50 μm çaplı cam elyaflar kullanılarak üretilmiştir. Elyaf hacim oranı 0,25 - 0,45 aralığındadır. Kompozitlerin ışık geçirgenliği ve mekanik özellikleri değerlendirilmiştir. Optik saydam kompozitler başarıyla üretilmiş ve epoksi matrisin 600 - 1100 nm dalga boyu aralığında % 60 - 85 ışık geçirgenliği elde edilmiştir. Kompozitin ışık geçirgenliği artan elyaf hacim oranıyla ve azalan elyaf çapıyla azalmıştır. Kompozitin boyuna young modülü ve çekme dayanımı, ışık geçirgenliğinin tersi eğilim göstererek artan elyaf hacim oranıyla artmıştır. Kompozitlerin ışık geçirgenliği ve mekanik performansları arasındaki olası bileşim aralığı ispat edilmiştir (Iba ve arkadaşları, 2002).

2.2.2. Epoksi reçinesinin ultrasonik karakterizasyonu ile ilgili çalışmalar

Ultrases son zamanlarda kimyada önemli bir araç haline gelmiştir (Suslick ve ark., 1999; Sakai ve ark., 2002; Avivi, 2003). Ultrasesin polimerizasyon, polimerlerin ayrıştırılması ve polimer yüzeylerin modifikasyonu gibi çeşit çeşit ve gelecek için umut verici uygulamaları polimer kimyasında kullanılmıştır (Fenner, 1987; Mayer ve ark., 1997; Eckert ve ark., 2002). Polimerizasyonda ultrasesten yararlanmak, polimerizasyon derecesini önemli bir şekilde hızlandırmakta ve ultrasesli polimerizasyon ile elde edilen polimerler normal polimerizasyon ile elde edilen polimerlere göre daha büyük molekül ağırlığına sahiptir (Hiorns ve ark., 2002). Ultrases aynı zamanda polimer ayrıştırılmasında da kullanılmıştır (Kim ve Lee, 2002). Polimer ve polimer yüzeylerinin modifikasyonunda da ultrasesten yararlanılmıştır (Sakai ve ark., 2002).

Termoset reçinelerin ultrasonik kürleştirmeleri ile ilgili modern araştırma çalışmalarının büyük kısmı Alig (1988, 1989, 1994), Challis (2000, 2003), Frigione (2000), Lionetto (2004a, 2004b), Maffezoli (1999), Döring (2002, 2003), Mc Hugh (2003, 2006) ve Stark (1997, 1999) gibi araştırmacılar tarafından yapılmıştır.

Wróbel ve Pawlak (2006) değişik oranlarda cam fiber/epoksi karışımı ile kompozitler sentezleyerek bunları ultrasonik puls-eko tekniği ile incelemişlerdir. Yapılan çalışmada cam fiber içeriğinin bir fonksiyonu olarak numunelerdeki ultrasonik

dalga hızlarının değişimi incelenmiştir. Puls-eko tekniği sonuçlarından elde edilen verilere göre cam fiber katkı oranlarının değişimiyle ultrasonik hızlarda da değişimler görülmüştür (Wróbel ve Pawlak, 2006).

Zheng ve arkadaşları (1995) ultrasonik attenuasyon cihazı ile, anhidrit ile iyileştirilmiş epoksi reçine/polietilenoksit (EP/PEO) karışımlarının ultrasonik hız ve attenuasyonunu puls-eko metoduna dayalı olarak ölçülmüşlerdir. Sıcaklık artışı ile karışımların ses hızının azaldığı fakat attenuasyon katsayısının arttığı ve bir pik değerine ulaştığı bulunmuştur. Ftalik anhidrit (FA) ile iyileştirilmiş saf DGEBA' nın mükemmel çapraz bağlı ağ yapısından daha büyük hız ve daha küçük attenuasyon katsayısı (α) elde edilebileceği belirtilmiştir. DGEBA/PEO karışım sistemi için PEO' nun konsantrasyonunun fonsiyonu olarak ultrasonik hız azalırken attenuasyon katsayısı (α) artmıştır (Zheng ve ark., 1995).

Alig ve arkadaşları (1988) tarafından modifiye edilmiş epoksi reçinelerin kürleri ultrasonik ölçümlerle incelenmiştir. Alig ve arkadaşları (1988) akustik parametrelerin zamana bağlılığından dinamik camsı geçiş, jelleşme noktası, değişik vulkanizasyon basamakları ve çapraz bağ reaksiyonlarının sonunun açıklığa kavuşturulmasının mümkün olduğunu belirtmişlerdir. Yapılan çalışmada, epoksi sistemlerin kimyasal kompozisyonu sistematik bir biçimde değiştirilmiş ve onun ultrasonik özellikler üzerine etkisi araştırılmıştır. Sonuçlar ultrasonik metodların vulkinizasyon reaksiyonlarının ve yüksek derecede çapraz bağlı yapıların karakterizasyonları için yararlı bir araç olarak hizmet ettiklerini göstermiştir (Alig ve ark., 1988).

Wróbel ve Pawlak (2007) yaptıkları diğer bir çalışmada da değişik oranlarda cam fiberi epoksi ve poliester matrisine karıştırarak cam fiber/epoksi ve cam fiber/poliester kompozitler sentezlemişlerdir. Sentezledikleri bu kompozitlerdeki ultrasonik ses hızlarının değişimini cam fiber katkısının bir fonksiyonu olarak hem cam fiber/epoksi hem de cam fiber/ poliester kompozitler için incelemişlerdir. Çalışmadan elde edilen sonuçlara göre kompozit bileşimindeki cam fiber katkısı arttıkça her iki çeşit kompozittede ultrasonik hız değerlerinde artış olduğu tespit edilmiştir (Wróbel ve Pawlak, 2007).

Challis ve arkadaşları (2009) daha kompleks yönlenmiş dalga çeşitlerinin tabakalar halindeki yapılarda yayılması ile ilgili daha güvenilir verilerin elde edilmesi ve tahribatsız muayene işlemlerinin daha iyi anlaşılması için epoksi materyallerde yayılabilen ultrasonik dalga modellemeleri üzerine çalışmışlardır (Challis ve ark., 2009).

Dong ve arkadaşları (2009) yaptıkları çalışmada, aramid/epoksi kompozitlerinin arayüzeyleri arasındaki çekim kalitesinin malzemelerin mekanik performansları üzerinde etkili olduğunu ve bu nedenle ultrases tabanlı bir arayüz işlemine gereksinim olduğunu belirtmişlerdir. Bunun için bir ultrasonik transduser geliştirilmiş ve birçok işlemsel süreçte denemişlerdir. Sonradan, ultrasesli ve ultrasessiz işlemlerin polimerik malzemelerin mekanik performansları üzerindeki etkisini araştırma üzerine yapılan deneyler, ultrasonik işlemin ultrasessiz işleme göre mekanik performansı %10 oranında daha çok iyileştirdiğini göstermiştir (Dong ve ark., 2009).

Perepechko ve arkadaşları (1996) yaptıkları çalışmada epoksi reçinelerinin boyuna ve enine elastik dalga hızlarını 4.2 ^{0}K' den 293 ^{0}K' e kadarki sıcaklık aralığında ölçmüşlerdir. Bu verileri E′ ve G′ esneklik modüllerini ölçmekte kullanmışlardır. ED-20 reçinesinin E′ ve G′ değerlerini düşük frekansta direk ölçmüşler. Düşük frekansta ölçülen elastik dalga hızları V_b ve V_e değerleri ultrasonik olarak ölçülen değerlerle karşılaştırılmıştır (Perepechko ve ark., 1996).

McHugh (2008), yaptığı çalışmada, epoksi reçinelerin karakterizasyonu için yüksek frekanslı dinamik mekanik analiz (DMA) tekniği olarak ultrasesi ve geleneksel DMA tekniğini kullanmıştır. Geleneksel DMA ile malzemelerin 0,1 ve 50 Hz aralığındaki frekansta boyuna ve enine yüklemelere (kuvvete maruz bırakma) maruz bırakılarak bu malzemelerin termomekaniksel davranışları incelenmiştir. Ayrıca polimerlerin esneklik modüllerini ultrasonik dalga hızları yardımıyla ölçmüştür. Daha sonra her iki yöntemle ölçülen değerleri karşılaştırmıştır. Çalışmada elde edilen sonuçlara göre ultrasonik hız ölçümleriyle elde edilen verilerin daha hassas ve güvenilir olduğu belirtilmiştir (McHugh, 2008).

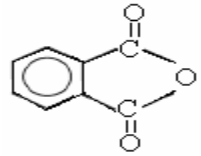
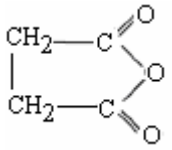
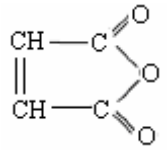
3. MATERYAL VE METOT

3.1. Kullanılan Kimyasal Maddeler

Yapılan çalışmada; molekül ağırlığı $5{,}0.10^5$, $3{,}5.10^5$ ve $2{,}3.10^5$ g/mol olan polistiren ile ftalik, süksinik ve maleik anhidritler kullanılmıştır. Deneylerde; katyonik katalizör olarak $BF_3O(C_2H_5)_2$, çözücü olarak kloroform, çöktürücü olarak ise metanol kullanılmıştır. Epoksi reçine olarak Konuray Kimya San. ve Tic. Ltd. Sti.' den temin edilen, bisfenol-A ve epiklorhidrinden üretilen D.E.R 321 Epoksi reçinesi**,** sertleştirici olarak sikloalifatik poliamin olan Polypox H 043 kullanılmıştır.

3.1.1. Katyonik katalizör ve anhidritler

Çizelge 3.1. Kullanılan kimyasal maddelerin bazı özellikleri

	Hammaddeler	M_n, g/mol	Erime Noktası, ^oC	Kaynama Noktası, ^oC
1	 Ftalik anhidrit	148	131	285
2	 Suksinik anhidrit	100	116-119	261
3	 Maleik anhidrit	98	51–53	202
4	$BF_3O(C_2H_5)_2$	142	-60	126

3.1.2. Ticari D.E.R 321 epoksi reçinesi (DGEBA)

D.E.R.-321 aromatik seyreltici ile modifiye edilmiş bisfenol-A ve epiklorohidrinin reaksiyon ürünü olan epoksi reçinedir. D.E.R.-321 epoksi reçinesi (DGEBA) sıcak veya soğuk olarak poliamin, poliamid veya onların türevleri ile

kürleştirilebilir. Anhidrit türü kürleştirici kullanıldığında ise yüksek sıcaklık gerekmektedir. Epoksi reçine kompozit yapımında, koruyucu kaplamalar eldesinde, yapıştırıcı olarak kullanılabilir. D.E.R.-321 epoksi reçinesinin özellikleri Çizelge 3.2' de verilmiştir.

Çizelge 3.2. D.E.R.-321 epoksi reçinesinin karakteristik özellikleri

Özellikler	**Değer**
Epoksi eşdeğer kütlesi (g/eq)	180-188
Epoksi %'si	22,9-23,9
Epoksi grup içeriği (mmol/kg)	5320-5560
Yoğunluk (g/mL)	1,14 (25ºC için)
Parlama noktası (ºC)	121

3.1.3. ER sertleştiricisi

Polypox H 043 sikloalifatik poliamin olup epoksi reçinelerde sertleştirici olarak kullanılmaktadır. Polypox H 043 ile kürleştirilmiş epoksi kaplamalar yüksek kimyasal ve mekanik özelliklere, UV ışınlarına ve suya karşı dirence sahip olmaktadırlar.

3.2. Kullanılan Alet ve Cihazlar

5800PR Ultrases Cihazı (Panametrics Olympus NDT, ABD)
GW Instek GDS-2062 model dijital osiloskop (Tayvan)
5 MHz Boyuna prob (V109- Panametrics Olympus NDT, ABD)
3,5 MHz Boyuna prob (V183- Panametrics Olympus NDT, ABD)
5 MHz Enine prob (V155- Panametrics Olympus NDT, ABD)
2,25 MHz Enine prob (V154- Panametrics Olympus NDT, ABD)
FT-IR Spektrofotometresi (Perkin Elmer 1605)
Mikrometre (Somet, Çekoslovakya)
Çekme-Basma Tayin Cihazı (Mares, Türkiye)
Elektronik Terazi (Radwag AS220/C/2, Polonya)
Yoğunluk kiti (Radwag 220, Polonya)
Vakumlu etüv (Nüve EV 018),

Etüv (Nüve FN 500)
Isıtıcılı manyetik karıştırıcı,
Sıcaklık kontrollü su banyosu,
Çalkalayıcı,
Enine dalgalar için kuplaj sıvısı (SWC, Olympus NDT, ABD)
Boyuna dalgalar için kuplaj sıvısı (BQ, Olympus NDT, ABD)
Deneylerde üç boyunlu balon, geri soğutucu, büret, balon joje, erlen, beher, huni, termometre, baget, pipet, petri kabı, havan, mezür, damlalık vb. gerekli malzemeler kullanılmıştır.

3.3. Sentez ve Deneyler

Araştırma kapsamında yapılan bütün sentez ve modifikasyon işlemleri S.Ü. Mühendislik Mimarlık Fakültesi Kimya mühendisliği Polimer Araştırmaları laboratuarında yapılmıştır. Kullanılan kimyasallar Merck (Darmstadt, Germany) firmasından alınmıştır.

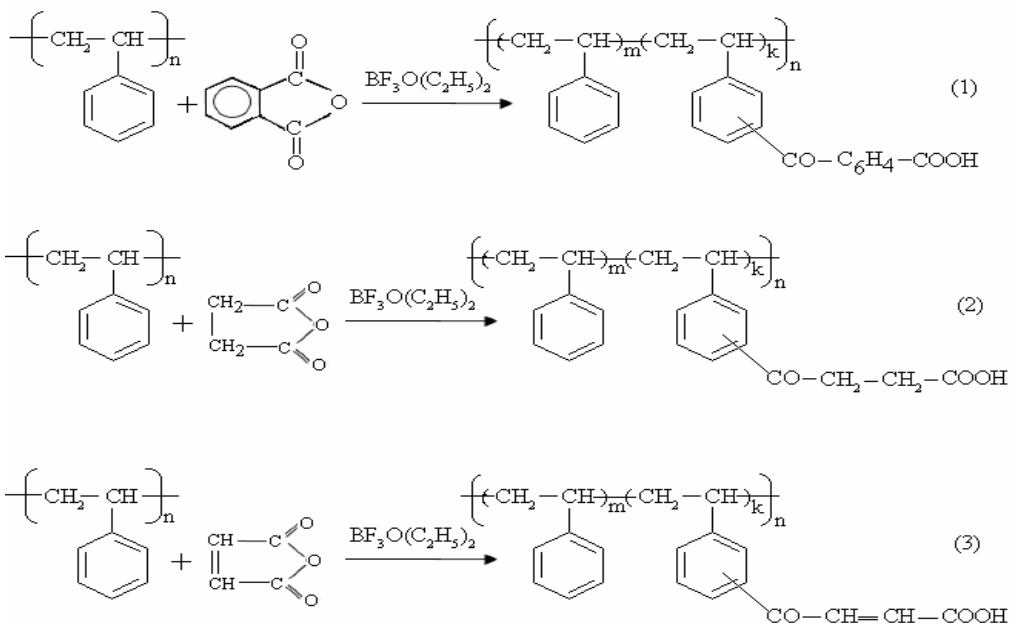
3.3.1. Modifiye polistirenlerin sentezi

500 ml' lik bir balona 39 g $5{,}0.10^5$ molekül ağırlıklı polistiren ilave edilerek laboratuar sıcaklığında 200 ml kloroformda ($CHCl_3$) sürekli mağnetik karıştırıcı ile karıştırılarak çözüldü. Daha sonra polistirenin kütlece % 20' si kadar, ezilerek toz hale getirilmiş süksinik anhidrit ortama eklendi. Karışım tamamen çözündükten sonra anhidrite göre 1/1 mol oranında (10 ml $BF_3O(C_2H_5)_2$ katalizörü balon içerisindeki karışım içerisine yavaş yavaş ve damla damla ilave edilerek karıştırmaya 25 ^oC' de 3 saat kadar devam edildi. 2 saat sonra balon içindeki karışım bir behere alındı ve oluşan modifiye polistiren (MPS) metanol (500 ml) ile çöktürüldü. Çöktürülen MPS laboratuar ortamında kurutulduktan sonra vakumlu etüvde de 60 ^oC' de 4–5 saat daha bekletilerek iyice kuruması sağlandı. Böylece $5{,}0.10^5$ molekül ağırlıklı polistirenin süksinik anhidritle modifiye edilmesi sonucu SAI sentezlenmiş oldu. Bu işlem maleik anhidrit ve ftalik anhidritle tekrarlanarak maleik anhidritle modifiye edilmiş polistiren (MAI) ve ftalik anhidritle modifiye edilmiş polistiren (FAI) sentezlendi.

Yukarıda yapılan işlemlerin aynısı $3{,}5.10^5$ molekül ağırlıklı polistiren için de tekrarlanarak $3{,}5.10^5$ molekül ağırlıklı polistirenin süksinik anhidritle modifiye edilmesi

sonucu SAII, maleik anhidritle modifiye edilmesi sonucu MAII ve ftalik anhidrit ile modifiye edilmesi sonucu FAII sentezlendi.

Değişik molekül kütleli polistirenlerin ftalik (FA), süksinik (SA) ve maleik (MA) gibi anhidritlerle $BF_3O(C_2H_5)_2$ katalizörlüğünde kimyasal modifikasyonundan sentezlenen modifiye polistirenlerin yapısı Şekil 3.1' deki gibi gösterilebilir.



Şekil 3.1. Polistirenin değişik anhidritlerle (1: FA, 2: SA, 3: MA) reaksiyon mekanizmaları (Deveci, 2009)

3.3.2. Polistiren kompozitlerin hazırlanması

200 ml kloroform içeren 500 ml' lik balona $2{,}3.10^5$ molekül ağırlıklı polistirenden 65 g ilave edildi. Daha sonra balona 100 ml daha kloroform ilave edilerek laboratuar sıcaklığında karışım sürekli magnetik karıştırıcı ile karıştırıldı ve polistirenin tamamen çözünmesi sağlandı. Çözünme tamamlandıktan sonra polistirenin kütlece % 10 (6,5 g)' u kadar, ezilerek toz hale getirilmiş SAI ortama eklendi. SAI' in ilavesinden sonra karıştırmaya 25 ^oC' de 2 saat kadar devam edildi. 2 saat sonra balon içindeki karışım bir behere alınarak oluşan kompozit metanol (500 ml) ile çöktürüldü. Çöktürülen kompozitlerin önce laboratuar ortamında, daha sonra vakumlu etüvde 60 ^oC' de 5–6 saat daha bekletilerek iyice kuruması sağlandı. Böylece $2{,}3.10^5$ molekül ağırlıklı polistiren (PS_{230})' e kütlece % 10 oranında SAI' in eklenmesi sonucu oluşan kompozit hazırlanmış oldu. Bu işlem PS_{230}' a kütlece % 20 ve % 30 oranlarında SAI' in eklenmesi ile tekrarlanarak diğer PS_{230}/SAI kompozitleri elde edildi. Bu yapılan

işlemlerin aynısı PS_{230}'a FAI ve MAI ilaveleriyle tekrarlanarak, PS_{230}/FAI ve PS_{230}/MAI kompozitleri elde edilmiş oldu.

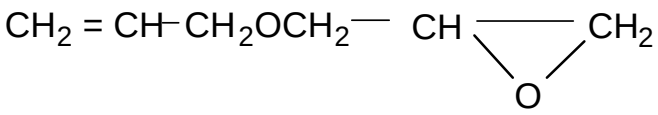
Yukarıda yapılan işlemin aynısı PS_{230}' a SAII, MAII ve FAII ilaveleriyle tekrarlanarak PS_{230}/SAII kompozitleri, PS_{230}/MAII ve PS_{230}/FAII kompozitleri elde edilmiştir.

Sentezlenen bütün PS kompozitler sanayide 180-200 ^{0}C de eritilerek basınçla ASTMD 638 standartlarındaki çelik kalıba dökülerek kalıplanmışlardır.

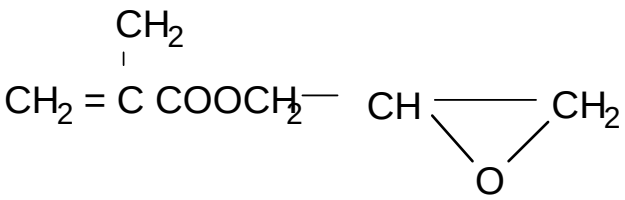
3.3.3. Epoksi reçinesi kompozitlerinin (KDGEBA) hazırlanması

Allilglisiteter (AGE) (Şekil 3.2) ve 2,3-epoksipropilmetakrilat (EPM) (Şekil 3.3), modifikatör olarak ticari epoksi reçinede (DGEBA) ayrı ayrı kullanılmış, bu bileşiklerin epoksi reçinenin fiziko-mekanik özelliklerine etkisi incelenmiştir. Sertleştirici olarak sikloalifatik poliamin (ticari ismi Polypox H 043) kullanılmıştır.

Epoksi reçinesi kompozitlerinin sentezi için öncelikle yedi adet beher sırası ile numaralandırıldı. Bütün beherlere 20' şer gram epoksi reçine konuldu. 2., 3. ve 4. beherlere ise sırasıyla içindeki epoksi reçinesinin % 10, % 20 ve % 30'u kadar AGE konuldu. 5., 6. ve 7. beherlere ise sırasıyla içindeki epoksi reçinesinin % 10, % 20 ve % 30'u kadar EPM konuldu. Sonra bütün beherlere içindeki karışımın kütlesinin % 25' i kadar sertleştirici konularak iyice karışmaları sağlandı. Kompozitlerin hazırlanmasında kullanılan oranlar Çizelge 3.3' de verilmiştir.



Şekil 3.2. Allilgisiteter modifikatörü



Şekil 3.3. 2,3-Epoksipropilmetakrilat modifikatörü

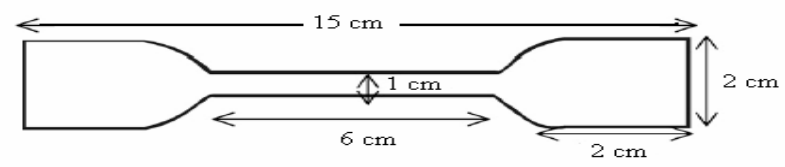
Çizelge 3.3. DGEBA Kompozitlerinin hazırlanmasında kullanılan oranlar

Bileşenler	Bileşim oranı	DGEBA, g	Modifikatör, %	Sertleştirici, %
DGEBA:AGE (veya EPM)	100:0	20	-	25
DGEBA:AGE (veya EPM)	90:10	20	10	25
DGEBA:AGE (veya EPM)	80:20	20	20	25
DGEBA:AGE (veya EPM)	70:30	20	30	25

Sentezlenen epoksi kompozitleri silikon yağı ile yağlanmış reçine kalıplarına sırası ile döküldü. Daha sonra önce oda sıcaklığında 2 saat bekletildi. Bekletilen kalıplar daha sonra 60 ^{0}C ‘ lik etüv de 1 saat bekletilir. Daha sonra 70 ^{0}C’ de 1 saat, 80 ^{0}C’ de 1 saat, 100 ^{0}C’ de 1 saat, 120 ^{0}C’ de 1 saat ve son olarak 130 ^{0}C’ de 1 saat bekletilerek etüvde soğumaya bırakılırlar. İyice kurumuş ve soğumuş kompozitler kalıplardan çıkarıldı. Böylece hem DGEBA/AGE hemde DGEBA/EPM kompozitleri elde edildi.

3.3.4. PS Kompozit numunelerinin Kalıplanması

ASTMD 638 standardına (Plastiklerin Çekme Özellikleri için Standart Test Metotları) uygun kalıplar kullanılarak numuneler hazırlandı (ASTM, 1993). Elde edilen kompozitlerin boyutları Şekil 3.4’ de gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Kalıplanmış kompozitlerin boyutları

3.4. Malzemelerin Analizi

3.4.1. Yoğunluk tayini

Malzemelerin yoğunluk ölçümleri S.Ü A.K. Eğitim Fakültesi Fizik Eğitimi Anabilim Dalı Ultrases ve Uygulamaları laboratuarına ait Şekil 3.5’ de görülen Radwag Analitik Terazi ve Yoğunuk kiti kullanılarak oda sıcaklığında yapılmıştır. Yoğunlukların ölçülmesi Archimedes prendisibine göre yapılmış bu nedenle daldırma

sıvısı olarak destile su kullanılmıştır. Yoğunluk ölçümü için öncelikle değişik molekül ağırlıklarındaki saf polistirenler, MPS' ler, PS kompozitler ve modifiye edilen epoksi reçinelerden (KDGEBA) hava boşluğu olmayan küçük birer parça hazırlanmıştır. Yoğunluk ölçümünün yapıldığı andaki oda sıcaklığı yoğunluk kiti üzerindeki termometreden okunarak analitik teraziye girilmiştir. Radwag Analitik Terazi üzerine kurulan yoğunluk kiti aracılığıyla malzemelerin havadaki kütlesi ve su içindeki kütlesi ölçüldükten sonra malzemelerin yoğunluk değerleri % 0,01 hassaslıkla Radwag AS220/C/2 analitik terazi ile otomatik olarak tespit edilmiştir.



Şekil 3. 5. Radwag analitik terazi ve yoğunluk kiti

3.4.2. Ultrasonik hız ölçümü ve esneklik katsayılarının hesaplanması

Bütün numunelere ait ultrasonik ölçümler Selçuk Üniversitesi Ahmet Keleşoğlu Eğitim Fakültesi Fizik Anabilim Dalı Ultrases ve Uygulamaları laboratuarında yapılmıştır. Malzemenin iç yapısından etkilenerek malzeme içerisinde ilerleyen ultrases dalgasının saçılması tanecik boyutu ile ilişkilendirilebilmektedir (Hirsekorn, 1982). İdeal olarak düzgün paralel yüzeyli bir çubukta hız ölçümü yapılabilmesi için kalınlığının (d), çubuğa gönderilen boyuna ses dalgasının dalga boyunun en az beş katına eşit veya daha büyük olması gerekir (Anonymous 8, 2011). Dalga boyunun ultrasonik uygulamalarda özellikle de hata tespitinde birçok yararı vardır. Mesela, çalışılan frekansta tespit edilebilir en küçük yansıtıcının (tanecik) en az yarım dalga

boyundan büyük bir boyuta sahip olması gereklidir. Tespit edilmesi gereken süreksizliğin bu kritik büyüklüğü bilinirse hız ölçümü için en uygun test frekansı belirlenebilir. Dalga boyu aynı zamanda ses demetinin şekli ve yakın alan mesafesinin hesaplanmasınada yardımcı olur (Hellier, 2001). Buna göre hafif çelik için 5 MHz frekanslı boyuna prob ile hız ölçümü yapılabilmesi için çelik numunesinin kalınlığının en az 6 mm olması gerekir. Bu sebeple ölçüm hassasiyeti açısından ultrases dalga hızlarının uygun frekanslarda dikkatlice ölçülmesi gerekmektedir. Çünkü her malzemenin atomik yapısı ve dolayısıyla da tanecik boyutu birbirinden farklıdır.

Öncelikle bütün numunelerde 0,25-20 MHz aralığındaki frekanslara sahip problar aracılığıyla ardışık arka cidar yankı pikleri gözlendi. Bu gözlemler sonucunda saf PS, MPS ve PS kompozitlerin hem boyuna hemde enine ultrases dalga hızlarının ölçülmesinde 5 MHz' lik frekans ile ölçümün en iyi pikleri verdiği tespit edildi. Bu nedenle saf PS, MPS ve PS kompozitlerin boyuna ultrases dalga hızlarının ölçülmesinde 5 MHz' lik boyuna prob (V109- Panametrics Olympus NDT, ABD) ve yine enine ultrases dalga hızlarının ölçülmesinde 5 MHz' lik enine prob (V155- Panametrics Olympus NDT, ABD) kullanılmıştır (Şekil 3.6). $\lambda = V/f$ denkleminde V yerine saf PS, MPS ve PS kompozitler için ortalama hız yaklaşık olarak 2400 m/s alındığında malzemelere gönderilen ultrasonik dalgaların dalga boyunun, 0,25 MHz frekanslı prob kullanıldığında 9,6 mm, 5 MHz frekanslı prob kullanıldığında 0,47 mm ve 20 MHz frekanslı prob kullanıldığında ise 0,12 mm olduğu tespit edilmiştir. Görüldüğü gib frekans arttıkça malzemeye gönderilen ses dalgalarının dalga boyu artmaktadır. 5 MHz frekanslı prob kullanıldığında malzmelere gönderilen ses dalgalarının dalga boyu 0,47 mm ve bu dalga boyu ise malzemelerin tanecik yapısı ile daha uyumlu olduğundan daha net yankı pikleri görülmüştür. Buna göre bu malzemelerde ultrasonik hız ölçümünün yapılabilmesi için d kalınlıklarının 2,35 mm ye eşit veya büyük olması gerekir ($2,35\ mm \leq d$). Çalışmada kullanılan malzemelerin kalınlıkları 3,5 – 4,5 mm arasında olduğundan çalışılan frekans ve kalınlıkların hız ölçümü için uygun olduğu söylenebilir.

Yukarıda anlatılan işlemin aynısı epoksi reçinesi ve kompozitleri için tekrarlandığında boyuna ultrases dalga hızları için 3,5 MHz, enine ultrases dalga hızları için ise 2,25 MHz' in uygun frekanslar olduğu tespit edildi. Bu nedenle epoksi reçinesi (DGEBA) ve KDGEBA' ların boyuna ultrases dalga hızlarının ölçülmesinde 3,5 MHz' lik boyuna prob (V183- Panametrics Olympus NDT, ABD) ve enine ultrases dalgası hızlarının ölçülmesinde 2,25 MHz' lik enine prob (V154- Panametrics Olympus NDT, ABD) kullanılmıştır (Şekil 3.7).



Şekil 3.6. Hız ölçümlerinde kullanılan problar

Hız ölçümlerinin tamamında darbe-yankı yöntemi kullanılmıştır. Darbe–yankı yöntemi en çok kullanılan yöntem olup, prensibi prob tarafından gönderilen ses dalgalarının malzeme içinde bir süreksizliğe çarptıktan sonra tekrar proba yansıması esasına dayanır (Mutlu, 2006). Bu çalışmada doğrudan temas tekniği ile ultrasonik hız ölçümü yapılmıştır. Bu tip testte, prob numune ile doğrudan temas halindedir. Sesin probtan numuneye geçişini kolaylaştırmak için numune ile prob arasına bir sıvı (gliserin, gres yağı, gaz yağı, duvar kâğıdı macunu, ılık ağda, bal ve özel jeller) sürülür. Bu kullanılan sıvılara kuplaj sıvısı denmektedir. Bunların probtan malzemeye ses enerjisini geçirme oranları en fazla % 10-15' dir. En iyi kuplaj sıvısı % 15 civarında ses enerjisi geçirim oranına sahip olan gliserindir. Kullanılan bu sıvıların malzemeye ve problara zarar vermemesi gerekir (Hellier, 2001).

Numunelerde boyuna ve enine ultrases dalgalarının hızı için öncelikle aşağıda Şekil 3.7' de görülen düzenek kurulmuştur.



Şekil 3.7. Ultrases dalgalarının hız ölçümlerinde kullanılan düzenek

Bu düzenekte 35 MHz' lik bilgisayar kontrollü Panametrics-NDT Model 5800PR marka puls üretici (Panametrics Olympus NDT, ABD), 60 MHz' lik GW Instek GDS-2062 model dijital osiloskop (Tayvan) ve boyuna ve enine problar kullanılmıştır. Bu kurulan deney düzeneği ile bütün malzemelere ultrasonik dalgalar gönderilmiş ve bu dalgaların malzemelerin diğer yüzüne gidip gelmesi için geçen zaman (t) μs cinsinden osiloskop ekranından tespit edilmiştir. Her bir yüzey için bu işlem 10' ar kez tekrarlanarak ortalama geçiş süresi tespit edilmiştir. Bu geçiş sürelerinin belirlenmesi sırasında prob ile malzeme yüzeyleri arasında boyuna ses hızı ölçümlerinde BQ gliserin (Olympus NDT, ABD) ve enine ses hızı ölçümleri sırasında ise ultrasonik SWC sıvısı (Olympus-NDT, ABD) kullanılmıştır (Şekil 3. 8a-b).



(a) (b)

Şekil 3.8. Hız ölçümlerinde kullanılan kuplaj sıvıları a) Boyuna ultrases dalga hızlarının ölçülmesinde kullanılan kuplaj sıvısı, b) Boyuna ultrases dalga hızlarının ölçülmesinde kullanılan kuplaj sıvısı ve sürme aparatı

Bütün malzemelerin kalınlıkları Şekil 3.9' da görülen 0,01mm hasaslıktaki mikrometre (Somet, Çekoslovakya) yardımıyla 10' ar kez ölçülmüş ve ortalama kalınlıkları (d) tespit edilmiştir.



Şekil 3. 9. Numunelerin kalınlık ölçümlerinde kullanılan mikrometre

Malzemelerin kalınlıkları, boyuna ve enine dalgaların malzemelerden geçiş süreleri tespit edildikten sonra aşağıdaki Denklem 3.1' de yerine konularak ultrasonik boyuna dalga hızları, enine dalga hızları m/s biriminden ortalama % 0,04 hassaslıkla hesaplanmıştır.

$$V = \frac{2d}{t} \quad \text{(m/s)} \tag{3.1}$$

Katı bir cismin esneklik sabitleri, ultrasonik dalgaların hızları ve cismin yoğunluğu ölçülerek elde edilebilir. Bu esneklik sabitleri bağlanma kuvvetleri ile ilişkilidir. İzotropik katı cisimde sadece bir boyuna ve bir enine elastik dalga yayılabilir. Bu nedenle izotropik katı bir cismin iki bağımsız esneklik sabiti vardır (L ve G). Bu elastik sabitlerini elde etmek için izotropik katı cisimde herhangi bir yönde yayılan boyuna ve enine ultrasonik dalgaların hızlarını ve cismin yoğunluğunu ölçmek yeterlidir (Perepechko, 1975; Cankurtaran, 1995; Muthupari, 1996). Bütün malzemelerin L ve G değerleri aşağıdaki Denklem (3.2) ve Denklem (3.3) aracılığıyla ortalama % 0,04 hassaslıkta hesaplanmıştır.

$$L = \rho . V_b^2 \tag{3.2}$$

$$G = \rho . V_e^2 \tag{3.3}$$

Burada, ρ katı cismin yoğunluğu, V_b ve V_e sırasıyla boyuna ve enine ses dalgalarının yayılma hızlarıdır. Boyuna (L) ve Enine (G) esneklik modülleri kullanılarak izotropik katı cismin hacimsel esneklik modülü (K), Young modülü (E) ve Poisson oranı (μ) aşağıdaki bağıntılardan hesaplanabilir (Perepechko, 1975; Landau ve Lifshitz, 1986; Muthupari, 1996).

$$\mu = \frac{L - 2G}{2(L - G)} \tag{3.4}$$

$$K = L - \frac{4}{3}G \tag{3.5}$$

$$E = 2G (1+\mu) \quad (3.6)$$

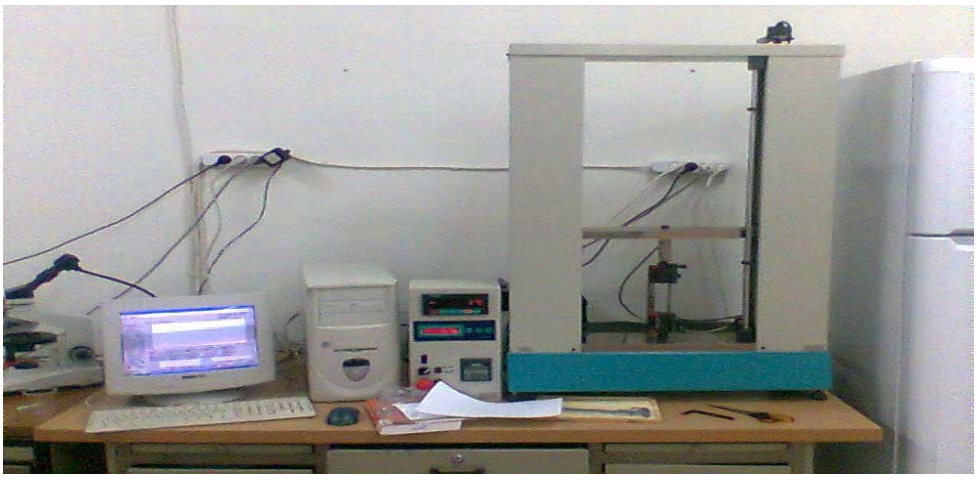
Bütün malzemelerin yoğunlukları, boyuna ve enine ses dalga hızları, boyuna modül ve enine modül değerleri belirlendikten sonra bu değerler yukarıdaki Denklem (3.4), (3.5) ve (3.6)' da yerine yazılarak bulk modülü (K) % 0,05 hassaslıkta, Young modülü (E) % 0,06 hassaslıkta ve Poisson katsayısı (μ) % 0,02 hassaslıkta hesaplanmıştır. Ayrıca yoğunluk ve boyuna ses hızı değerleri Denklem (3.7)' de yerine yazılarak her bir numune için akustik empedans değeri % 0,04 hassaslıkta hesaplanmıştır.

$$Z = \rho.V_b \quad (3.7)$$

Esneklik sabitleri, atomlararası bağlanma enerjisinin gerinme (strain)' ye göre ikinci türevini karakterize eder ve cisim ile ilgili birçok fiziksel nicelikle (ısısal genleşme, öz ısı, Debye sıcaklığı, mekanik dayanıklılık, faz geçişleri vb.) bağlantılıdır.

3.4.3. Young modülünün çekme testi ile ölçümü

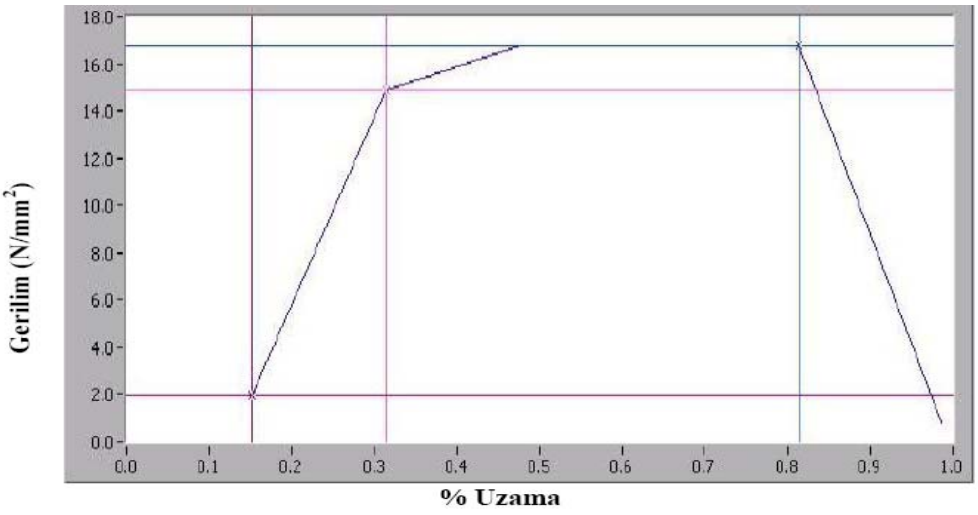
180-200 ^{0}C de eritilerek 7 atm basınç altında basınçlı enjeksiyon kalıplama makinası yardımıyla ASTMD 638 standarına uygun kalıplara basılmıştır. ASTMD 638 standardına uygun olarak kalıplanan saf PS ve PS kompozitlerin Young modülleri çekme testi ile ölçülmüştür. Çekme testi, S.Ü. Mühendislik Mimarlık Fakültesi Kimya Mühendisliği Polimer Araştırmaları laboratuarında MARES (Türkiye) firmasının çekme -basma testi cihazı ile yapılmıştır (Şekil 3.10).



Şekil 3.10. PS kompozitlerin young modülllerinin ölçülmesinde kullanılan çekme testi cihazı

Çekme testinde, standartlara göre hazırlanmış numunenin iki ucu, standart deney sisteminde çeneler arasına sıkıştırıldıktan sonra çeneler birbirinden belirli, sabit, bir hızla uzaklaştırılırken örnek iki ucundan bu belirli hızla gerdirilmiştir. Çekme işlemine tek eksende, belirli bir hızla ve sabit sıcaklıkta numune koparılıncaya kadar devam edilmiştir. Deney sırasında, standart numuneye devamlı olarak artan bir çekme kuvveti uygulanır, aynı esnada da numunenin uzaması kaydedilmiştir.

Bütün numuneler çekme testine tabi tutulduktan sonra bilgisayara aktarılan bilgiler ile bilgisayar tarafından otomatik olarak oluşturulan gerilme - uzama eğrilerinin esneklik sınırına kadarki eğimlerinden Young modülleri hesaplanmıştır (Şekil 3.11). Enine modüllerinin ölçümü için ayrıca burulma testinin de uygulanması gerekir. Bu test çekme testi gibi zor, masraflı ve zaman açısından da ekonomik olmadığından yapılmamıştır. Sadece numunelere ait Young modüllerinin mekaniksel olarak çekme testi ile ölçülen değerleri ile ultrasonik darbe-yankı yöntemiyle ölçülen değerleri arasındaki ilişki araştırılmıştır.



Şekil 3.11. Bilgisayarda otomatik olarak çizilen çekme testine ait gerilim - uzama eğrisi

3.4.4. Modifiye polistirenlerin FT-IR analizi

Kızılötesi spektroskopisi, yetmiş yılı aşkın süreden beri laboratuarlarda malzeme analizi için kullanılan önemli bir tekniktir. FT-IR (Fourier Dönüşümü Kızılötesi Spektroskopisi) analizi, organik veya inorganik malzemelerin kimyasal bağları veya moleküler yapısı hakkında bilgi veren bir hata analiz tekniğidir. Çalışma tekniği, bağlar

ve bağ gruplarının karakteristik frekanslarda titreşmesi esasına dayanmaktadır. Kızılötesi ışınlara maruz bırakılan bir molekül kendisi için karakteristik olan frekanslardaki kızılötesi enerjiyi emer. FT-IR analizi sırasında, örnek üzerinde bir nokta IR ışınlarına tabi tutulur. Kızılötesi radyasyonun bir kısmı malzeme tarafından absorbe edilirken bir kısmı geçirilir. Malzemenin farklı frekanslarda kızılötesi ışınlarını geçirme ve yansıtma miktarları ters piklerden oluşan bir kızılötesi absorpsiyon spektrumuna dönüştürülmektedir. Ortaya çıkan spektrum malzeme için moleküler bir parmak izini oluşturan, moleküler absorpsiyon ve geçirim miktarlarını temsil eder. Parmak izinde olduğu gibi hiçbir zaman iki farklı molekül aynı kızılötesi spektrumu üretmez. FT-IR spektrumu daha sonra analiz edilir ve bilinen malzemelerin spektrumları ile karşılaştırılır.

Sentezlenen modifiye polistirenler çözücülerinde çözülüp, ince bir film tabakası halinde kurutulduktan sonra yapıları FT-IR spektrumu yardımı ile aydınlatılmıştır. Saf PS ve MPS' lerin FT-IR spektrumları Perkin-Elmer 1605 spektromettresi ile yapılmıştır. FT-IR spektrumlarında karakterize bantların yerleri saptanarak, her bir banda karşılık gelen fonksiyonel gruplar belirlenmiştir.

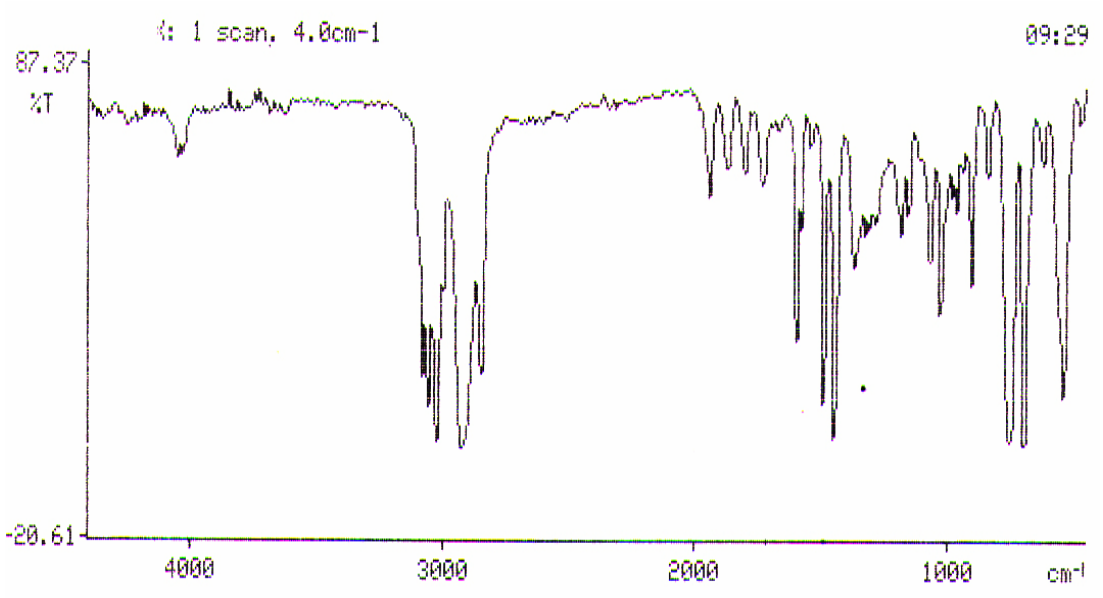
4. DENEYSEL BULGULAR

Bu bölümde; sentezlenen tüm numunelerin yoğunluk, ses hızı ve esneklik katsayılarına ilişkin analizlerden elde edilen bulgular çizelgeler ve grafikler şeklinde tek tek verilerek incelenmiştir. Ayrıca bütün polistiren kompozitlerin çekme testi ve ultrasonik metodla ölçülen Young modülü değerlerine ilişkin bulgulara da yer verilmiştir.

4.1. Modifiye Polistirenlerin (MPS) FT-IR Analizlerine Ait Bulgular

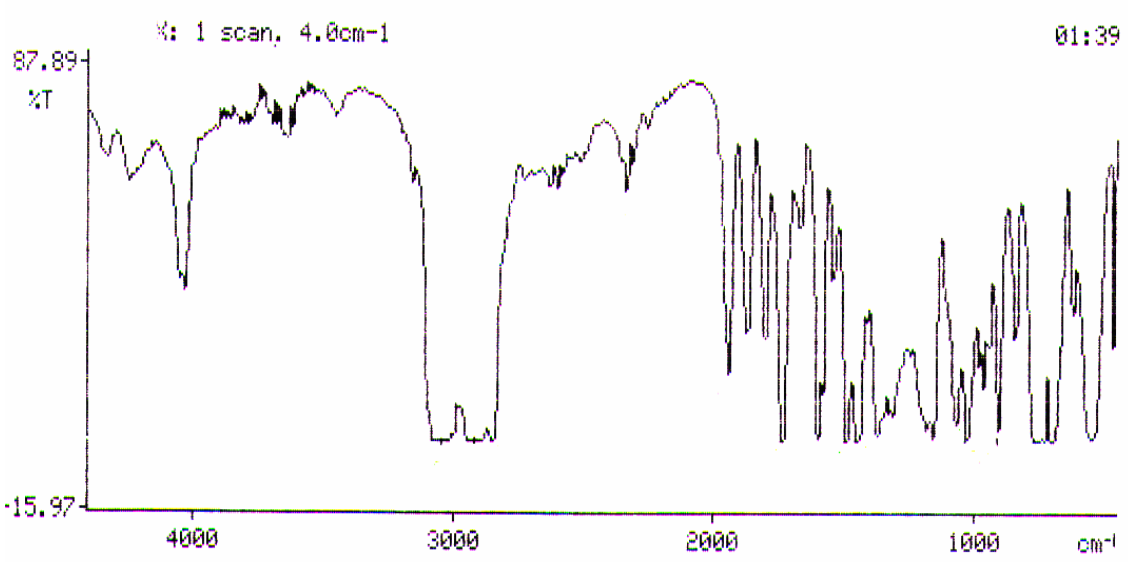
Çizelge 4.1. MPS'lerin FT-IR spektrumundaki pikler (cm^{-1})

	PS	SAII	MAII	FAII
1	4030	4037	4037	4037
2		3641	3640	3640
3		3454	3450	3438
4	3024	3041	3024	3041
5	2915	2914	2923	2914
6	2840	2847	2847	2627
7		2332	2340	2332
8	1935	1935	1935	1935
9	1868	1868	1868	1868
10	1800	1800	1800	1800
11		1733	1732	1724
12		1670	1670	1665
13	1589	1598	1589	1598
14	1488	1488	1488	1479
15	1446	1446	1446	1445
16	1370	1370	1370	1370
17	1270	1278	1280	1277
18		1159	1150	1176
19	1058	1057	1057	1066
20	1024	1024	1024	1024
21	905	905	905	905



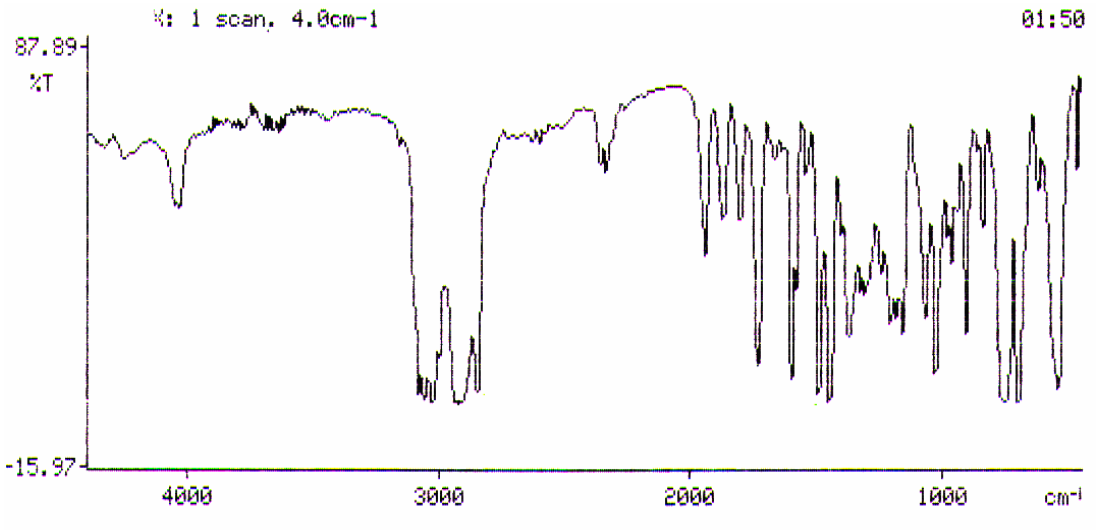
Şekil 4.1. Modifiye edilmemiş PS_{350}' nin FT-IR Spektrumu

Şekil 4.1' den PS' nin yapısındaki aromatik C=C bağının 1589 cm^{-1} ve 1446 cm^{-1}'de, fenil çekirdeğinin ise 1488 cm^{-1}' de olduğu görülmektedir.



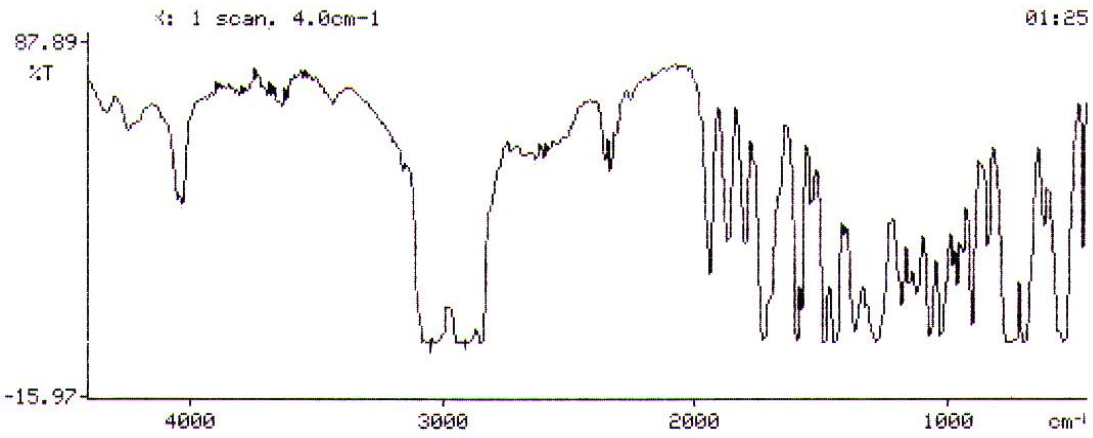
Şekil 4.2. Süksinik anhidritle modifiye edilen MPS_{350}' nin (SAII) FT-IR spektrumu

Şekil 4.2' den SA ile modifiye edilen PS (SAII)' nin yapısındaki aromatik C=C bağının 1598 cm^{-1} ve 1446 cm^{-1}'de, fenil çekirdeğinin 1488 cm^{-1}' de, karbonil grubunun (C=O) 1733 cm^{-1}' de şiddetli bant olarak, karboksilin OH' ının ise geniş bant olarak 3041-3454 cm^{-1} arasında olduğu görülmektedir.



Şekil 4.3. Maleik anhidritle modifiye edilen MPS_{350}' nin (MAII) FT-IR spektrumu

Şekil 4.3' den MA ile modifiye PS (MAII)' nin yapısındaki aromatik C = C bağının 1589 cm^{-1} ve 1446 cm^{-1}' de, fenil çekirdeğinin 1488 cm^{-1}' de, karbonil grubunun (C = O) 1732 cm^{-1}' de şiddetli bant olarak, karboksilin OH' ının ise geniş bant olarak 3024-3450 cm^{-1} arasında olduğu görülmektedir.



Şekil 4.4. Ftalik anhidritle modifiye edilen MPS_{350}' nin (FAII) FT-IR spektrumu

Şekil 4.4' den FA ile modifiye PS (FAII)'nin yapısındaki aromatik C = C bağının 1598 cm^{-1} ve 1445 cm^{-1}' de, fenil çekirdeğinin 1479 cm^{-1}' de, karbonil grubunun (C = O) 1724 cm^{-1}' de şiddetli bant olarak, karboksilin OH' ının ise geniş bant olarak 3041-3438 cm^{-1} arasında olduğu görülmektedir.

Şekil 4.2- 4.4'den görüldüğü gibi organik anhidritlerle modifiye edilmiş her üç modifiye polistirenin yapısındaki karbonil grubu (C = O) 1724-1733 cm^{-1} civarında

şiddetli bant olarak, aromatik C = C bağı 1589-1598 cm^{-1} ve 1446 cm^{-1}' de, karboksilin OH' ı ise geniş bant olarak 3000-3450 cm^{-1} arasında görülmektedir. Karbonile ait bandın saf PS' nin FT-IR spektrumunda (Şekil 4.1) görülmemesi modifikasyon reaksiyonunun gerçekleştiğini göstermektedir.

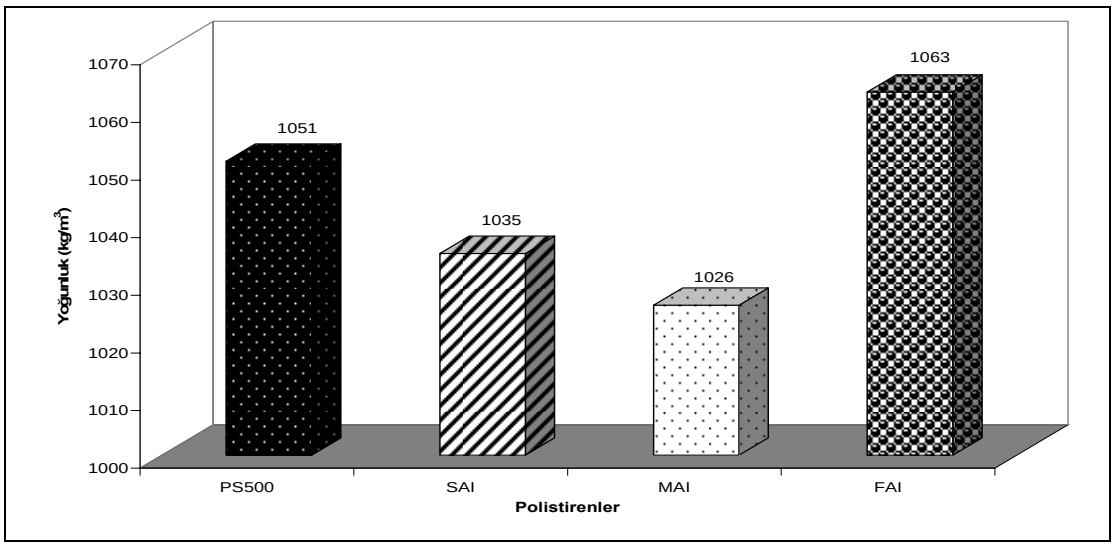
4.2. MPS_{500}' lerden Elde Edilen Bulgular

Çizelge 4.2. PS_{500} ve MPS_{500}' lere ait yoğunluk (ρ), boyuna ses dalga hızı (V_b), enine ses dalga hızı (V_e) değerleri

Polimerler	ρ(kg/m^3)	V_b (m/s)	V_e (m/s)
PS_{500}	1051	2355± 0,04	1155± 0,03
SAI	1035	2414± 0,03	1175± 0,03
MAI	1026	2385± 0,03	1157± 0,04
FAI	1063	2400± 0,04	1179± 0,03

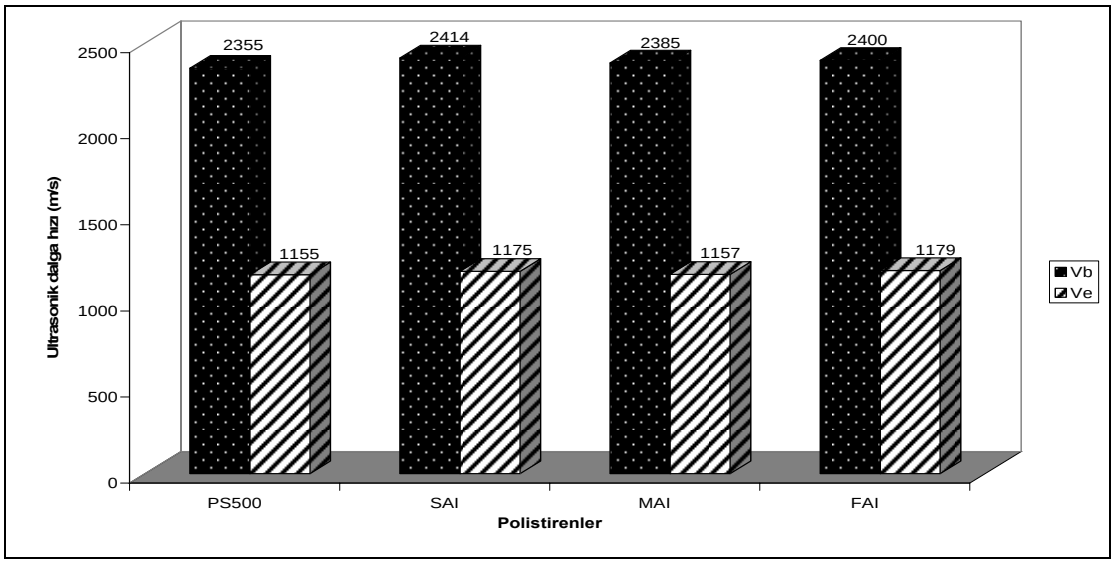
Çizelge 4.3. PS_{500} ve MPS_{500}'lere ait Poisson Oranı (μ), boyuna esneklik modülü (L), Enine esneklik modülü (G), hacimsel esneklik modülü (K), Young modülü (E) ve akustik empedans (Z) değerleri

Polimerler	μ	L (GPa)	G (GPa)	K (GPa)	E (GPa)	Z(10^6 kg/m^2.s)
PS_{500}	0,3415± 0,02	5,831± 0,04	1,403± 0,03	3,959± 0,05	3,766± 0,06	2,475± 0,04
SAI	0,3447± 0,01	6,037± 0,03	1,431± 0,04	4,129± 0,04	3,848± 0,07	2,500± 0,05
MAI	0,3459± 0,01	5,838± 0,04	1,375± 0,03	4,004± 0,06	3,702± 0,06	2,447± 0,05
FAI	0,3411± 0,02	6,132± 0,04	1,479± 0,03	4,160± 0,05	3,967± 0,06	2,554± 0,04



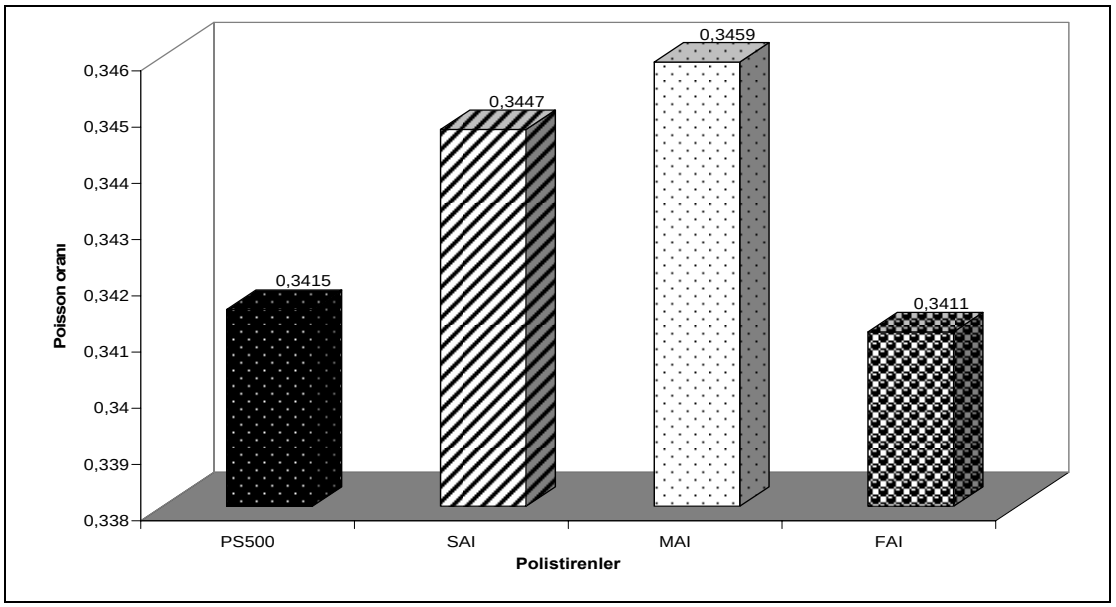
Şekil 4.5. PS_{500} ve MPS_{500} (SAI, MAI ve FAI)' lerin yoğunluk grafiği

Çizelge 4.2 ve Şekil 4.5' den görüldüğü gibi, PS_{500}' ün yoğunluğu 1051 (kg/m^3); SA eklenince 1035 (kg/m^3), MA eklenince 1026 (kg/m^3)' a düşerken FA eklenince 1063 (kg/m^3)' e yükselmiştir.



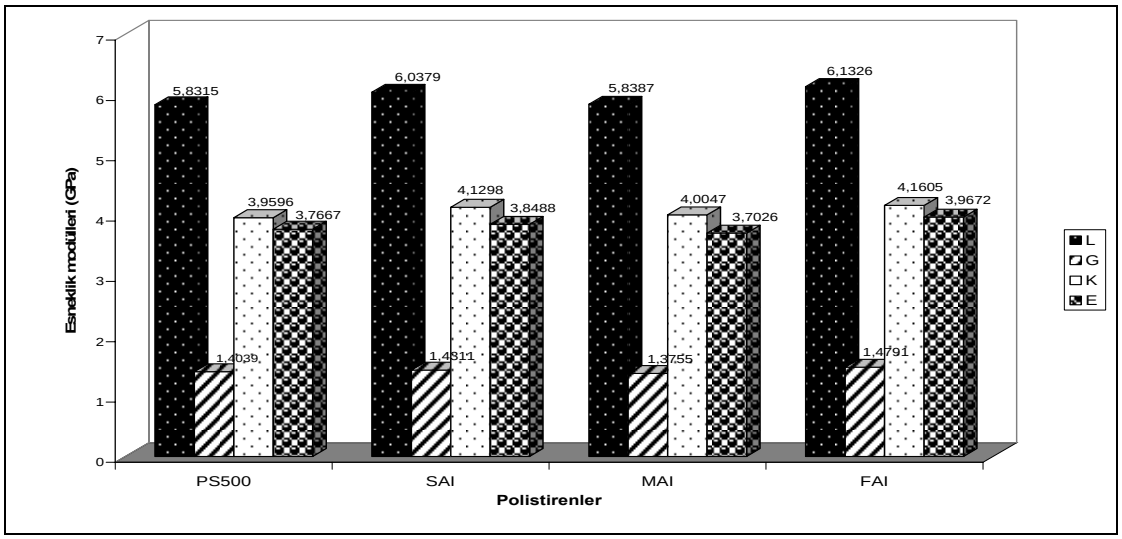
Şekil 4.6. PS_{500} ve MPS_{500}'lerin boyuna ve enine ultrases dalga hızları grafiği

Çizelge 4.2 ve Şekil 4.6' den görüldüğü gibi, PS_{500}' ün boyuna ultrases dalga hızı 2355 m/s; SA eklenince 2414 m/s, MA eklenince 2385 m/s ve FA eklenince 2400 m/s' ye yükselmiştir. Enine ses dalga hızı 1155 m/s; SA eklenince 1175 m/s, MA eklenince 1157 m/s ve FA eklenince 1179 m/s' ye yükselmiştir.



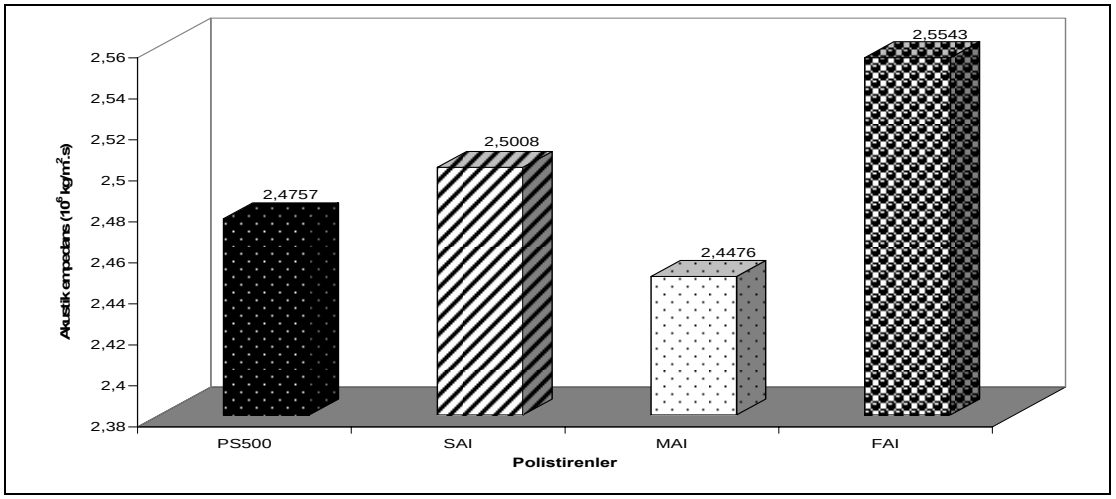
Şekil 4.7. PS_{500} ve MPS_{500}'lerin Poisson oranları grafiği

Çizelge 4.3 ve Şekil 4.7'den görüldüğü gibi, PS_{500}' ün Poisson oranı 0,3415 iken SA ile modifiye edilince 0,3447' ye, MA ile modifiye edilince 0,3459' a çıkarken FA ile modifiye edilince 0,3411' e düşmüştür.



Şekil 4.8. PS_{500} ve MPS_{500}' lerin esneklik modülleri (L, G, K, E) grafiği

Çizelge 4.3 ve Şekil 4.8' e göre PS_{500}' ün boyuna esneklik modülü (L) 5,831 GPa' dan SA ile modifiye edilince 6,037 GPa' a, MA ile modifiye edilince 5,838 GPa' a ve FA ile modifiye edilince 6,132 GPa' a çıkmıştır. PS_{500}' ün enine esneklik modülü (G) 1,403 GPa' dan SA ile modifiye edilince 1,431 GPa' a, FA ile modifiye edilince 1,479 GPa' a çıkarken MA ile modifiye edilince 1,375 GPa' a düşmüştür. PS_{500}' ün hacimsel esneklik modülü (K) 3,959 GPa' dan SA ile modifiye edilince 4,129 GPa' a, ve FA ile modifiye edilince 4,160 GPa' a çıkarken MA ile modifiye edilince 4,004 GPa' a düşmüştür. Young modülü (E) ise 3,766 GPa' dan SA ile modifiye edilince 3,848 GPa' a, FA ile modifiye edilince 3,967 GPa' a çıkarken MA ile modifiye edilince 3,702 GPa' a düşmüştür.



Şekil 4.9. PS_{500} ve MPS_{500}' lerin akustik empedansları grafiği

Çizelge 4.3 ve Şekil 4.9' den görüldüğü gibi PS_{500}, ün akustik empedansı $2{,}475.10^6$ kg/m^2.s' den SA ile modifiye edilince $2{,}500.10^6$ kg/m^2.s' ye, FA ile modifiye edilince $2{,}554.10^6$ kg/m^2.s' ye çıkarken MA ile modifiye edilince $2{,}447.10^6$ kg/m^2.s' ye düşmüştür.

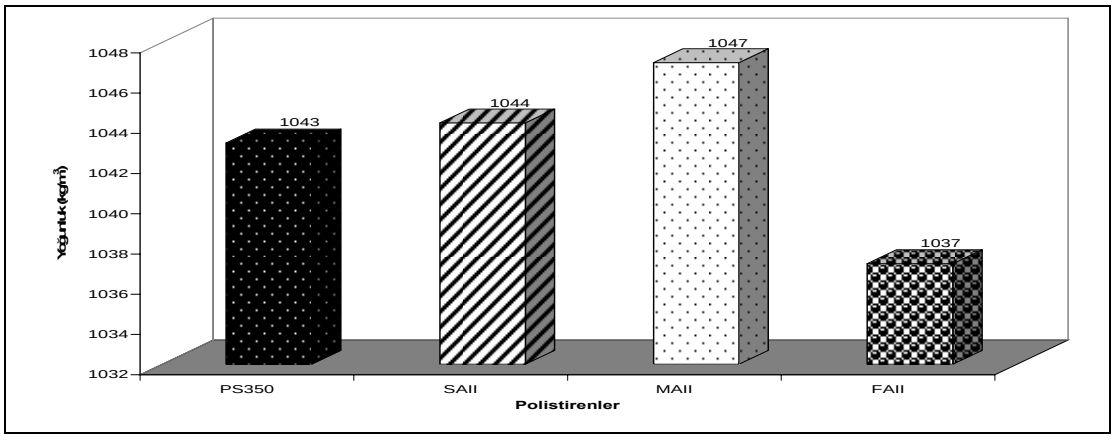
4.3. MPS_{350}' lerden Elde Edilen Bulgular

Çizelge 4.4. PS_{350} ve MPS_{350}' lere ait yoğunluk (ρ), boyuna ses dalga hızı (V_b), enine ses dalga hızı (V_e) değerleri

Polimerler	ρ (kg/m^3)	V_b (m/s)	V_e (m/s)
PS_{350}	1043	2352± 0,04	1153± 0,03
SAII	1044	2403± 0,03	1158± 0,04
MAII	1047	2391± 0,04	1156± 0,03
FAII	1037	2419± 0,04	1178± 0,04

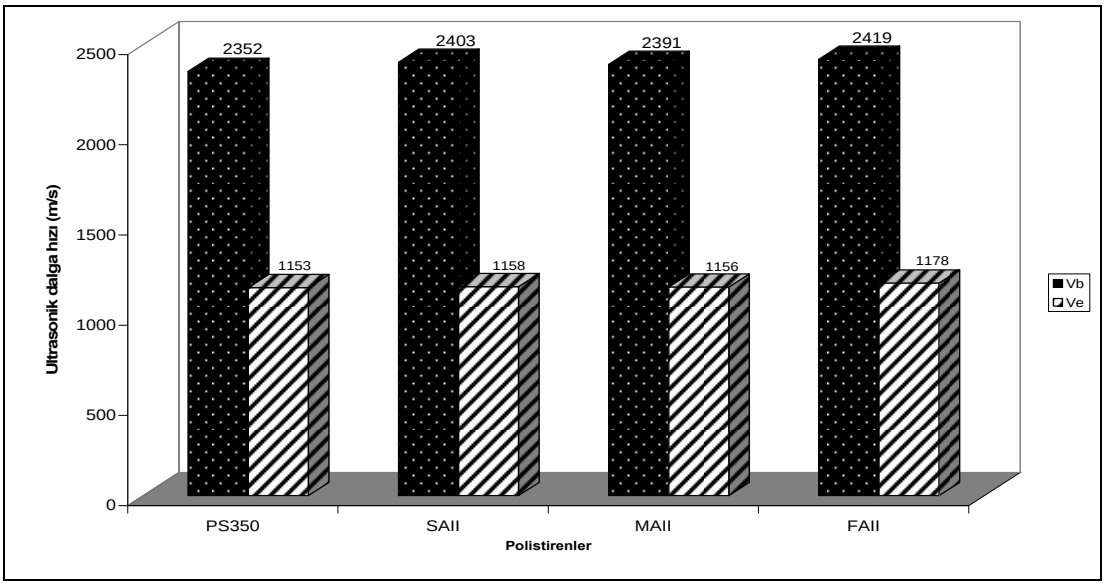
Çizelge 4.5. PS_{350} ve MPS_{350}' lere ait Poisson oranı (μ), boyuna esneklik modülü (L), enine esneklik modülü (G), hacimsel esneklik modülü (K), Young modülü (E) ve akustik empedans (Z) değerleri

	μ	L(GPa)	G(GPa)	K(GPa)	E(GPa)	Z(10^6 kg/m^2.s)
PS_{350}	0,3417± 0,02	5,772± 0,04	1,388± 0,03	3,921± 0,05	3,725± 0,06	2,454± 0,04
SAII	0,3486± 0,01	6,032± 0,03	1,402± 0,03	4,162± 0,04	3,781± 0,06	2,509± 0,05
MAII	0,3473± 0,02	5,991± 0,04	1,401± 0,03	4,121± 0,05	3,777± 0,07	2,505± 0,05
FAII	0,3443± 0,02	6,070± 0,03	1,441± 0,04	4,148± 0,05	3,876± 0,06	2,509± 0,04



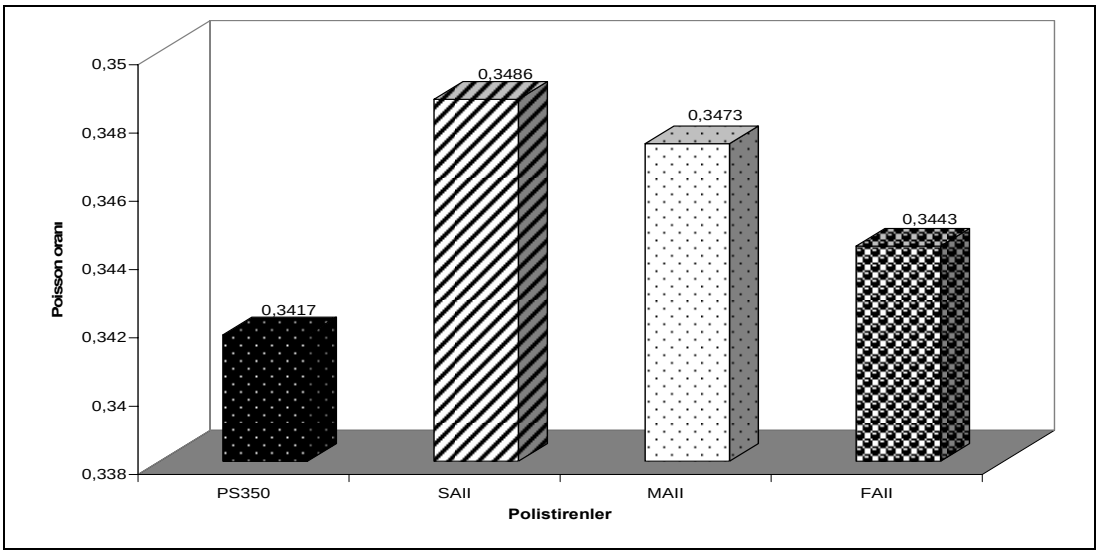
Şekil 4.10. PS_{350} ve MPS_{350}' lerin yoğunlukları grafiği

Çizelge 4.4 ve Şekil 4.10' dan görüldüğü gibi PS_{350}' nin yoğunluğu 1043 (kg/m^3) iken SA eklenince 1044 (kg/m^3), MA eklenince 1047 (kg/m^3)'e çıkarken FA eklenince 1037 (kg/m^3)'e düşmüştür.



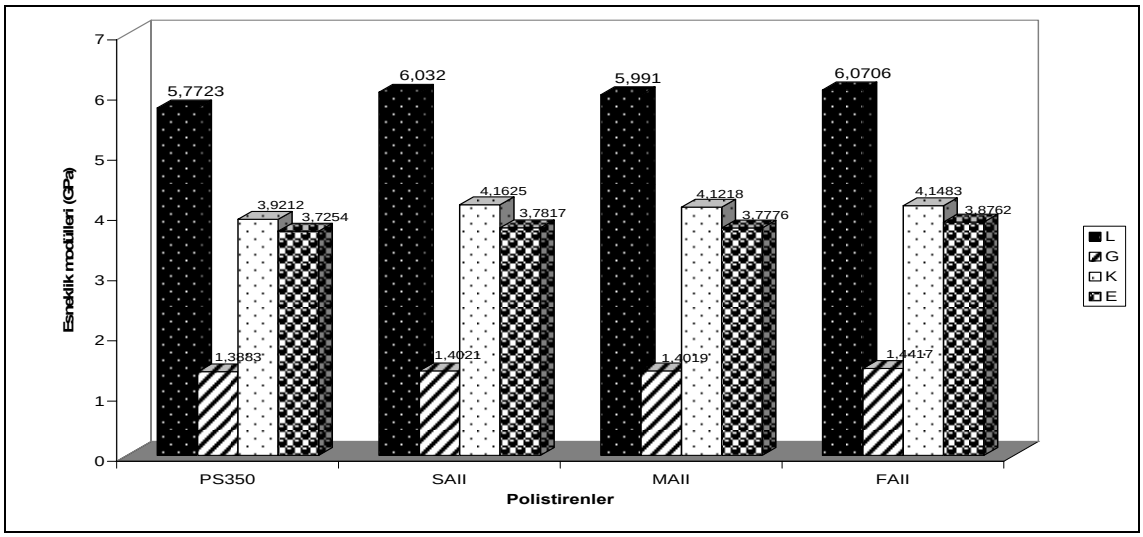
Şekil 4.11. PS_{350} ve MPS_{350}'lerin boyuna (V_b) ve enine (V_e) ses dalga hızları grafiği

Çizelge 4.4 ve Şekil 4.11' den görüldüğü gibi PS_{350}' nin boyuna ses dalga hızı 2352 m/s iken SA eklenince 2403 m/s, MA eklenince 2391 m/s ve FA eklenince 2419 m/s' ye yükselmiştir. Enine ses dalga hızı 1153 m/s iken SA eklenince 1158 m/s, MA eklenince 1156 m/s ve FA eklenince 1178 m/s' ye yükselmiştir.



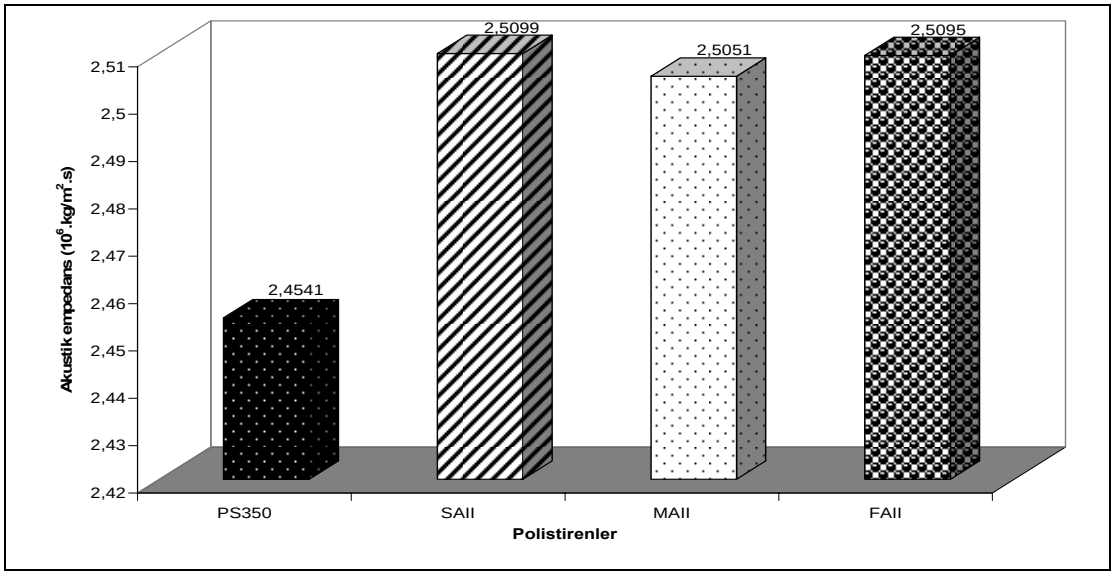
Şekil 4.12. PS_{350} ve MPS_{350}' lerin Poisson oranları grafiği

Çizelge 4.5 ve Şekil 4.12' den görüldüğü gibi PS_{350}'nin Poisson oranı 0,3417 iken SA ile modifiye edilince 0,3486' ya, MA ile modifiye edilince 0,3473' ye ve FA ile modifiye edilince 0,3443' ye yükselmiştir.



Şekil 4.13. PS_{350} ve MPS_{350}' lerin esneklik modülleri (L, G, K, E) grafiği

Çizelge 4.5 ve Şekil 4.13' e göre PS_{350}' nin boyuna esneklik modülü 5,772 GPa' dan SA ile modifiye edilince 6,032 GPa' a, FA ile modifiye edilince 6,070 GPa' a çıkarken MA ile modifiye edilince 5,991 GPa' a düşmüştür. PS_{350}' nin enine esneklik modülü 1,388 GPa' dan SA ile modifiye edilince 1,402 GPa' a, MA ile modifiye edilince 1,401 GPa' a ve FA ile modifiye edilince 1,441 GPa' a çıkmıştır. PS_{350}' nin hacimsel esneklik modülü 3,921 GPa' dan SA ile modifiye edilince 4,162 GPa' a, MA ile modifiye edilince 4,121 GPa' a ve FA ile modifiye edilince 4,148 GPa' a çıkmıştır. PS_{350}' nin Young modülü ise 3,725 GPa' dan SA ile modifiye edilince 3,781 GPa' a, MA ile modifiye edilince 3,777 GPa' a ve FA ile modifiye edilince 3,876 GPa' a çıkmıştır.



Şekil 4.14. PS_{350} ve MPS_{350}' lerin akustik empedans grafiği

Çizelge 4.5 ve Şekil 4.14' dan görüldüğü gibi PS_{350}' nin akustik empedansı 2,454.10^6 kg/m^2.s' den SA ile modifiye edilince 2,509.10^6 kg/m^2.s' ye, MA ile modifiye edilince 2,505.10^6 kg/m^2.s' ye ve FA ile modifiye edilince 2,509.10^6 kg/m^2.s' ye çıkmıştır.

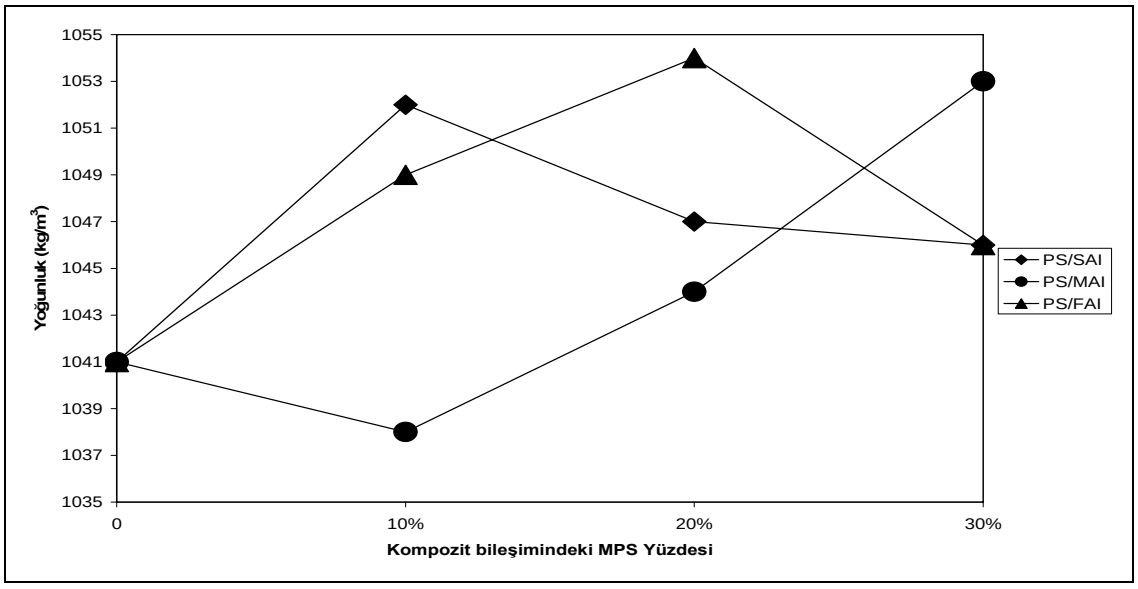
4.4. KPS_{500} Kompozitlerinden Elde Edilen Bulgular

Çizelge 4. 6. MPS_{500}' lerin kütlece % 10, 20 ve 30 oranlarında PS_{230}'a eklenmesiyle oluşan kompozitlere ait yoğunluk (ρ), boyuna ses dalga hızı (V_b), enine ses dalga hızı (V_e) değerleri

Bileşim %'si, kütlece		ρ (kg/m^3)	V_b (m/s)	V_e (m/s)
PS_{230}:SAI	100:0	1041	2344± 0,04	1147± 0,04
	90:10	1052	2399± 0,03	1159± 0,04
	80:20	1047	2403± 0,04	1167± 0,03
	70:30	1046	2409± 0,03	1171± 0,04
PS_{230}:MAI	100:0	1041	2344± 0,04	1147± 0,04
	90:10	1038	2404± 0,03	1168± 0,04
	80:20	1044	2398± 0,03	1161± 0,03
	70:30	1053	2393± 0,04	1157± 0,04
PS_{230}:FAI	100:0	1041	2344± 0,04	1147± 0,04
	90:10	1049	2399± 0,03	1173± 0,03
	80:20	1054	2394± 0,04	1168± 0,04
	70:30	1046	2390± 0,04	1167± 0,03

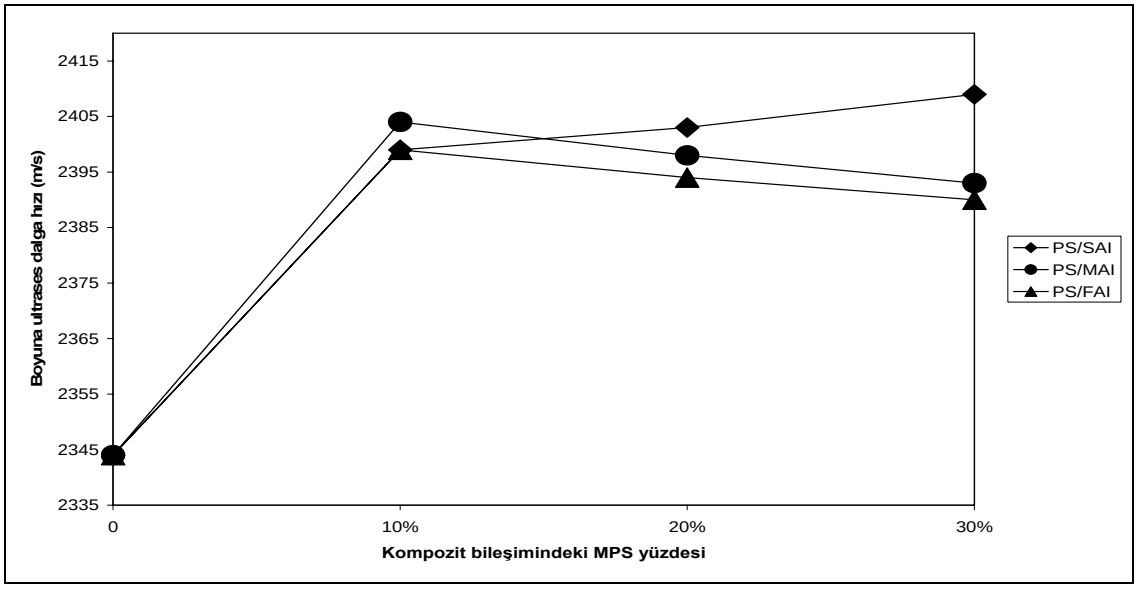
Çizelge 4.7. MPS_{500}'lerin kütlece % 10, 20 ve 30 oranlarında PS_{230}'a eklenmesiyle oluşan kompozitlere ait Poisson Oranı (μ), boyuna esneklik modülü (L), enine esneklik modülü (G), hacimsel esneklik modülü (K), Young modülü (E) ve akustik empedans (Z) değerleri

Bileşim %' si, kütlece		μ	L(GPa)	G(GPa)	K(GPa)	E(GPa)	Z(10^6 kg/m^2.s)
PS230:SAI	100:0	0,3425± 0,01	5,725± 0,04	1,371± 0,03	3,896± 0,04	3,683± 0,06	2,442± 0,04
	90:10	0,3475± 0,01	6,057± 0,04	1,415± 0,04	4,169± 0,04	3,815± 0,06	2,524± 0,04
	80:20	0,3454± 0,02	6,048± 0,03	1,428± 0,03	4,143± 0,03	3,844± 0,07	2,517± 0,03
	70:30	0,3451± 0,02	6,076± 0,04	1,436± 0,04	4,160± 0,03	3,865± 0,07	2,521± 0,04
PS230:MAI	100:0	0,3425± 0,01	5,725± 0,04	1,371± 0,03	3,896± 0,04	3,683± 0,06	2,442± 0,04
	90:10	0,3455± 0,02	6,002± 0,03	1,416± 0,03	4,113± 0,04	3,812± 0,07	2,496± 0,03
	80:20	0,3467± 0,01	6,006± 0,04	1,409± 0,04	4,127± 0,03	3,795± 0,06	2,504± 0,03
	70:30	0,3473± 0,02	6,034± 0,03	1,411± 0,03	4,152± 0,04	3,803± 0,07	2,521± 0,04
PS230:FAI	100:0	0,3425± 0,01	5,725± 0,04	1,371± 0,03	3,896± 0,04	3,683± 0,06	2,442± 0,04
	90:10	0,3428± 0,01	6,045± 0,04	1,446± 0,04	4,116± 0,03	3,884± 0,07	2,519± 0,03
	80:20	0,3438± 0,02	6,044± 0,03	1,439± 0,03	4,125± 0,03	3,867± 0,06	2,524± 0,03
	70:30	0,3434± 0,01	5,981± 0,04	1,426± 0,04	4,079± 0,04	3,831± 0,07	2,501± 0,04



Şekil 4. 15. PS_{230}'a, MPS_{500}' lerin kütlece % 10, 20 ve 30 oranında eklenmesiyle oluşan kompozitlerin yoğunlukları

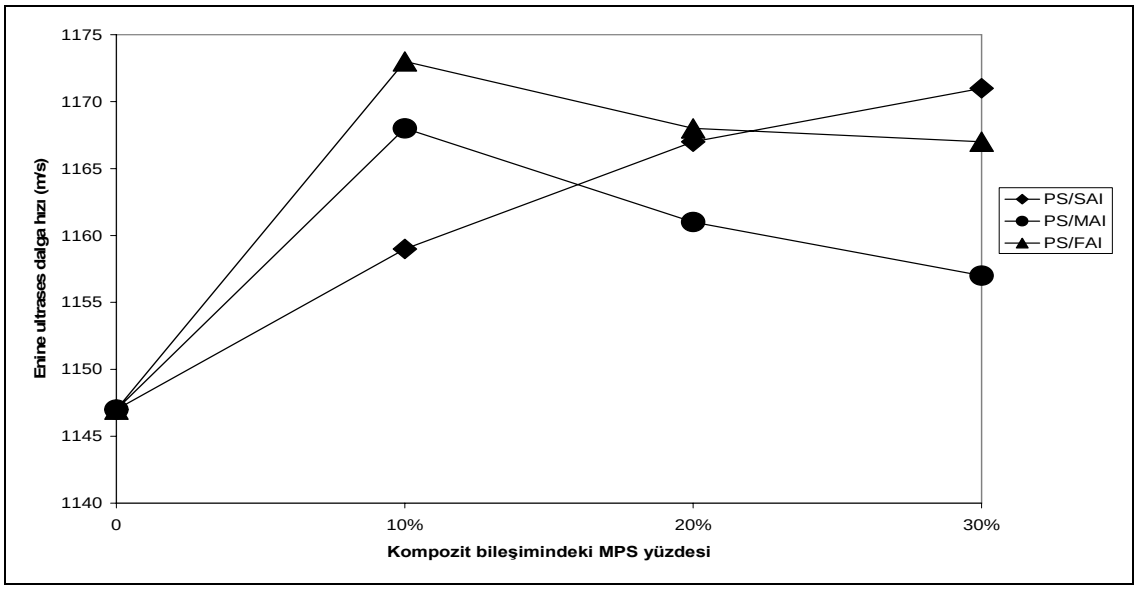
Çizelge 4.6 ve Şekil 4.15' den görüldüğü gibi saf PS_{230}' un yoğunluğu 1041 kg/m^3 iken PS_{230}' a, SAI' den kütlece % 10' luk katkı sonucu oluşan kompozitte yoğunluk 1052 kg/m^{3}' e, % 20 katkılama da 1047 kg/m^{3}' e ve % 30 katkılama da ise 1046 kg/m^{3}' e çıkmıştır. MAI' den % 10' luk katkı sonucu oluşan kompozitte yoğunluk 1038 kg/m^{3}' e düşerken % 20 katkılama da 1044 kg/m^{3}' e ve % 30 katkılama da ise 1053 kg/m^{3}' e çıkmıştır. FAI' den % 10' luk katkı sonucu oluşan kompozitte yoğunluk 1049 kg/m^{3}' e, % 20 katkılama da 1054 kg/m^{3}' e ve % 30 katkılama da ise 1046 kg/m^{3}' e çıkmıştır.



Şekil 4.16. PS_{230}' a, MPS_{500}' lerin kütlece %10, %20 ve %30 oranında eklenmesiyle oluşan kompozitlerin boyuna ultrases dalga hızları (V_b) grafiği

Çizelge 4.6 ve Şekil 4.16' dan görüldüğü gibi PS_{230}' a, MPS_{500}' lerden kütlece % 10, 20 ve 30 oranında katkılama sonucunda oluşan kompozitlerin boyuna ultrases dalga hızları PS_{230}' a göre artmıştır. PS_{230}'un boyuna ultrases dalga hızı 2344 m/s iken SAI' den kütlece % 10' luk katkı sonucu oluşan kompozitte boyuna ultrases dalga hızı 2399 m/s, % 20 katkılama da boyuna ultrases dalga hızı 2403 m/s ve % 30 katkılamada ise 2409 m/s'ye çıkmıştır. MAI' den % 10'luk katkı sonucu oluşan kompozitte boyuna ultrases dalga hızı 2404 m/s' ye çıktıktan sonra % 20 katkılama da 2398 m/s' ye ve % 30 katkılamada ise 2393 m/s' ye düşmüştür. FAI' den % 10'luk katkı sonucu oluşan kompozitte boyuna ultrases dalga hızı 2399 m/s'ye çıktıktan sonra % 20 katkılamada 2394 m/s' ye ve % 30 katkılamada ise 2390 m/s'ye düşmüştür.

Bu sonuçlara göre boyuna ultrases dalga hızı PS_{230}' a yapılan SAI katkılama yüzdesi ile doğru orantılı olarak artmaktadır. MAI ve FAI'in % 10 katkılaması boyuna ultrases dalga hızını arttırırken % 10'dan sonraki katkılamalarda katkılama oranı arttıkça boyuna ultrases hızı azalmıştır.

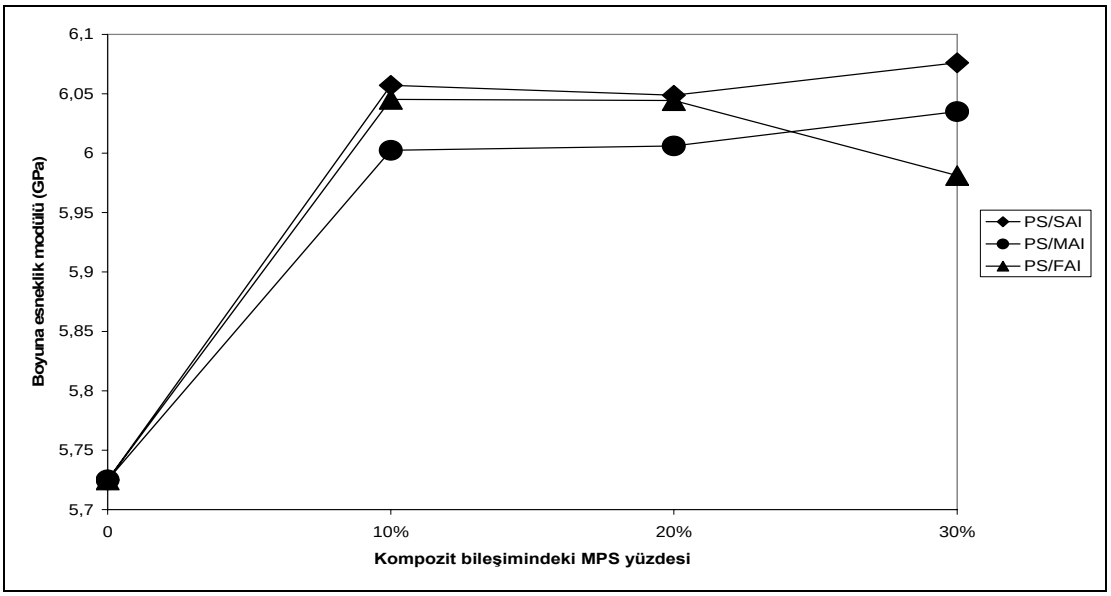


Şekil 4.17. PS_{230}' a, MPS_{500}' lerin kütlece % 10, 20 ve 30 oranında eklenmesiyle oluşan kompozitlerin enine ultrases dalga hızları (V_e) grafiği

Çizelge 4.6 ve Şekil 4.17' den görüldüğü gibi PS_{230}' a, MPS_{500}' lerden kütlece % 10, 20 ve 30 oranında katkılama sonucunda oluşan kompozitlerin enine ultrases dalga hızları PS_{230}' a göre artmıştır. PS_{230}' un enine ultrases dalga hızı 1147 m/s iken SAI' den kütlece % 10' luk katkı sonucu oluşan kompozitte enine ultrases dalga hızı 1159 m/s, % 20 katkılamada enine ultrases dalga hızı 1167 m/s ve % 30 katkılamada ise 1171

m/s' ye çıkmıştır. MAI' den % 10' luk katkı sonucu oluşan kompozitte enine ultrases dalga hızı 1168 m/s' ye çıktıktan sonra % 20 katkılamada 1161 m/s' ye ve % 30 katkılamada ise 1157 m/s' ye düşmüştür. FAI' den % 10' luk katkı sonucu oluşan kompozitte enine ultrases dalga hızı 1173 m/s' ye çıktıktan sonra % 20 katkılamada 1168 m/s' ye ve % 30 katkılamada ise 1167 m/s' ye düşmüştür.

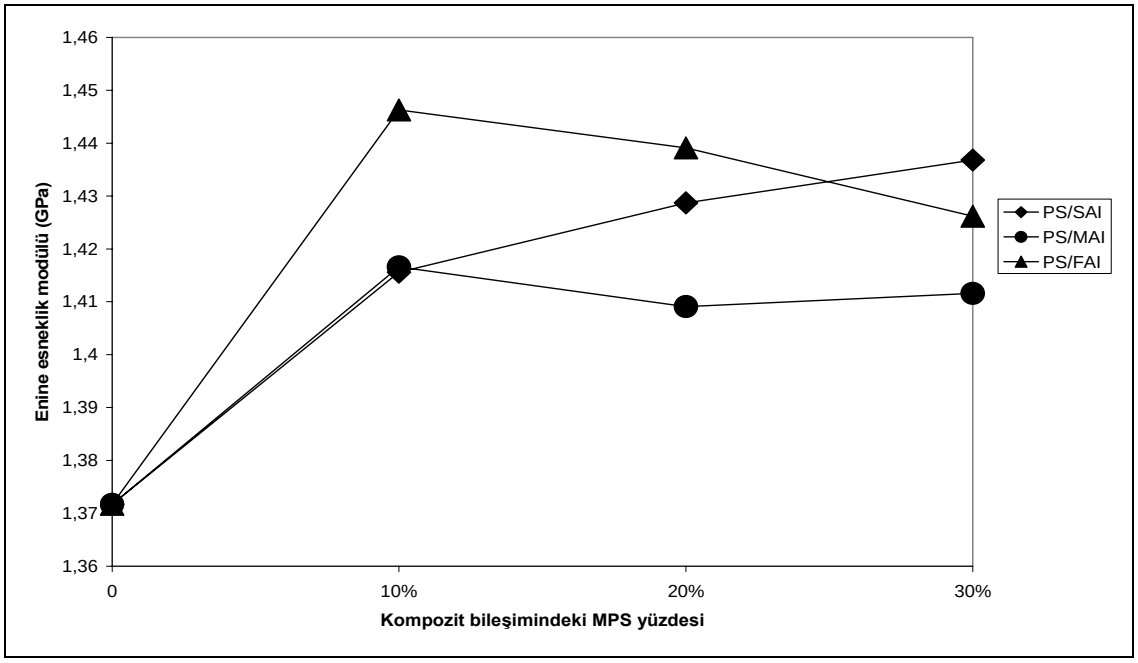
Şekil 4.17 verilerine göre enine ultrases dalga hızı PS_{230}' a yapılan SAI katkılama yüzdesi ile doğru orantılı olarak artmaktadır. PS_{230}' a kütlece hem %10 hem de %20' lik MPS katkısında en büyük enine ultrases dalga hızları FAI katkısında elde edilmiştir. Kütlece %30' luk MPS katkısında ise en büyük hız SAI katkısında elde edilmiştir. Enine ultrases dalga hızı MAI ve FAI'in % 10 katkılaması ile artarken % 10' dan sonraki artan yüzde oranları ile azalmaktadır.



Şekil 4.18. PS_{230}' a, MPS_{500}' lerin kütlece %10, 20 ve 30 oranında eklenmesiyle oluşan kompozitlerin boyuna esneklik modülleri (L) grafiği

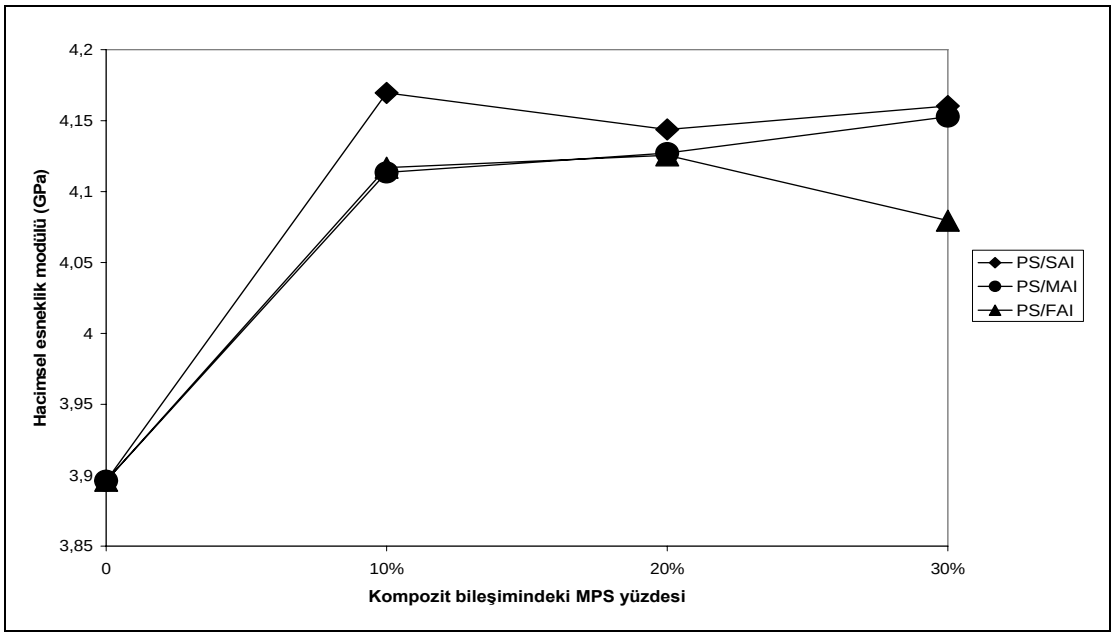
Çizelge 4.7 ve Şekil 4.18' den görüldüğü gibi PS_{230}' un boyuna esneklik modülü 5,725 GPa iken SAI'den kütlece % 10' luk katkı sonucu oluşan kompozitte boyuna esneklik modülü 6,057 GPa' a, kütlece % 20' lik katkı sonucu oluşan kompozitte boyuna esneklik modülü 6,048 GPa' a ve kütlece % 30' luk katkı sonucu oluşan kompozitte boyuna esneklik modülü ise 6,076 GPa' a çıkmıştır. MAI'den kütlece % 10' luk katkı sonucu oluşan kompozitte boyuna esneklik modülü 6,002 GPa' a, kütlece % 20' lik katkı sonucu oluşan kompozitte 6,006 GPa' a ve kütlece % 30' luk katkı sonucu oluşan kompozitte ise 6,034 GPa' a çıkmıştır. FAI' den kütlece % 10' luk katkı sonucu oluşan

kompozitte boyuna esneklik modülü 6,045 GPa' a, kütlece % 20' lik katkı sonucu oluşan kompozitte 6,044 GPa' a ve kütlece % 30' luk katkı sonucu oluşan kompozitte ise 5,981 GPa' a düşmüştür. Bu bulgulara göre PS_{230}:MPS_{500} karışımından elde edilen kompozitler içerisinde en büyük boyuna esneklik modülü değeri 6,446 GPa ile PS_{230}:SAI oranı 70:30 olan kompozitte elde edilmiştir.



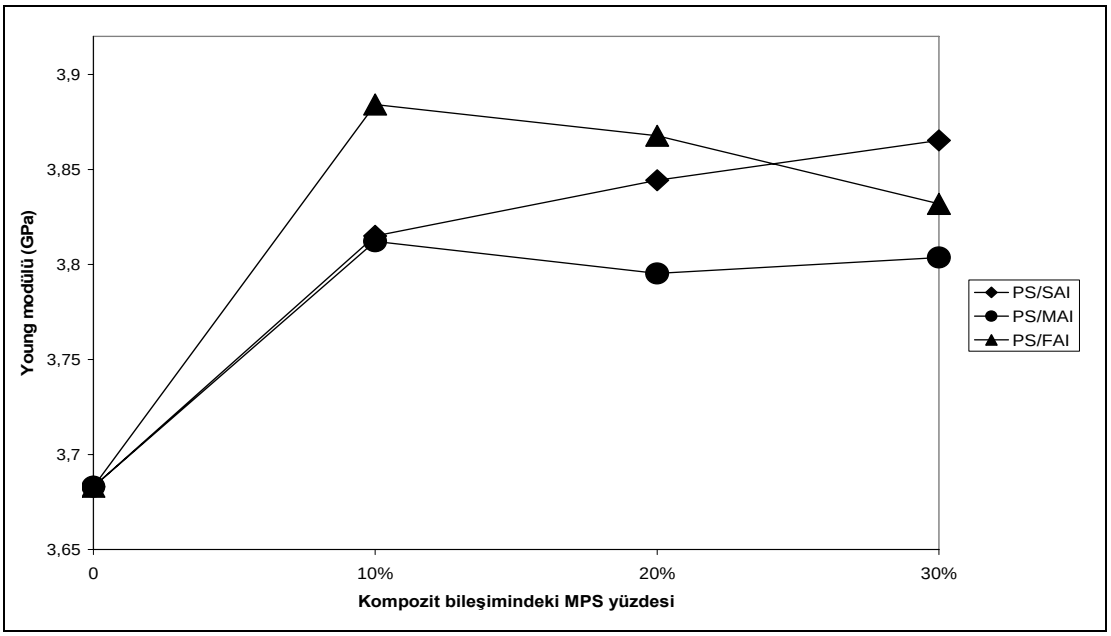
Şekil 4.19. PS_{230}' a, MPS_{500}' lerin kütlece % 10, 20 ve 30 oranında eklenmesiyle oluşan kompozitlerin enine esneklik modülleri (G) grafiği

Çizelge 4.7 ve Şekil 4.19'dan görüldüğü gibi PS_{230}' un enine esneklik modülü 1,371 GPa iken SAI'den kütlece % 10' luk katkı sonucu oluşan kompozitte enine esneklik modülü 1,415 GPa'a, kütlece % 20' lik katkı sonucu oluşan kompozitte 1,428 GPa' a ve kütlece % 30' luk katkı sonucu oluşan kompozitte ise 1,436 GPa' a çıkmıştır. MAI'den kütlece %10'luk katkı sonucu oluşan kompozitte enine esneklik modülü 1,416 GPa' a, kütlece % 20' lik katkı sonucu oluşan kompozitte 1,409 GPa' a ve kütlece % 30' luk katkı sonucu oluşan kompozitte ise 1,411 GPa' a çıkmıştır. FAI'den kütlece %10'luk katkı sonucu oluşan kompozitte enine esneklik modülü 1,446 GPa' a çıktıktan sonra kütlece % 20' lik katkı sonucu oluşan kompozitte 1,439 GPa' a ve kütlece % 30' luk katkı sonucu oluşan kompozitte ise 1,426 GPa' a çıkmıştır. Buna göre PS_{230}:MPS_{500} karışımından elde edilen kompozitler içerisinde en büyük enine esneklik modülü değeri 1,446 GPa ile PS_{230}:FAI oranı 90:10 olan kompozitte elde edilmiştir.



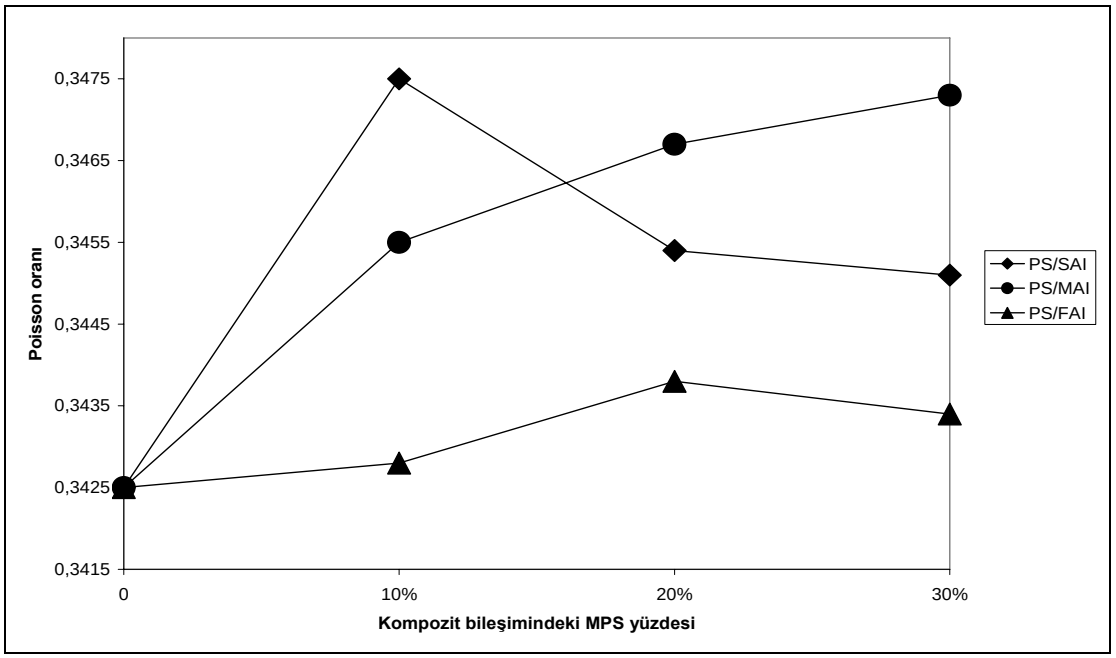
Şekil 4.20. PS_{230}' a, MPS_{500}' lerin kütlece % 10, 20 ve 30 oranında eklenmesiyle oluşan kompozitlerin hacimsel esneklik modülleri (K) grafiği

Çizelge 4.7 ve Şekil 4.20' den görüldüğü gibi PS_{230}' un hacimsel esneklik modülü 3,896 GPa iken SAI'den kütlece % 10' luk katkı sonucu oluşan kompozitte hacimsel esneklik modülü 4,169 GPa' a, kütlece % 20' lik katkı sonucu oluşan kompozitte 4,143 GPa' a ve kütlece % 30' luk katkı sonucu oluşan kompozitte ise 4,160 GPa' a çıkmıştır. MAI' den kütlece % 10' luk katkı sonucu oluşan kompozitte hacimsel esneklik modülü 4,113' a, kütlece % 20' lik katkı sonucu oluşan kompozitte 4,127 GPa' a ve kütlece % 30' luk katkı sonucu oluşan kompozitte ise 4,152 GPa' a çıkmıştır. FAI' den kütlece % 10' luk katkı sonucu oluşan kompozitte hacimsel esneklik modülü 4,116 GPa' a, kütlece % 20' lik katkı sonucu oluşan kompozitte 4,125 GPa'a ve kütlece % 30' luk katkı sonucu oluşan kompozitte ise 4,079 GPa' a çıkmıştır. Buna göre PS_{230}:MPS_{500} karışımından elde edilen kompozitler içerisinde en büyük hacimsel esneklik modülü değeri 4,1696 GPa ile PS230:SAI oranı 90:10 olan kompozitte elde edilmiştir. En küçük hacimsel esneklik modülü değeri 4,0795 GPa ile PS_{230}:FAI oranı 70:30 olan kompozitte elde edilmiştir.



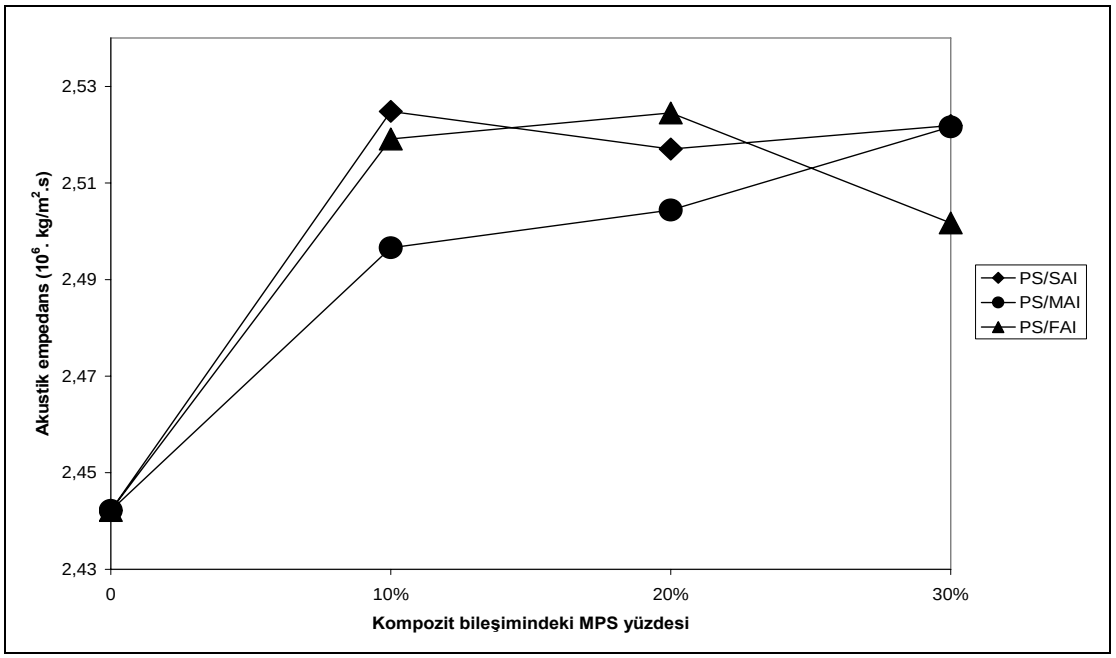
Şekil 4.21. PS_{230}' a, MPS_{500}' lerin kütlece % 10, 20 ve 30 oranında eklenmesiyle oluşan kompozitlerin Young modülleri (E) grafiği

Çizelge 4.7 ve Şekil 4.21' den görüldüğü gibi PS_{230}' un Young modülü 3,683 GPa iken SAI'den kütlece % 10' luk katkı sonucu oluşan kompozitte Young modülü 3,815' a, kütlece % 20' lik katkı sonucu oluşan kompozitte 3,8443 GPa'a ve kütlece % 30' luk katkı sonucu oluşan kompozitte ise 3,865 GPa'a çıkmıştır. MAI'den kütlece % 10' luk katkı sonucu oluşan kompozitte Young modülü 3,812 GPa'a, kütlece % 20' lik katkı sonucu oluşan kompozitte 3,795 GPa'a ve kütlece % 30' luk katkı sonucu oluşan kompozitte ise 3,803 GPa'a çıkmıştır. FAI'den kütlece % 10' luk katkı sonucu oluşan kompozitte Young modülü 3,884 GPa'a, kütlece % 20' lik katkı sonucu oluşan kompozitte 3,867 GPa'a ve kütlece % 30' luk katkı sonucu oluşan kompozitte ise 3,831 GPa' a çıkmıştır. Bu verilere göre PS_{230}:MPS_{500} karışımından elde edilen kompozitler içerisinde en büyük Young modülü değeri 3,884 GPa ile PS_{230}:FAI oranı 90:10 olan kompozitte elde edilmiştir.



Şekil 4.22. PS_{230}' a, MPS_{500}' lerin kütlece % 10, 20 ve 30 oranında eklenmesiyle oluşan kompozitlerin Poisson oranları (μ) grafiği

Çizelge 4.7 ve Şekil 4.22' den görüldüğü gibi PS_{230}' un Poisson oranı 0,3425 iken SAI'den kütlece % 10' luk katkı sonucu oluşan kompozitte Poisson oranı 0,3475' e, kütlece % 20 katkı sonucu oluşan kompozitte Poisson oranı 0,3454' e ve kütlece % 30 katkı sonucu oluşan kompozitte Poisson oranı 0,3451'e çıkmıştır. MAI'den kütlece % 10' luk katkı sonucu oluşan kompozitte Poisson oranı 0,3455' e, kütlece % 20 katkı sonucu oluşan kompozitte Poisson oranı 0,3467' ye ve kütlece % 30 katkı sonucu oluşan kompozitte Poisson oranı 0,3473' e yükselmiştir. FAI' den kütlece % 10' luk katkı sonucu oluşan kompozitte Poisson oranı 0,3428' e, kütlece % 20 katkı sonucu oluşan kompozitte Poisson oranı 0,3438' e ve kütlece % 30 katkı sonucu oluşan kompozitte Poisson oranı 0,3434' e çıkmıştır. Bu verilere göre PS_{230}:MPS_{500} karışımından elde edilen kompozitler içerisinde en büyük Poisson oranı değeri 0,3475 GPa ile PS_{230}:SAI oranı 90:10 olan kompozitte elde edilmiştir. En küçük Poisson oranı değeri 0,3434 GPa ile PS_{230}:FAI oranı 70:30 olan kompozitte elde edilmiştir.



Şekil 4.23. PS_{230}' a, MPS_{500}' lerin kütlece % 10, 20 ve 30 oranında eklenmesiyle oluşan kompozitlerin akustik empedansları (Z) grafiği

Çizelge 4.7 ve Şekil 4.23' den görüldüğü gibi PS_{230}'un akustik empedansı 2,442.10^6 kg/m^2.s iken SAI'den kütlece % 10' luk katkı sonucu oluşan kompozitte akustik empedans 2,524. 10^6 kg/m^2.s' ye, kütlece % 20' lik katkı sonucu oluşan kompozitte akustik empedans 2,517.10^6 kg/m^2.s' ye ve kütlece % 30' luk katkı sonucu oluşan kompozitte akustik empedans 2,521.10^6 kg/m^2.s'ye çıkmıştır. MAI' den kütlece % 10' luk katkı sonucu oluşan kompozitte akustik empedans 2,496.10^6 kg/m^2.s'ye kütlece % 20' lik katkı sonucu oluşan kompozitte akustik empedans 2,504.10^6 kg/m^2.s'ye ve kütlece % 30' luk katkı sonucu oluşan kompozitte akustik empedans 2,521.10^6 kg/m^2.s' ye çıkmıştır. FAI'den kütlece % 10' luk katkı sonucu oluşan kompozitte akustik empedans 2,519.10^6 kg/m^2.s' ye, kütlece % 20' lik katkı sonucu oluşan kompozitte 2,524.10^6 kg/m^2.s' ye ve kütlece % 30' luk katkı sonucu oluşan kompozitte 2,501.10^6 kg/m^2.s' ye çıkmıştır. Bu verilere göre PS_{230}:MPS_{500} karışımından elde edilen kompozitler içerisinde en büyük akustik empedans değeri 2,524.10^6 kg/m^2.s ile PS_{230}:SAI oranı 90:10 olan kompozitte ve PS_{230}:FAI oranı 80:20 olan kompozitte elde edilmiştir.

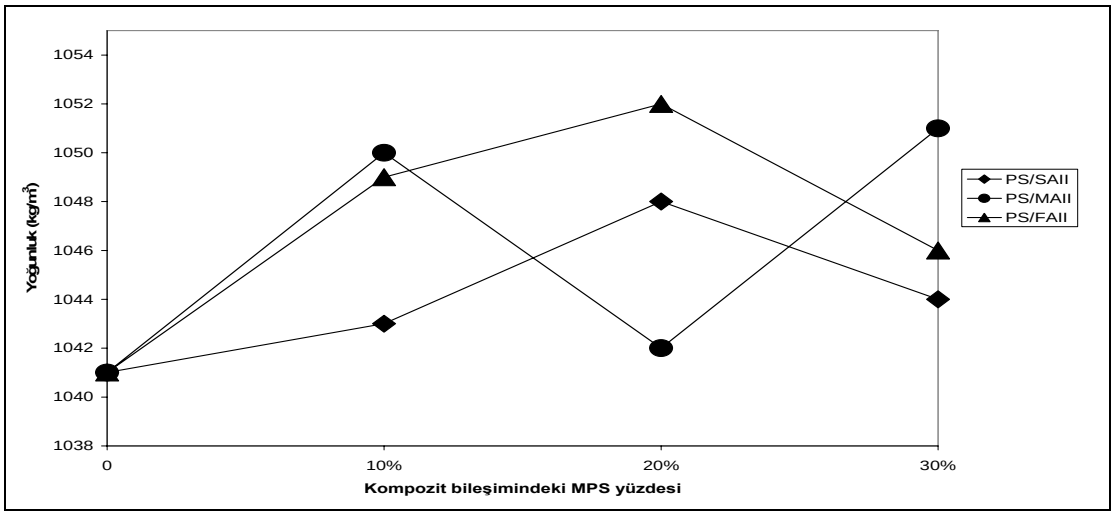
4.5. KPS_{350} Kompozitlerinden Elde Edilen Bulgular

Çizelge 4.8. MPS_{350}' lerin kütlece % 10, 20 ve 30 oranlarında PS_{230}'a eklenmesiyle oluşan kompozitlere ait yoğunluk (ρ), boyuna ses dalga hızı (V_b) ve enine ses dalga hızı (V_e) değerleri

Bileşim %'si, kütlece		ρ (kg/m^3)	V_b (m/s)	V_e (m/s)
PS_{230}:SAII	100:0	1041	2344± 0,04	1147± 0,04
	90:10	1043	2398± 0,03	1171± 0,03
	80:20	1048	2404± 0,04	1176± 0,04
	70:30	1044	2407± 0,03	1185± 0,04
PS_{230}:MAII	100:0	1041	2344± 0,04	1147± 0,04
	90:10	1050	2406± 0,05	1168± 0,05
	80:20	1042	2395± 0,04	1160± 0,03
	70:30	1051	2387± 0,03	1157± 0,04
PS_{230}:FAII	100:0	1041	2344± 0,04	1147± 0,04
	90:10	1049	2405± 0,03	1171± 0,03
	80:20	1052	2396± 0,04	1164± 0,04
	70:30	1046	2388± 0,03	1163± 0,03

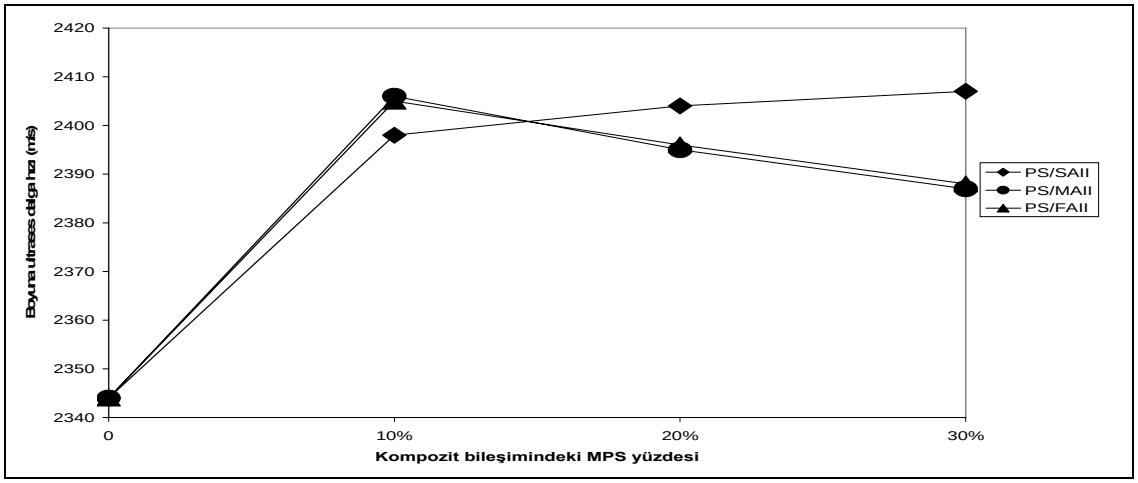
Çizelge 4.9. MPS_{350}' lerin kütlece % 10, 20 ve 30 oranlarında PS_{230}' a eklenmesiyle oluşan kompozitlere ait Poisson Oranı (μ), boyuna esneklik modülü (L), enine esneklik modülü (G), hacimsel esneklik modülü (K), Young modülü (E) ve akustik empedans (Z) değerleri

Bileşim %'si, kütlece		μ	L (GPa)	G(GPa)	K(GPa)	E(GPa)	Z(10^6 kg/m^2.s)
PS_{230}:SAII	100:0	0,3425± 0,01	5,725± 0,04	1,371± 0,03	3,896± 0,04	3,683± 0,06	2,442± 0,04
	90:10	0,3435± 0,02	6,004± 0,03	1,431± 0,04	4,095± 0,04	3,845± 0,05	2,502± 0,03
	80:20	0,3427± 0,03	6,066± 0,04	1,451± 0,03	4,131± 0,05	3,898± 0,07	2,522± 0,04
	70:30	0,3400± 0,02	6,055± 0,03	1,467± 0,02	4,098± 0,04	3,934± 0,06	2,515± 0,04
PS_{230}:MAII	100:0	0,3425± 0,01	5,725± 0,04	1,371± 0,03	3,896± 0,04	3,683± 0,06	2,442± 0,04
	90:10	0,3457± 0,03	6,082± 0,04	1,434± 0,02	4,169± 0,05	3,860± 0,06	2,527± 0,04
	80:20	0,3466± 0,02	5,983± 0,03	1,404± 0,03	4,110± 0,04	3,783± 0,05	2,497± 0,03
	70:30	0,3463± 0,03	5,989± 0,03	1,408± 0,04	4,111± 0,05	3,791± 0,05	2,508± 0,03
PS_{230}:FAII	100:0	0,3425± 0,01	5,725± 0,04	1,371± 0,03	3,896± 0,04	3,683± 0,06	2,442± 0,04
	90:10	0,3447± 0,02	6,076± 0,03	1,440± 0,03	4,156± 0,05	3,873± 0,05	2,525± 0,03
	80:20	0,3456± 0,03	6,043± 0,04	1,425± 0,04	4,142± 0,04	3,837± 0,06	2,521± 0,04
	70:30	0,3444± 0,02	5,971± 0,03	1,417± 0,03	4,081± 0,04	3,810± 0,07	2,499± 0,04



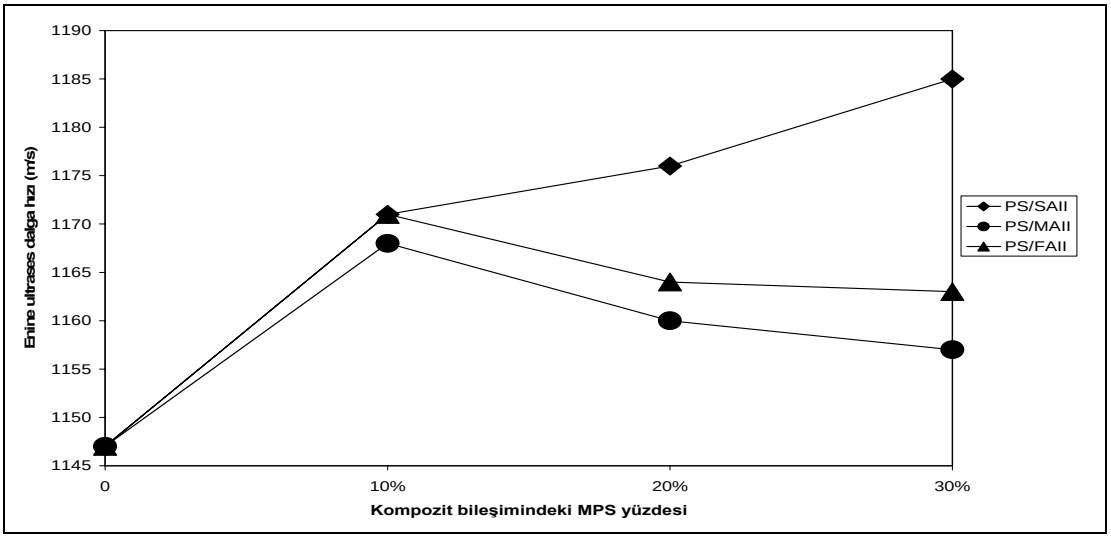
Şekil 4.24. PS_{230}' a, MPS_{350}' lerin kütlece % 10, 20 ve 30 oranında eklenmesiyle oluşan kompozitlerin yoğunlukları grafiği

Çizelge 4.8 ve Şekil 4.24' den görüldüğü gibi PS_{230}' un yoğunluğu 1041 kg/m^3 iken SAII'den % 10' luk katkı sonucu oluşan kompozitte yoğunluk 1043 kg/m^3, %20 katkılama da 1048 kg/m^3 ve % 30 katkılama da ise 1044 kg/m^3' e çıkmıştır. MAII'den % 10' luk katkı sonucu oluşan kompozitte yoğunluk 1050 kg/m^3' e, % 20 katkılama da 1042 kg/m^3' e ve % 30 katkılama da ise 1051 kg/m^3' e çıkmıştır. FAII'den % 10' luk katkı sonucu oluşan kompozitte yoğunluk 1049 kg/m^3' e, % 20 katkılama da 1052 kg/m^3' e ve % 30 katkılama da ise 1046 kg/m^3' e çıkmıştır. Bu verilere göre PS_{230}:MPS_{350} karışımından elde edilen kompozitler içerisinde en büyük yoğunluk değeri 1052 kg/m^3 ile PS_{230}:FAII oranı 80:20 olan kompozitte elde edilmiştir. En küçük yoğunluk değeri 1042 kg/m^3 ile PS_{230}:MAII oranı 80:20 olan kompozitte elde edilmiştir.



Şekil 4.25. PS_{230}'a, MPS_{350}' lerin % 10, 20 ve 30 oranında eklenmesiyle oluşan kompozitlerin boyuna ultrases dalga hızları (V_b) grafiği

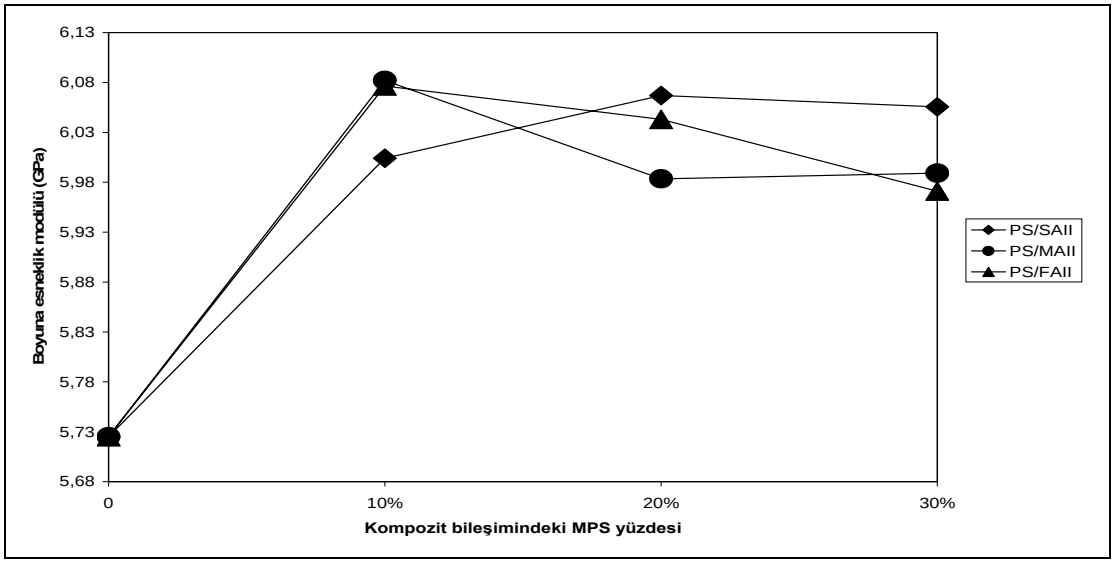
Çizelge 4.8 ve Şekil 4.25' den görüldüğü gibi PS_{230}' a, MPS_{350}' lerden % 10, 20 ve 30 oranında katkılama sonucunda oluşan kompozitlerin boyuna ultrases dalga hızları PS_{230}' a göre artmıştır. PS_{230}' un boyuna ultrases dalga hızı 2344 m/s iken SAII'den %10'luk katkı sonucu oluşan kompozitte boyuna ultrases dalga hızı 2398 m/s, %20 katkılama da boyuna ultrases dalga hızı 2404 m/s ve % 30 katkılama da ise 2407 m/s' ye çıkmıştır. MAII'den % 10' luk katkı sonucu oluşan kompozitte boyuna ultrases dalga hızı 2406 m/s' ye çıktıktan sonra % 20 katkılama da 2395 m/s' ye ve %30 katkılama da ise 2387 m/s' ye düşmüştür. FAII' den % 10' luk katkı sonucu oluşan kompozitte boyuna ultrases dalga hızı 2405 m/s' ye çıktıktan sonra % 20 katkılama da 2396 m/s' ye ve % 30 katkılama da ise 2388 m/s' ye düşmüştür. Bu verilere göre PS_{230}:MPS_{350} karışımından elde edilen kompozitler içerisinde en büyük boyuna ultrases dalga hızı 2407 m/s ile PS_{230}:SAII oranı 70:30 olan kompozitte elde edilmiştir. En küçük boyuna ultrases dalga hızı 2387 m/s ile PS_{230}:MAII oranı 70:30 olan kompozitte elde edilmiştir.



Şekil 4.26. PS_{230}'a, MPS_{350}' lerin kütlece % 10, 20 ve 30 oranında eklenmesiyle oluşan kompozitlerin enine ultrases dalga hızları (V_e) grafiği

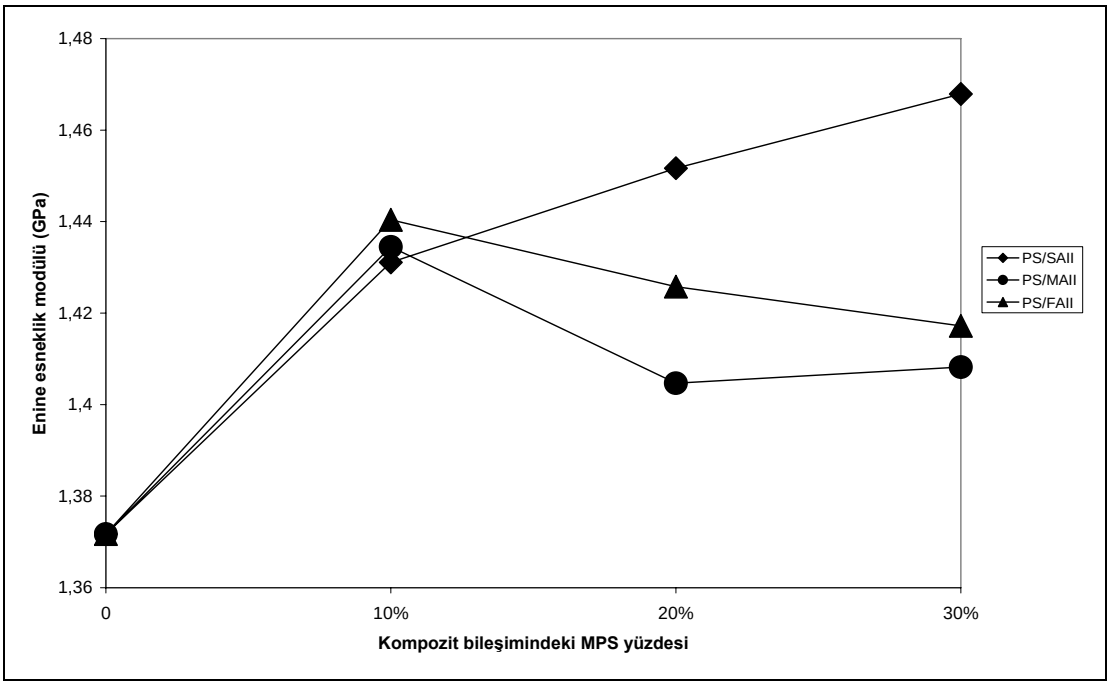
Çizelge 4.8 ve Şekil 4.26' dan görüldüğü gibi PS_{230}' a, MPS_{350}' lerden kütlece % 10, 20 ve 30 oranında katkılama sonucunda oluşan kompozitlerin enine ultrases dalga hızları PS_{230}' a göre artmıştır. PS_{230}' un enine ultrases dalga hızı 1147 m/s iken SAII'den % 10' luk katkı sonucu oluşan kompozitte enine ultrases dalga hızı 1171,14 m/s, % 20 katkılama da enine ultrases dalga hızı 1176 m/s ve % 30 katkılama da ise 1185 m/s' ye çıkmıştır. MAII'den % 10' luk katkı sonucu oluşan kompozitte enine ultrases dalga hızı 1168 m/s' ye çıktıktan sonra % 20 katkılama da 1160 m/s' ye ve %

30 katkılama da ise 1157 m/s' ye düşmüştür. FAII'den % 10' luk katkı sonucu oluşan kompozitte enine ultrases dalga hızı 1171 m/s' ye çıktıktan sonra % 20 katkılama da 1164 m/s' ye ve % 30 katkılama da ise 1163 m/s' ye düşmüştür. Bu verilere göre PS_{230}:MPS_{350} karışımından elde edilen kompozitler içerisinde en büyük enine ultrases dalga hızı 1185 m/s ile PS_{230}:SAII oranı 70:30 olan kompozitte elde edilmiştir. En küçük enine ultrases dalga hızı 1157 m/s ile PS_{230}:MAII oranı 70:30 olan kompozitte elde edilmiştir.



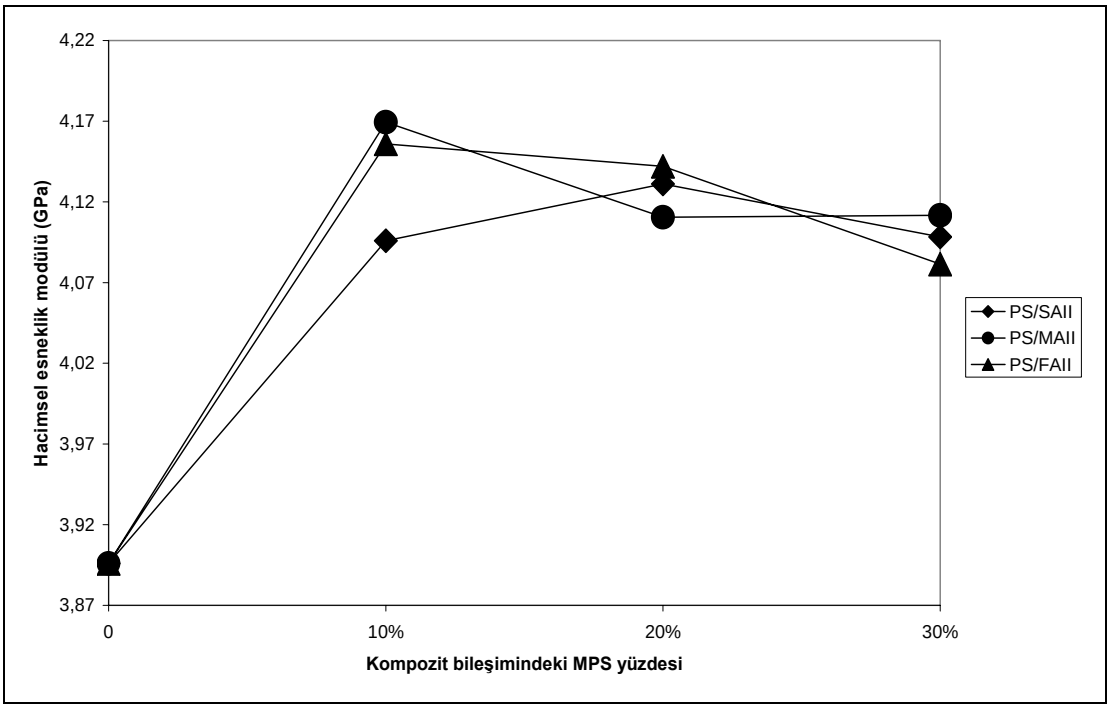
Şekil 4.27. PS_{230}'a, MPS_{350}' lerin kütlece % 10, 20 ve 30 oranında eklenmesiyle oluşan kompozitlerin boyuna esneklik modülleri (L) grafiği

Çizelge 4.9 ve Şekil 4.27' den görüldüğü gibi PS_{230}'un boyuna esneklik modülü 5,725 GPa iken SAII'den kütlece % 10' luk katkı sonucu oluşan kompozitte boyuna esneklik modülü 6,004 GPa' a kütlece % 20' lik katkı sonucu oluşan kompozitte 6,066 GPa' a ve kütlece % 30' luk katkı sonucu oluşan kompozitte ise 6,055 GPa' a çıkmıştır. MAII' den kütlece % 10' luk katkı sonucu oluşan kompozitte boyuna esneklik modülü 6,082 GPa'a, kütlece % 20' lik katkı sonucu oluşan kompozitte 5,983 GPa' a ve kütlece % 30' luk katkı sonucu oluşan kompozitte ise 5,989 GPa'a çıkmıştr. FAII'den kütlece % 10' luk katkı sonucu oluşan kompozitte boyuna esneklik modülü 6,076 GPa'a, kütlece % 20' lik katkı sonucu oluşan kompozitte 6,043 GPa' a ve kütlece % 30' luk katkı sonucu oluşan kompozitte ise 5,971 GPa'a çıkmıştır. Bu verilere göre PS_{230}:MPS_{350} karışımından elde edilen kompozitler içerisinde en büyük boyuna esneklik modülü 6,082 GPa ile PS_{230}:MAII oranı 90:10 olan kompozitte elde edilmiştir. En küçük boyuna esneklik modülü 5,971 GPa ile PS_{230}:FAII oranı 70:30 olan kompozitte elde edilmiştir.



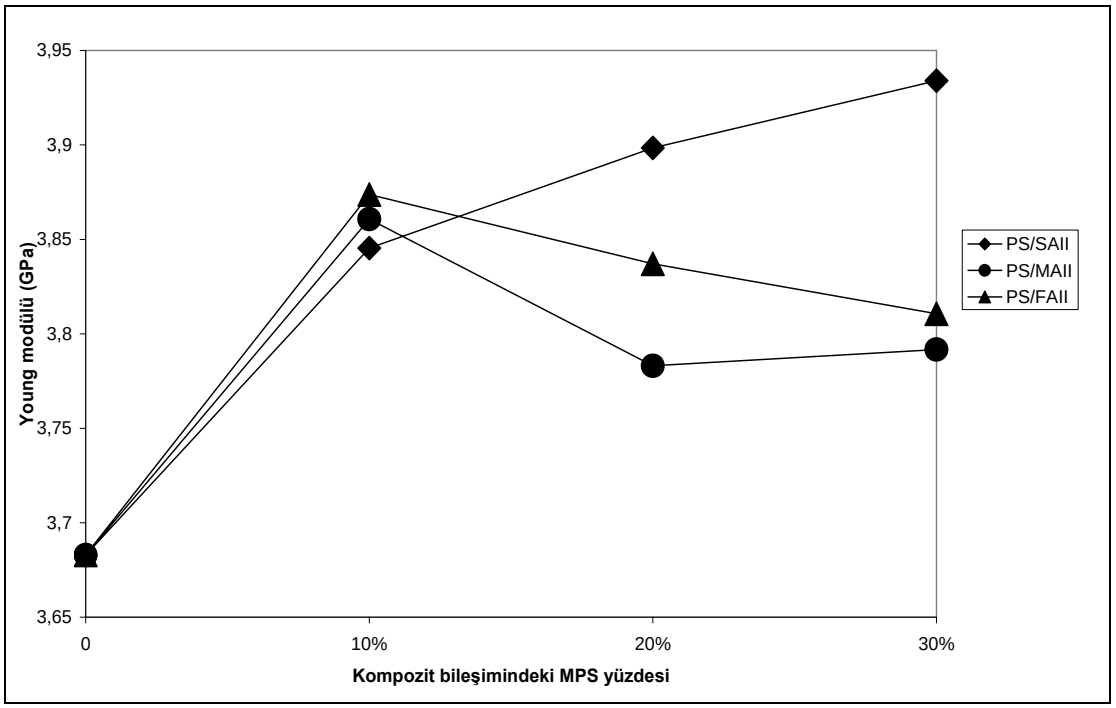
Şekil 4.28. PS_{230}'a, MPS_{350}' lerin kütlece % 10, 20 ve 30 oranında eklenmesiyle oluşan kompozitlerin enine esneklik modülleri (G) grafiği

Çizelge 4.9 ve Şeki 428' den görüldüğü gibi PS_{230}'un enine esneklik modülü 1,371 GPa iken SAII'den kütlece % 10' luk katkı sonucu oluşan kompozitte enine esneklik modülü 1,431 GPa' a, kütlece % 20' lik katkı sonucu oluşan kompozitte 1,451 GPa' a ve kütlece % 30' luk katkı sonucu oluşan kompozitte 1,467 GPa' a çıkmıştır. MAII' den kütlece % 10' luk katkı sonucu oluşan kompozitte enine esneklik modülü 1,434 GPa' a, kütlece % 20' lik katkı sonucu oluşan kompozitte 1,404 GPa' a ve kütlece % 30' luk katkı sonucu oluşan kompozitte 1,408 GPa' a çıkmıştır. FAII'den kütlece % 10' luk katkı sonucu oluşan kompozitte enine esneklik modülü 1,440 GPa' a, kütlece % 20' lik katkı sonucu oluşan kompozitte 1,425 GPa' a ve kütlece % 30' luk katkı sonucu oluşan kompozitte 1,417 GPa' a çıkmıştır. Bu verilere göre PS_{230}:MPS_{350} karışımından elde edilen kompozitler içerisinde en büyük enine esneklik modülü 1,467 GPa ile PS_{230}:SAII oranı 70:30 olan kompozitte elde edilmiştir. En küçük enine esneklik modülü 1,404 GPa ile PS_{230}:MAII oranı 80:20 olan kompozitte elde edilmiştir.



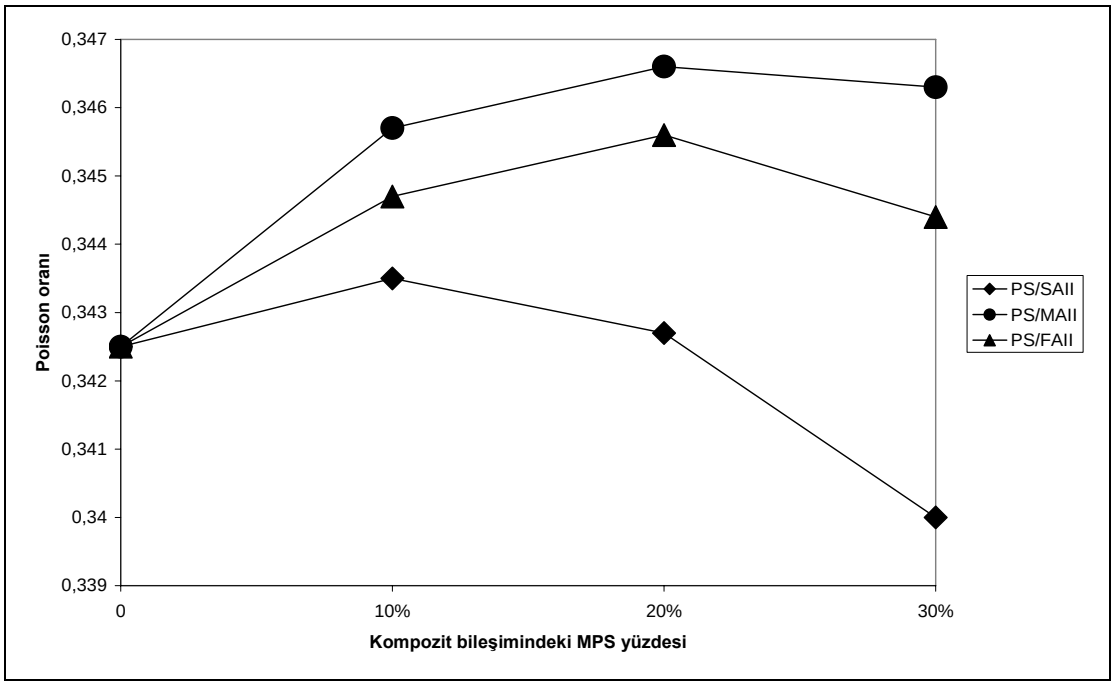
Şekil 4.29. PS_{230}'a, MPS_{350}' lerin kütlece % 10, 20 ve 30 oranında eklenmesiyle oluşan kompozitlerin hacimsel esneklik modülleri (K) grafiği

Çizelge 4.9 ve Şekil 4.29' dan görüldüğü gibi PS_{230}' un hacimsel esneklik modülü 3,896 GPa iken SAII' den kütlece % 10' luk katkı sonucu oluşan kompozitte hacimsel esneklik modülü 4,095 GPa' a, % kütlece % 20' lik katkı sonucu oluşan kompozitte 4,131 GPa' a ve kütlece % 30' luk katkı sonucu oluşan kompozitte 4,098 GPa' a çıkmıştır. MAII' den kütlece % 10' luk katkı sonucu oluşan kompozitte hacimsel esneklik modülü 4,169 GPa'a, kütlece %20'lik katkı sonucu oluşan kompozitte 4,110 GPa'a ve kütlece %30'luk katkı sonucu oluşan kompozitte 4,111 GPa'a çıkmıştır. FAII'den kütlece % 10' luk katkı sonucu oluşan kompozitte hacimsel esneklik modülü 4,156 GPa' a kütlece % 20' lik katkı sonucu oluşan kompozitte 4,142 GPa' a ve kütlece % 30' luk katkı sonucu oluşan kompozitte 4,081 GPa'a çıkmıştır. Bu verilere göre PS_{230}:MPS_{350} karışımından elde edilen kompozitler içerisinde en büyük hacimsel esneklik modülü 4,169 GPa ile PS_{230}:MAII oranı 90:10 olan kompozitte elde edilmiştir. En küçük hacimsel esneklik modülü 4,081 GPa ile PS_{230}:FAII oranı 70:30 olan kompozitte elde edilmiştir.



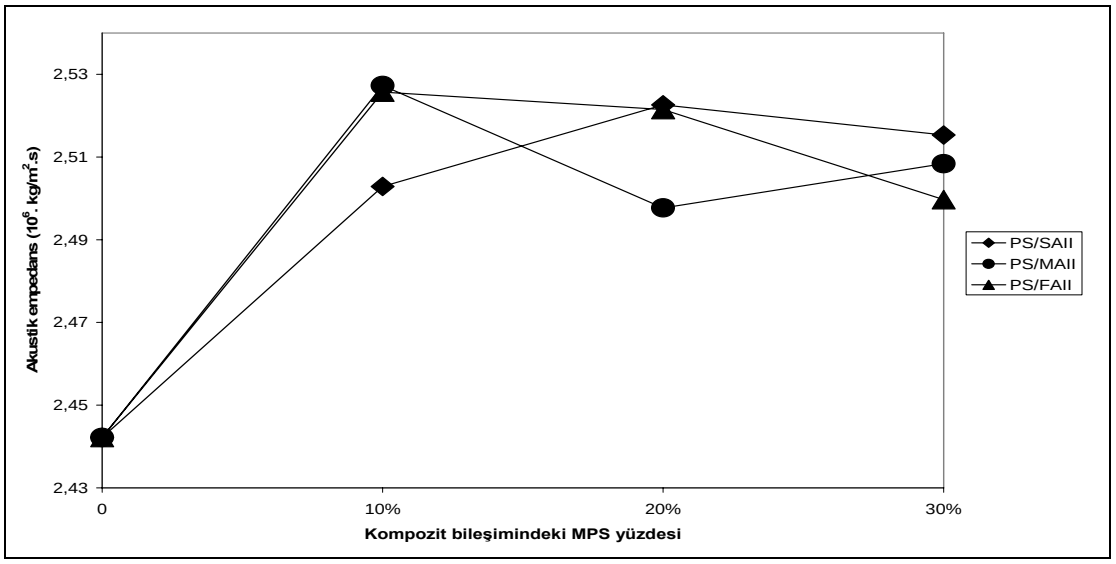
Şekil 4.30. PS_{230}' a, MPS_{350}' lerin kütlece % 10, 20 ve 30 oranında eklenmesiyle oluşan kompozitlerin Young modülleri (E) grafiği

Çizelge 4.9 ve Şekil 4.30' dan görüldüğü gibi PS_{230}'un Young modülü 3,6830 GPa iken SAII'den kütlece % 10' luk katkı sonucu oluşan kompozitte Young modülü 3,845 GPa' a, kütlece % 20' lik katkı sonucu oluşan kompozitte 3,898 GPa' a ve kütlece %30' luk katkı sonucu oluşan kompozitte 3,934 GPa' a çıkmıştır. MAII' den kütlece % 10' luk katkı sonucu oluşan kompozitte Young modülü 3,860 GPa'a, kütlece %20'lik katkı sonucu oluşan kompozitte 3,783 GPa' a ve kütlece % 30' luk katkı sonucu oluşan kompozitte ise 3,791 GPa' a çıkmıştır. FAII' den kütlece % 10' luk katkı sonucu oluşan kompozitte Young modülü 3,873 GPa' a, kütlece % 20' lik katkı sonucu oluşan kompozitte 3,837 GPa' a ve kütlece % 30' luk katkı sonucu oluşan kompozitte 3,810 GPa' a çıkmıştır. Bu verilere göre PS_{230}:MPS_{350} karışımından elde edilen kompozitler içerisinde en büyük Young modülü 3,934 GPa ile PS_{230}:SAII oranı 70:30 olan kompozitte elde edilmiştir. En küçük Young modülü 3,783 GPa ile PS_{230}:MAII oranı 80:20 olan kompozitte elde edilmiştir.



Şekil 4.31. PS_{230}' a, MPS_{350}' lerin kütlece % 10, 20 ve 30 oranında eklenmesiyle oluşan kompozitlerin Poisson oranları (μ) grafiği

Çizelge 4.9 ve Şekil 4.31' den görüldüğü gibi PS_{230}'un Poisson oranı 0,3425 iken SAII'den % 10' luk katkı sonucu oluşan kompozitte Poisson oranı 0,3435' e ve kütlece % 20 katkı sonucu oluşan kompozitte Poisson oranı 0,3427' ye çıkarken kütlece % 30 katkı sonucu oluşan kompozitte Poisson oranı 0,3400' a düşmüştür. MAII' den kütlece % 10' luk katkı sonucu oluşan kompozitte Poisson oranı 0,3457' ye, kütlece % 20 katkı sonucu oluşan kompozitte Poisson oranı 0,3466' ya ve kütlece % 30 katkı sonucu oluşan kompozitte Poisson oranı 0,3463' e yükselmiştir. FAII'den kütlece % 10' luk katkı sonucu oluşan kompozitte Poisson oranı 0,3447' ye, kütlece % 20 katkı sonucu oluşan kompozitte Poisson oranı 0,3456' ya ve kütlece % 30 katkı sonucu oluşan kompozitte Poisson oranı 0,3444' e çıkmıştır. Bu verilere göre PS_{230}:MPS_{350} karışımından elde edilen kompozitler içerisinde en büyük Poisson oranı 0,3466 ile PS_{230}:MAII oranı 80:20 olan kompozitte elde edilmiştir. En küçük Poisson oranı 0,3400 ile PS_{230}:SAII oranı 70:30 olan kompozitte elde edilmiştir.



Şekil 4.32. PS_{230}' a, MPS_{350}' lerin kütlece % 10, 20 ve 30 oranında eklenmesiyle oluşan kompozitlerin akustik empedansları (Z) grafiği

Çizelge 4.9 ve Şekil 4.32' den görüldüğü gibi PS_{230}' un akustik empedansı 2,442.10^6 kg/m^2.s iken SAII' den kütlece % 10' luk katkı sonucu oluşan kompozitte akustik empedans 2,502.10^6 kg/m^2.s' ye, kütlece % 20' lik katkı sonucu oluşan kompozitte akustik empedans 2,522.10^6 kg/m^2.s' ye ve kütlece %30' luk katkı sonucu oluşan kompozitte akustik empedans 2,515.10^6 kg/m^2.s' ye çıkmıştır. MAII' den kütlece % 10' luk katkı sonucu oluşan kompozitte akustik empedans 2,527.10^6 kg/m^2.s' ye, kütlece %20' lik katkı sonucu oluşan kompozitte akustik empedans 2,497.10^6 kg/m^2.s' ye ve kütlece %30' luk katkı sonucu oluşan kompozitte akustik empedans 2,508.10^6 kg/m^2.s' ye çıkmıştır. FAII'den kütlece % 10' luk katkı sonucu oluşan kompozitte akustik empedans 2,525.10^6 kg/m^2.s' ye, kütlece % 20' lik katkı sonucu oluşan kompozitte akustik empedans 2,521.10^6 kg/m^2.s' ye ve kütlece % 30' luk katkı sonucu oluşan kompozitte akustik empedans 2,499.10^6 kg/m^2.s' ye çıkmıştır. Bu verilere göre PS_{230}:MPS_{350} karışımından elde edilen kompozitler içerisinde en büyük akustik empedans 2,527.10^6 kg/m^2.s ile PS_{230}:MAII oranı 90:10 olan kompozitte elde edilmiştir. En küçük akustik empedans 2,497.10^6 kg/m^2.s ile PS_{230}:MAII oranı 80:20 olan kompozitte elde edilmiştir.

Saf polistirenlerin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla yapılan uygulamalardan saf polistirenlerin mekanik özelliklerini en çok iyileştirenler Young modülleri baz alınarak değerlendirilmiş, en iyi sonuç ve bileşim oranları tespit edilerek Çizelge 4.10' da verilmiştir.

Çizelge 4.10. Saf polistirenler ile MPS_{350} ve MPS_{500}, lerin kütlece %10, %20 ve %30 oranlarında PS_{230}' a eklenmesiyle oluşan kompozitlere ait Young Modülü (E) değerleri

Polimerler		**Young Modülleri (GPa)**
Saf polistirenler	PS_{230}	3,683
	PS_{350}	3,725
	PS_{500}	3,766
Modifiye polistirenler	SAI	3,848
	SAII	3,781
	MAI	3,702
	MAII	3,777
	FAI	3,967
	FAII	3,876
Polistiren kompozitler	PS_{230}:SAI (70:30)	3,865
	PS_{230}:SAII (70:30)	3,934
	PS_{230}:MAI (90:10)	3,812
	PS_{230}:MAII (90:10)	3,860
	PS_{230}:FAI (90:10)	3,884
	PS_{230}:FAII (90:10)	3,873

Çizelge 4.10 verilerine göre saf polistirenler MA, SA ve FA gibi çeşitli anhidritlerle modifiye edildiği zaman Young modüllerinde bir iyileşme olmuştur. Ancak Saf PS_{230}, modifiye polistirenlerle belli oranlarda karıştırıldığı zaman Young modülünde genel olarak daha yüksek bir artış meydana gelmiştir.

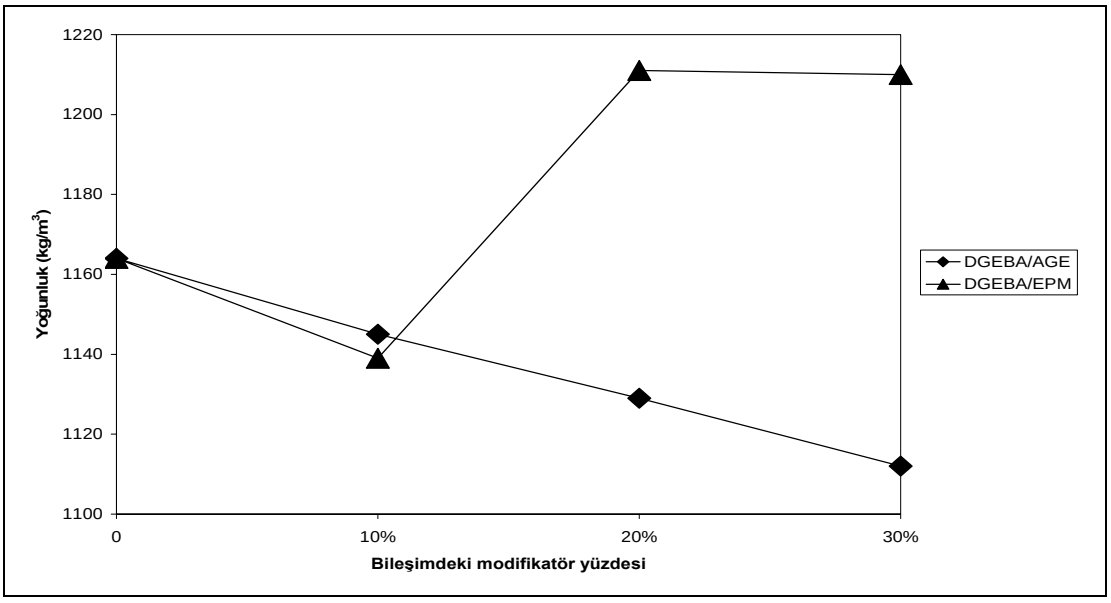
4.6. DGEBA Epoksi Reçinesinin Modifikasyonundan Elde Edilen Bulgular

Çizelge 4.11. DGEBA epoksi reçinesine, AGE ve EPM modifikatörlerinin %10, 20 ve 30 oranlarında eklenmesiyle oluşan kompozitlere ait yoğunluk (ρ), boyuna ses dalga hızı (V_b) ve enine ses dalga hızı (V_e) değerleri

Bileşim %'si, kütlece		**ρ (kg/m^3)**	**V_b (m/s)**	**V_e (m/s)**
DGEBA:AGE	100:0	1164	2160± 0,04	1048± 0,04
	90:10	1145	2448± 0,03	1133± 0,04
	80:20	1129	2861± 0,03	1210± 0,03
	70:30	1112	2552± 0,04	1184± 0,05
DGEBA:EPM	100:0	1164	2160± 0,04	1048± 0,04
	90:10	1139	2523± 0,04	1224± 0,04
	80:20	1211	2853± 0,03	1390± 0,04
	70:30	1210	2801± 0,04	1365± 0,05

Çizelge 4.12. DGEBA epoksi reçinesine, AGE ve EPM modifikatörlerinin % 10, 20 ve 30 oranlarında eklenmesiyle oluşan kompozitlere ait Poisson oranı (μ), esneklik modülleri (L, G, K, E) ve akustik empedans (Z) değerleri

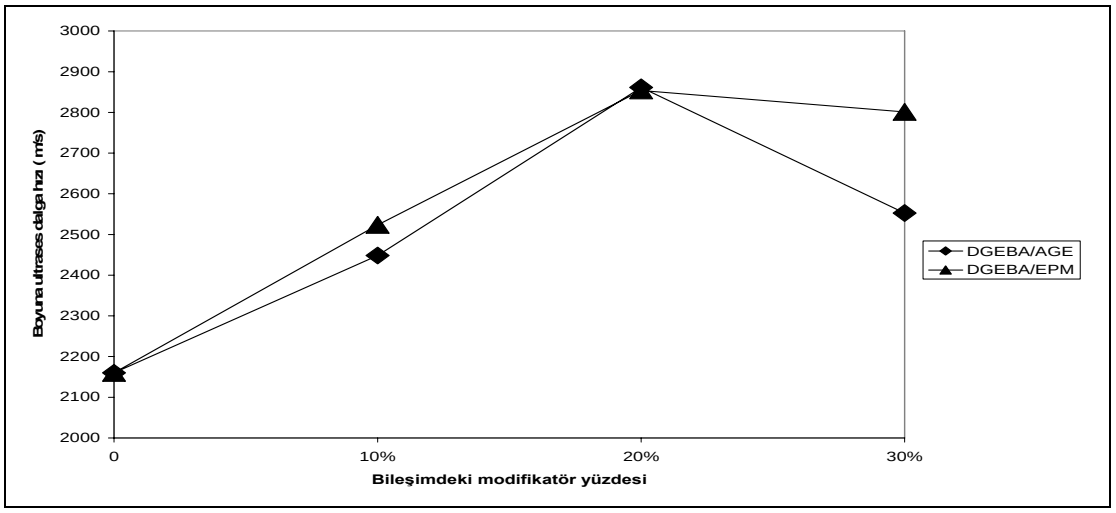
Bileşim yüzdesi%		μ	L(GPa)	G(GPa)	K(GPa)	E(GPa)	Z(10^6 kg/m^2.s)
DGEBA:AGE	100:0	0,3461± 0,01	5,430± 0,03	1,278± 0,02	3,726± 0,04	3,441± 0,05	2,514± 0,03
	90:10	0,3635± 0,02	6,867± 0,04	1,472± 0,03	4,904± 0,05	4,015± 0,04	2,804± 0,04
	80:20	0,3911± 0,02	9,249± 0,03	1,654± 0,04	7,043± 0,04	4,601± 0,06	3,232± 0,04
	70:30	0,3628± 0,01	7,250± 0,03	1,561± 0,03	5,168± 0,05	4,254± 0,05	2,840± 0,03
DGEBA:EPM	100:0	0,3461± 0,01	5,430± 0,03	1,278± 0,02	3,726± 0,04	3,441± 0,05	2,514± 0,03
	90:10	0,3460± 0,02	7,255± 0,04	1,708± 0,03	4,977± 0,05	4,598± 0,05	2,875± 0,04
	80:20	0,3445± 0,02	9,865± 0,04	2,340± 0,03	6,744± 0,05	6,293± 0,06	3,457± 0,03
	70:30	0,3441± 0,01	9,495± 0,03	2,257± 0,04	6,486± 0,04	6,068± 0,05	3,389± 0,04



Şekil 4.33. DGEBA epoksi reçinesine, AGE ve EPM modifikatörlerinin %10, 20 ve 30 oranlarında eklenmesiyle oluşan kompozitlerin yoğunluk grafiği

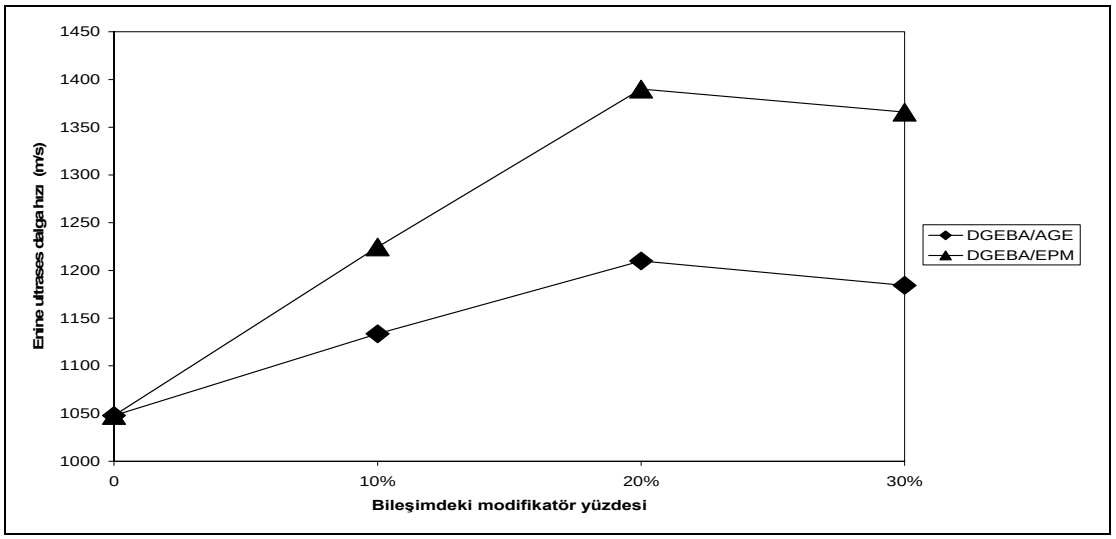
Çizelge 4.11 ve Şekil 4.33' e göre, diglisidil eter bisfenol-A (DGEBA) epoksi reçinesine kütlece % 10' u kadar allilglisiteter (AGE) modifikatörü eklendiğinde yoğunluk 1164 kg/m^3' den 1145 kg/m^3' e , % 20' si kadar eklendiğinde 1129 kg/m^3' e ve % 30' su kadar eklendiğinde 1112 kg/m^3' e düşmüştür. Epoksi reçinesinin (DGEBA) kütlece % 10' u kadar 2,3- Epoksipropilmetakrilat (EPM) modifikatörü

eklendiğinde yoğunluk 1164 kg/m^3' den 1139 g/cm^3' e düşerken % 20' si kadar eklendiğinde 1211 kg/m^3' e ve % 30' u kadar eklendiğinde 1210 kg/m^3' e çıkmıştır. Bu verilere göre DGEBA' nın AGE ve EPM ile karışımından elde edilen kompozitler içerisinde en büyük yoğunluk 1211 g/cm^3 ile DGEBA:EPM oranı 80:20 olan kompozitte elde edilmiştir. En küçük yoğunluk 1139 kg/m^3 ile DGEBA:EPM oranı 90:10 olan kompozitte elde edilmiştir.



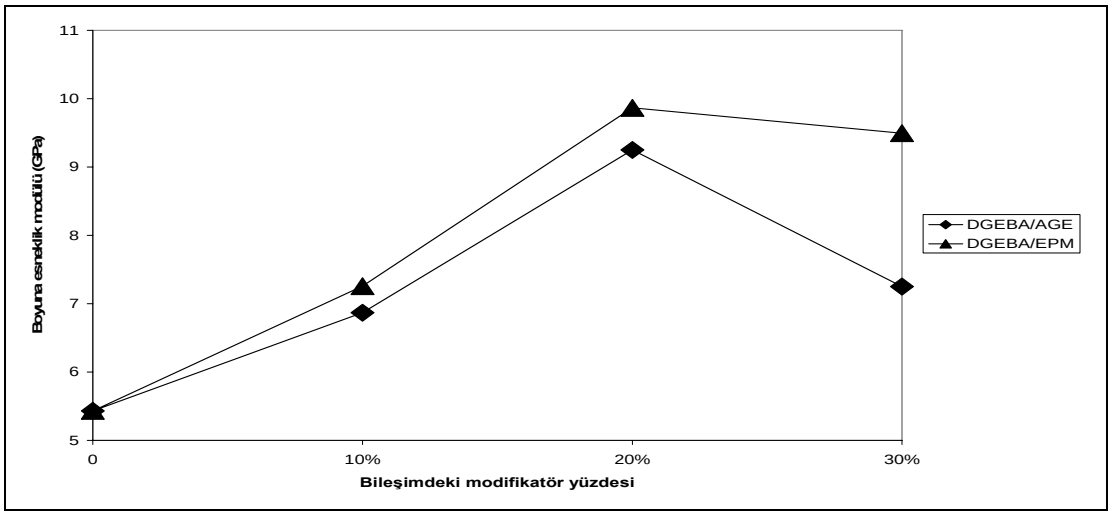
Şekil 4.34. DGEBA epoksi reçinesine, AGE ve EPM modifikatörlerinin % 10, 20 ve 30 oranlarında eklenmesiyle oluşan kompozitlerin boyuna ultrases dalga hızları (V_b) grafiği

Çizelge 4.11 ve Şekil 4.34' e göre sertleştirilmiş DGEBA' nın boyuna ultrases dalga hızı 2160 m/s iken, DGEBA' ya Allilglisiteter (AGE) kütlece % 10 oranında eklendiği zaman boyuna ultrases dalga hızı 2448 m/s' ye, kütlece % 20 oranında eklendiği zaman 2861 m/s'ye ve kütlece % 30 oranında eklendiği zaman 2552 m/s' ye çıkmıştır. Sertleştirilmiş DGEBA' nın boyuna ultrases dalga hızı 2160 m/s iken, DGEBA'ya 2,3-Epoksipropilmetakrilat (EPM) kütlece % 10 oranında eklendiği zaman boyuna ultrases dalga hızı 2523 m/s' ye, kütlece % 20 oranında eklendiği zaman 2853 m/s' ye ve kütlece % 30 oranında eklendiği zaman 2801 m/s' ye çıkmıştır. DGEBA içindeki modifikatör yüzdesi % 10 dan % 20 ye çıkarıldığı zaman hem AGE katılmış DGEBA hemde EPM katılmış DGEBA da boyuna ultrases dalga hızı artarken modifikatör yüzdesi % 30' a çıkarıldığı zamanda her ikisinde de boyuna ultrases dalga hızı azalmaktadır. Bu verilere göre DGEBA' nın AGE ve EPM ile karışımından elde edilen kompozitler içerisinde en büyük boyuna ultrases dalga hızı 2861 m/s ile DGEBA:AGE oranı 80:20 olan kompozitte elde edilmiştir. En küçük boyuna ultrases dalga hızı 2448 m/s ile DGEBA:AGE oranı 90:10 olan kompozitte elde edilmiştir.



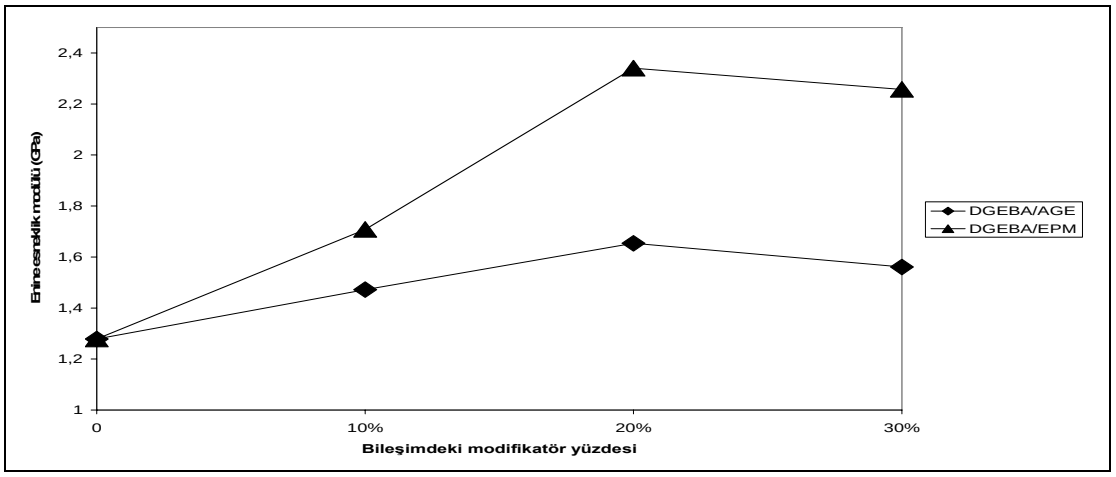
Şekil 4.35. DGEBA epoksi reçinesine, AGE ve EPM modifikatörlerinin %10, 20 ve 30 oranlarında eklenmesiyle oluşan kompozitlerin enine ultrases dalga hızları (V_e) grafiği

Çizelge 4.11 ve Şekil 4.35'e göre DGEBA içindeki allilglisiteter (AGE) yüzdesi kütlece % 10 iken sertleştirilmiş DGEBA' nın enine ultrases dalga hızı 1048 m/s'den 1133 m/s' ye, % 20 iken 1210 m/s' ye ve % 30 iken 1184 m/s' ye çıkmıştır. DGEBA içindeki 2,3-epoksipropilmetakrilat (EPM) yüzdesi %10 iken sertleştirilmiş DGEBA' nın enine ultrases dalgası hızı 1048 m/s'den 1224 m/s'ye, % 20 iken 1390 m/s' ye ve % 30 iken 1365 m/s'ye çıkmıştır. Bu verilere göre DGEBA' nın AGE ve EPM ile karışımından elde edilen kompozitler içerisinde en büyük enine ultrases dalga hızı 1390 m/s ile DGEBA:EPM oranı 80:20 olan kompozitte elde edilmiştir. En küçük enine ultrases dalga hızı 1133 m/s ile DGEBA:AGE oranı 90:10 olan kompozitte elde edilmiştir.



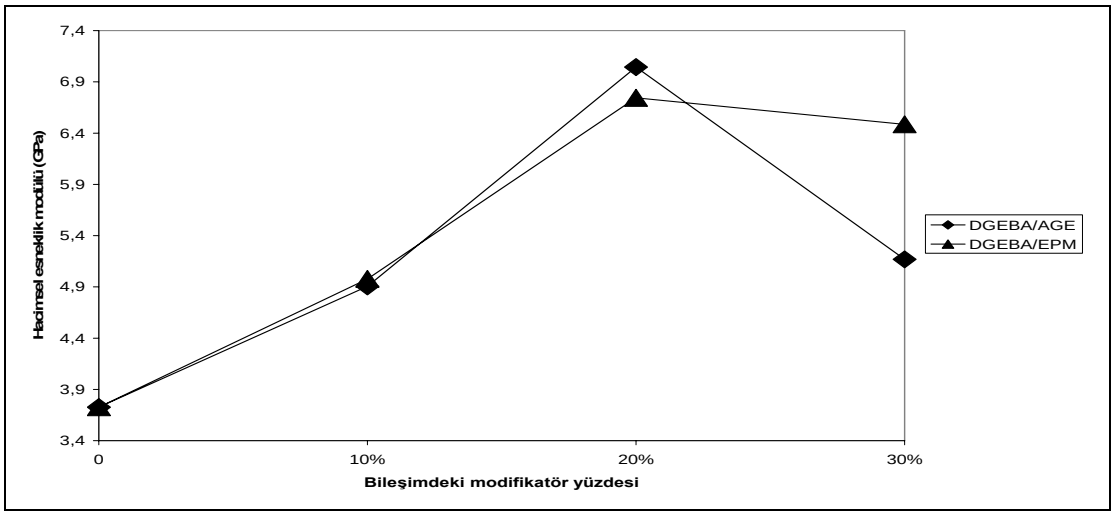
Şekil 4. 36. DGEBA epoksi reçinesine, AGE ve EPM modifikatörlerinin %10, 20 ve 30 oranlarında eklenmesiyle oluşan kompozitlerin boyuna esneklik modülleri (L) grafiği

Çizelge 4.12 ve Şekil 4.36' ya göre sertleştirilmiş DGEBA' nın boyuna esneklik modülü 5,430 GPa iken, % 10 oranında Allilglisiteter (AGE) katılmış DGEBA' nın boyuna modülü 6,867 GPa, % 20 oranında AGE katılmış DGEBA' nın boyuna esneklik modülü 9,249 GPa ve %30 oranında AGE katılmış DGEBA' nın boyuna esneklik modülü 7,250 GPa bulunmuştur. Boyuna esneklik modülü % 10 oranında 2,3-Epoksipropilmetakrilat (EPM) katılmış DGEBA'da 7,255 GPa, % 20 oranında EPM katılmış DGEBA' da 9,865 GPa ve % 30 oranında EPM katılmış DGEBA' da 9,4957 GPa bulunmuştur. Bu verilere göre DGEBA' nın AGE ve EPM ile karışımından elde edilen kompozitler içerisinde en büyük boyuna esneklik modülü 9,865 GPa ile DGEBA:EPM oranı 80:20 olan kompozitte elde edilmiştir. En küçük boyuna esneklik modülü 6,867 GPa ile DGEBA:AGE oranı 90:10 olan kompozitte elde edilmiştir.



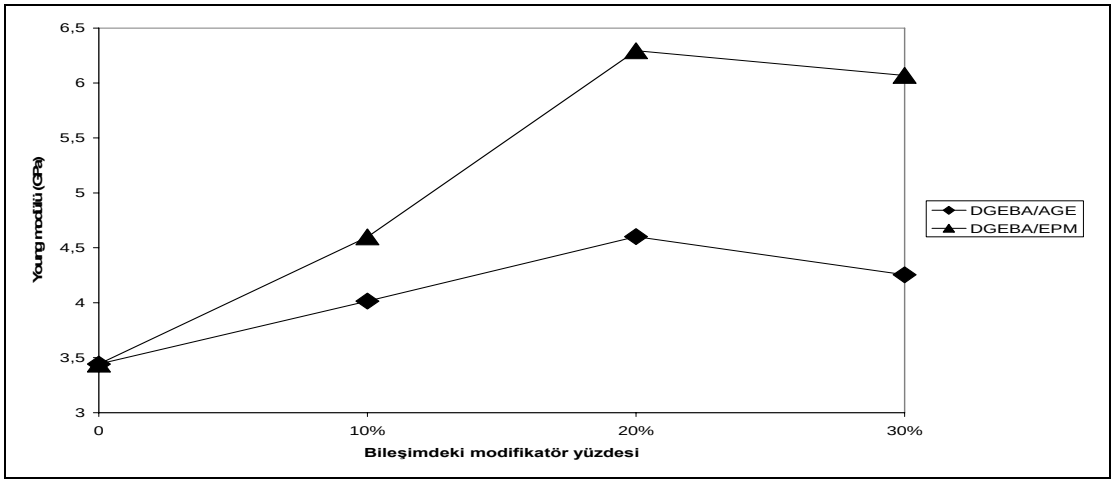
Şekil 4.37. DGEBA epoksi reçinesine, AGE ve EPM modifikatörlerinin %10, 20 ve 30 oranlarında eklenmesiyle oluşan kompozitlerin enine esneklik modülleri (G) grafiği

Çizelge 4.12 ve Şekil 4.37' ye göre sertleştirilmiş DGEBA' nın enine esneklik modülü 1,278 GPa iken, % 10 oranında AGE katılmış DGEBA' nın enine esneklik modülü 1,472 GPa, % 20 oranında AGE katılmış DGEBA' nın enine esneklik modülü 1,654 GPa ve % 30 oranında AGE katılmış DGEBA' nın enine esneklik modülü 1,561 GPa bulunmuştur. Enine esneklik modülü, %10 oranında EPM katılmış DGEBA' da 1,708 GPa, % 20 oranında EPM katılmış DGEBA' da 2,340 GPa ve % 30 oranında EPM katılmış DGEBA' da 2,257 GPa bulunmuştur. Bu verilere göre DGEBA' nın AGE ve EPM ile karışımından elde edilen kompozitler içerisinde en büyük enine esneklik modülü 2,340 GPa ile DGEBA:EPM oranı 80:20 olan kompozitte elde edilmiştir. En küçük enine esneklik modülü 1,472 GPa ile DGEBA:AGE oranı 90:10 olan kompozitte elde edilmiştir.



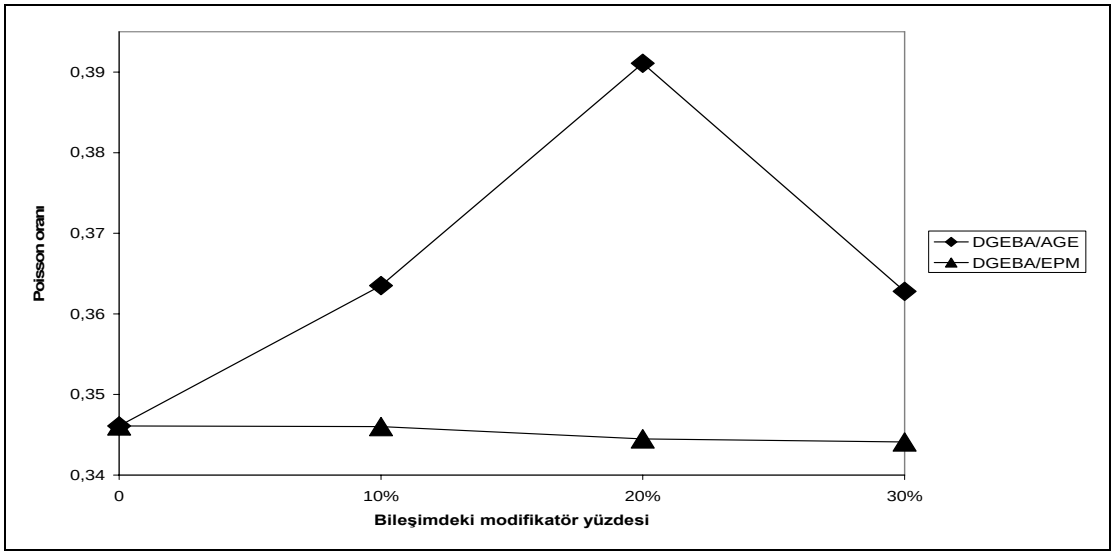
Şekil 4.38. DGEBA epoksi reçinesine, AGE ve EPM modifikatörlerinin %10, 20 ve 30 oranlarında eklenmesiyle oluşan kompozitlerin hacimsel esneklik modülleri (K) grafiği

Çizelge 4.12 ve Şekil 4.38' e göre sertleştirilmiş DGEBA' nın hacimsel esneklik modülü 3,726 GPa iken, % 10 oranında AGE katılmış DGEBA' nın hacimsel esneklik modülü 4,904 GPa bulunurken % 20 oranında AGE katılmış DGEBA' nın 7,043 GPa ve % 30 oranında Allilglisiteter katılmış DGEBA' nın 5,168 GPa bulunmuştur. Hacimsel esneklik modülü, % 10 oranında EPM katılmış DGEBA' da 4,977 GPa, % 20 oranında EPM katılmış DGEBA' da 6,744 GPa ve % 30 oranında EPM katılmış DGEBA' da 6,486 GPa bulunmuştur. Bu verilere göre DGEBA' nın AGE ve EPM ile karışımından elde edilen kompozitler içerisinde en büyük hacimsel esneklik modülü 7,043 GPa ile DGEBA:AGE oranı 80:20 olan kompozitte elde edilmiştir. En küçük hacimsel esneklik modülü 4,904 GPa ile DGEBA:AGE oranı 90:10 olan kompozitte elde edilmiştir.



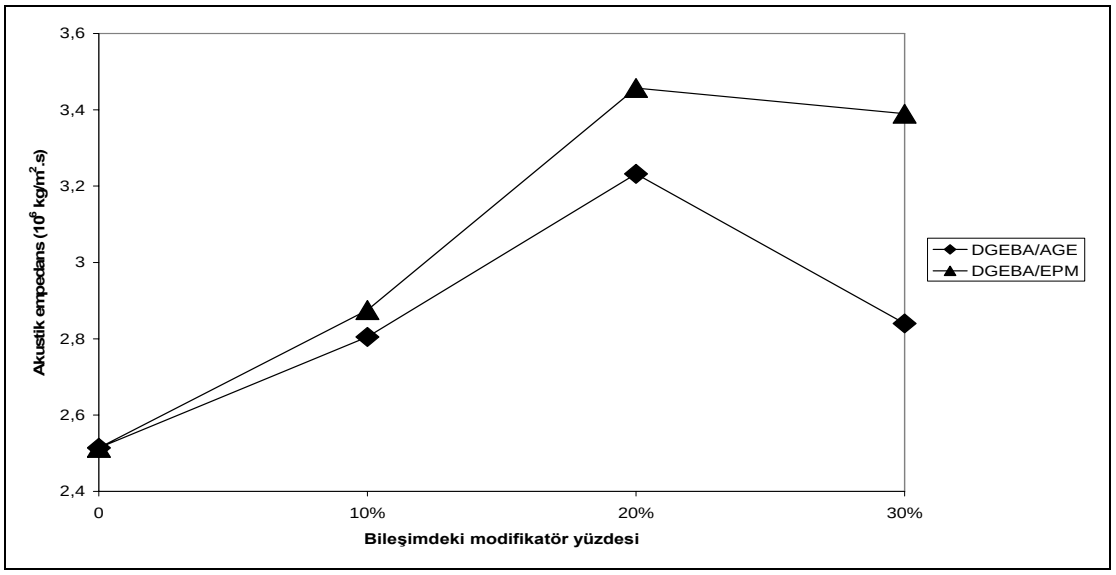
Şekil 4.39. DGEBA epoksi reçinesine, AGE ve EPM modifikatörlerinin %10, 20 ve 30 oranlarında eklenmesiyle oluşan kompozitlerin Young modülleri (E) grafiği

Çizelge 4.12 ve Şekil 4.39' a göre sertleştirilmiş DGEBA' nın Young modülü 3,441 GPa iken, % 10 oranında AGE katılmış DGEBA' nın Young modülü 4,015 GPa, % 20 oranında AGE katılmış DGEBA' nın 4,601 GPa ve % 30 oranında AGE katılmış DGEBA'nın 4,254 GPa bulunmuştur. Young modülü, % 10 oranında EPM katılmış DGEBA'da 4,598 GPa, % 20 oranında EPM katılmış DGEBA' da 6,293 GPa ve % 30 oranında EPM katılmış DGEBA' da 6,068 GPa bulunmuştur. Bu verilere göre DGEBA' nın AGE ve EPM ile karışımından elde edilen kompozitler içerisinde en büyük Young modülü 6,293 GPa ile DGEBA:EPM oranı 80:20 olan kompozitte elde edilmiştir. En küçük Young modülü 4,015 GPa ile DGEBA:AGE oranı 90:10 olan kompozitte elde edilmiştir.



Şekil 4.40. DGEBA epoksi reçinesine, AGE ve EPM modifikatörlerinin %10, 20 ve 30 oranlarında eklenmesiyle oluşan kompozitlerin Poisson oranları (μ) grafiği

Çizelge 4.12 ve Şekil 4.40' a göre sertleştirilmiş DGEBA' nın Poisson oranı 0,3461 iken % 10 oranında AGE katılmış DGEBA' nın Poisson oranı 0,3635 iken % 20 oranında AGE katılmış DGEBA'nın Poisson oranı 0,3911 ve % 30 oranında AGE katılmış DGEBA' nın Poisson oranı 0,3628 bulunmuştur. % 10 oranında EPM modifikatörü eklenmiş DGEBA' nın Poisson oranı 0,3460 iken, % 20 oranında EPM katılmış DGEBA' nın Poisson oranı 0,3445 ve % 30 oranında EPM katılmış DGEBA' nın Poisson oranı 0,3441 bulunmuştur. Bu verilere göre DGEBA' nın AGE ve EPM ile karışımından elde edilen kompozitler içerisinde en büyük Poisson oranı değeri 0,3911 ile DGEBA:AGE oranı 80:20 olan kompozitte elde edilmiştir. En küçük Poisson oranı değeri 0,3441 ile DGEBA:EPM oranı 70:30 olan kompozitte elde edilmiştir.



Şekil 4.41. DGEBA epoksi reçinesine, AGE ve EPM modifikatörlerinin %10, 20 ve 30 oranlarında eklenmesiyle oluşan kompozitlerin akustik empedansları (Z) grafiği

Çizelge 4.12 ve Şekil 4.41' e göre sertleştirilmiş DGEBA' nın akustik empedans değeri 2,514 kg/m^2.s iken, DGEBA içindeki AGE kütlece % 10 iken akustik empedans değeri 2,804.10^6 kg/m^2.s, DGEBA içindeki AGE kütlece % 20 iken 3,232.10^6 kg/m^2.s ve DGEBA içindeki AGE kütlece % 30 iken 2,840.10^6 kg/m^2.s bulunmuştur. Akustik empedans değeri, DGEBA içindeki EPM kütlece % 10 iken 2,875.10^6 kg/m^2.s, DGEBA içindeki EPM kütlece % 20 iken 3,457.10^6 kg/m^2.s ve DGEBA içindeki EPM kütlece % 30 iken 3,389.10^6 kg/m^2.s bulunmuştur. Bu verilere göre DGEBA' nın AGE ve EPM ile karışımından elde edilen kompozitler içerisinde en büyük akustik empedans değeri 3,457.10^6 kg/m^2.s ile DGEBA:EPM oranı 80:20 olan kompozitte elde edilmiştir. En küçük akustik empedans değeri 2,804.10^6 kg/m^2.s ile DGEBA:AGE oranı 90:10 olan kompozitte elde edilmiştir.

4.7. Çekme Testi ve Ultrasonik Yöntemle Ölçülen Young Modüllerine İlişkin Bulgular

Araştırmada tahribatlı muayene yöntemlerinden olan çekme testi ile tahribatsız muayene yöntemlerinden olan ultrasonik muayene ile yapılan ölçüm sonuçları arasındaki ilişkinin belirlenmesi amacıyla saf PS ve PS kompozitlere ait Young modülleri hem çekme testi yöntemiyle mekaniksel olarak ölçülmüş hemde ultrasonik darbe-yankı yöntemiyle ölçülmüştür. Her iki metodla hesaplanan Young modülü değerleri Çizelge 4.13 ve Çizelge 4.14' de verilmiştir.

Çizelge 4.13. KPS_{500} kompozitlerine ait çekme testi ve ultrasonik yöntemle ölçülen Young modülü değerleri

Bileşim Yüzdesi %		Ultrasonik Darbe-Yankı Yöntemi ile Ölçülen E (GPa)	Çekme Testi Yöntemi ile Ölçülen E (GPa)
PS_{230}:SAI	100:0	3,68	3,73
	90:10	3,81	3,61
	80:20	3,84	4,03
	70:30	3,86	4,06
PS_{230}:MAI	100:0	3,68	3,73
	90:10	3,81	4,17
	80:20	3,79	3,88
	70:30	3,80	3,56
PS_{230}:FAI	100:0	3,68	3,73
	90:10	3,88	3,95
	80:20	3,86	4,04
	70:30	3,83	3,67

Çizelge 4.14. KPS_{350} kompozitlerine ait çekme testi ve ultrasonik yöntemle ölçülen young modülü değerleri

Bileşim Yüzdesi %		Ultrasonik Darbe-Yankı Yöntemi ile Ölçülen E (GPa)	Çekme Testi Yöntemi ile Ölçülen E (GPa)
PS_{230}:SAII	100:0	3,68	3,73
	90:10	3,84	3,70
	80:20	3,89	3,98
	70:30	3,93	3,91
PS_{230}:MAII	100:0	3,68	3,73
	90:10	3,86	4,19
	80:20	3,78	3,94
	70:30	3,79	3,77
PS_{230}:FAII	100:0	3,68	3,73
	90:10	3,87	4,39
	80:20	3,83	4,30
	70:30	3,81	4,00

Çizelge 4.13 ve Çizelge 4.14' den görüldüğü gibi hem çekme testi yöntemiyle mekaniksel olarak ölçülen hemde ultrasonik darbe-yankı yöntemiyle ölçülen Young modülü değerleri arasında önemli bir farklılık çıkmamıştır.

5. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Polistiren (PS) yüksek dielektrik ve yüksek sertliğe sahiptir fakat sıcaklığa ve darbeye karşı dayanımı az olup adhezyon özelliği yoktur. PS düşük molekül ağırlıklı bileşiklere göre çok daha az aktif bir bileşik olup reaksiyon kabiliyeti zayıftır. Ancak yapısında bulunan fenil halkası, onun kimyasal aktifliğini arttırarak benzen ve türevlerinin verdiği tüm kimyasal reaksiyonları vermesini sağlar. Polistirenin, düz zincirinden (alifatik karbon zincirinden) ve aromatik halkasından yerdeğiştirme reaksiyonları vermesi onun eksik yanlarının geliştirilebilmesine imkân vermektedir.

Epoksi reçineleri ısıya, kimyasal maddelere, çözücülere ve suya dayanıklı sert malzemelerdir. Epoksi reçineleri yapısında oynak hidroksil ve epoksi gruplarını bulundurur. Dolayısıyla düz zincirli yapıya sahip epoksi polimerlerini çapraz bağlayarak sertleştirmek ve farklı kimyasal yapılı modifikatörler kullanarak daha üstün özelliklere sahip yeni ürünler elde etmek mümkündür. Epoksi reçinesinin (DGEBA), allilglisiteter (AGE) ve 2,3-epoksipropilmetakrilat (EPM) gibi modifikatörlerle karıştırılması, daha iyi özelliklere sahip kompozit epoksi malzemelerin elde edilmesine imkân vermesinden dolayı öneme sahiptir.

Bu çalışmada modifiye polistirenler (MPS), kompozit polistirenler (KPS) ve kompozit epoksi reçineleri (KDGEBA) incelenmiştir. Malzemelerde boyuna ve enine ultrases dalgalarının geçiş süreleri mikrosaniye (μs) biriminden ölçülmüştür. Malzemelerin kalınlıkları 0,01mm hassaslıkla mikrometre yardımıyla ölçüldükten sonra geçiş süresi ve kalınlıklar Denklem 3.1' de yerine yazılarak malzemelerde boyuna ve enine ultrases dalgalarının hızları hesaplanmıştır. Elde edilen yoğunluk ve hız değerlerinden bütün malzemelerin boyuna esneklik modülleri (L), enine esneklik modülleri (G), hacimsel esneklik modülleri (K), Young modülleri (E), Poisson oranları (μ) ve akustik empedans (Z) değerleri hesaplanmıştır. Böylece kimyasal modifikasyon metodu ile PS' nin aromatik halkasına çeşitli fonksiyonel grupların bağlanmasının, DGEBA' nın da AGE ve EPM modifikatörleri ile modifiye edilmesinin sırasıyla PS ve DGEBA' nin mekanik özelliklerine olan etkisi ultrasonik yöntemle araştırılmıştır. Ayrıca KPS' lere ait Young modülleri çekme testi ile ölçülmüş ve ölçüm sonuçları ultrasonik yöntemle ölçülen değerler ile karşılaştırılmıştır.

Bütün numunelerden alınan yoğunluk, ultrasonik hız ve esneklik modüllerine ait bulgular bir önceki bölümde verilmiştir. Bu bulgulardan elde edilen sonuçlar sırasıyla aşağıda verilmiştir.

Çizelge 4.2. ve Şekil 4.5' de PS_{500} ve MPS_{500}' lere ait yoğunluk değerleri görülmektedir. Bu verilere göre PS_{500}' ün yoğunluğunu SA ve MA ile modifikasyon düşürürken FA ile modifikasyon yükseltmiştir. Şekil 3.1, Şekil 4.1, Şekil 4.2, Şekil4.3 ve Şekil 4.4' den PS' nin SA, MA ve FA ile modifikasyon mekanizması incelendiğinde FAI' de fenil grubuna $–CO-C_6H_4-COOH$ grubunun, SAI' de $–CO-CH_2-CH_2-COOH$ grubunun ve MAI' de –CO-CH=CH-COOH grubunun bağlandığı görülmektedir. Polimerlerde yoğunluk ile dallanma arasında sıkı bir ilişki vardır. Az dallı zincirler birbirine daha çok yaklaştıkları için daha yoğun; dallanmış zincirler birbirinden daha uzak kaldıkları için yoğunluğu daha düşük bir malzeme oluştururlar (Akkurt, 1991). Dolayısıyla $–CO-C_6H_4-COOH$ grubu polimer zincirlerinin birbirine daha yakın durmasını sağlarken $–CO-CH_2-CH_2-COOH$ ve –CO-CH=CH-COOH grupları daha uzun zincir yapıdan dolayı polimer zincirleri arasındaki mesafeyi arttırmışlardır. Dolayısıyla yoğunluklar arasındaki farklılığın nedeni olarak polimer zincirlerinin bu gruplar nedeniyle biribirine yakın ya da uzak olması gösterilebilir.

Saf PS_{500} ve PS_{500}' ün SA, MA ve FA anhidritleri ile modifikasyonu sonucu oluşan MPS_{500} (SAI, MAI ve FAI)' lere ait boyuna ve enine ultrases dalga hız değerleri Çizelge 4.2 ve Şekil 4.6' da verilmiştir. Bu verilere göre hem PS_{500}' ün hem de bütün MPS_{500}' lerin boyuna ve enine ultrases dalga hızı değerleri saf PS_{500}' ün boyuna ve enine ultrases dalga hızı değerlerinden daha yüksek çıkmıştır. MPS_{500}' ler içerisinde en büyük boyuna ultrases dalga hızı 2414 m/s ile SAI' de elde edilirken en büyük enine ultrases dalga hızı 1179 m/s ile FAI' de elde edilmiştir. Ses hızı; sıcaklık, manyetik alan, örnek kompozisyonu, basınç, örneğin mikro yapısı (kusurlar, boşluklar), yük yoğunluğu, safsızlık yoğunluğu, ışınlama şiddeti, faz geçişleri gibi parametrelere bağlı olarak değişir (Cankurtaran, 1995). Polimerlerde ses hızı bu etkenlerin dışında sıkışabilirliğe ve yoğunluğa da bağlıdır. Burada ses hızındaki farklılıkların nedeni olarak polimer bileşimlerinin farklı olması gösterilebilir. Çünkü SAI' de yoğunluk biraz azalmasına rağmen saf PS_{500}' e göre hem boyuna hem de enine ultrases dalga hızı artmıştır.

Doğrusal esnek malzemelerde küçük gerilmeler altında, yanal şekil değişiminin boyuna şekil değişimine oranı olarak tanımlanan Poisson oranı değerleri Çizelge 4.3 ve Şekil 4.7' de verilmiştir. Bu veriler incelendiği zaman MPS_{500}' ler içerisinde en düşük Poisson oranı değerinin FAI' de, en yüksek Poisson oranı değerinin ise MAI' de olduğu görülmektedir. Buna göre FA katkısının PS_{500}' ün mukavemetini arttırdığı söylenebilir. Çünkü yanal şekil değişiminin küçük olması polimer zincirleri arasındaki çekim

kuvvetlerinin büyük olduğunu göstermektedir. Bu nedenle Poisson oranı değerinin küçülmesi malzemenin kalite ve dayanımının arttığını gösterir.

Çizelge 4.3 ve Şekil 4.8 verilerine göre PS_{500}' ün SA ve FA ile modifikasyonu PS_{500}' ün esneklik modülü değerlerinin (L, G, K ve E) hepsini arttırırken MA ile modifikasyon ise bütün esneklik modülü değerlerini düşürmüştür. PS_{500}' e ait esneklik modüllerini en fazla FA ile modifikasyon arttırmıştır. Buna göre PS_{500}' ün FA ile modifikasyonu onun atomları arası bağlarının daha kuvvetli hale geldiğini ve FAI' in saf PS_{500}' e göre bütün doğrultularda gerilme ve basınca daha fazla dayandığını göstermektedir. Bu sonuç ayrıca FA modifikasyonu ile yoğunluğun artış nedeni olan –CO-C_6H_4-COOH grubunun polimer zincirleri arasındaki çekim kuvvetini artırması görüşünü de desteklemektedir. MAI' in esneklik modülü değerlerinin PS_{500}' e göre düşük değerler alması ise MAI' in deformasyonunun daha kolay olduğunu göstermektedir.

PS_{500} ve MPS_{500}' lere ait akustik empedans değerleri Çizelge 4.3 ve Şekil 4.9'da görülmektedir. Bir malzemede ultrasonik dalgaların yayılmasına karşı gösterilen direncin ölçüsü olan akustik empedans değerleri incelendiğinde PS_{500}'ün akustik empedansının MA ile modifikasyon sonucu azaldığı ancak SA ve FA ile modifikasyonunun ise akustik empedansı arttırdığı görülmektedir. Dolayısıyla bir kez daha PS_{500}' ün SA ve özellikle FA ile modifikasyonunun olumlu sonuçlar verdiği ve PS_{500}' ün mekanik özelliklerinde iyileşme olduğu anlaşılmaktadır.

Çizelge 4.4 ve Şekil 4.10' dan görüldüğü gibi PS_{350}' nin SA ve MA ile modifikasyonu yoğunluğunu yükseltirken FA ile modifikasyonu yoğunluğunu düşürmüştür. Şekil 3.1, Şekil 4.1, Şekil 4.2, Şekil 4.3 ve Şekil 4.4' den PS' nin SA, MA ve FA ile modifikasyon mekanizması incelendiğinde FAII' de fenil grubuna –CO-C_6H_4-COOH grubunun, SAII' de –CO-CH_2-CH_2-COOH grubunun ve MAII' de –CO-CH=CH-COOH grubunun bağlandığı görülmektedir. Polimerlerde yoğunluk ile dallanma arasında sıkı bir bağıntı olduğu daha önce belirtilmişti, ancak PS_{350}' nin SA ve MA ile modifikasyonunun yoğunluğunu yükseltmesi ve FA ile modifikasyonunun yoğunluğunu düşürmesi PS_{350}' nin düşük molekül ağırlıklı olması ile açıklanabilir. Ahmetli ve arkadaşları (2005), daha düşük molekül kütleli PS'nin aromatik halkasına bağlanan fonksiyonel grup miktarının, daha yüksek molekül kütleli PS' lerin aromatik halkasına bağlanmış fonksiyonel grup miktarından daha fazla olduğunu belirtmişlerdir. Buna göre PS_{350}' nin FA ile modifikasyonu sonucu aromatik halkasına bağlanan –CO-C_6H_4-COOH grubu miktarı PS_{500}' dekinden daha fazla olmuştur. Bu durumda

fonksiyonel grup miktarının fazla olması bir nevi dallanma rolü görerek polimer zincirleri arasındaki çekim kuvvetinin azalmasına neden olmuş olabilir. Diğer yandan SAII ve MAII' de yoğunluğun artması daha fazla miktarda – CO-CH_2–CH_2-COOH ve –CO-CH=CH-COOH gruplarının PS_{350}' nin aromatik halkasına bağlanarak polimer zincirleri arasındaki kuvveti arttırmasıyla açıklanabilir.

Saf PS_{350} ve PS_{350}' nin SA, MA ve FA anhidritleri ile modifikasyonu sonucu oluşan MPS_{350} (SAII, MAII ve FAII)' lere ait boyuna ve enine ultrases dalga hız değerleri Çizelge 4.4 ve Şekil 4.11' de verilmiştir. Bu verilere göre bütün MPS_{350}' lerin boyuna ve enine ultrases dalga hız değerleri saf PS_{350}' nin boyuna ve enine ultrases dalga hızlarından daha yüksek çıkmıştır. MPS_{350}' ler içerisinde en büyük boyuna ultrases dalga hızı 2419 m/s ile FAII' de elde edilirken en büyük enine ultrases dalga hızı da 1178 m/s ile FAII' de elde edilmiştir. Bu sonuçlara göre PS_{350}' nin, FA ile modifikasyonunun daha iyi sonuçlar verdiği söylenebilir.

Çizelge 4.5 ve Şekil 4.12' deki Poisson oranı değerleri incelendiği zaman MPS_{350}' ler içerisinde en düşük Poisson oranı değerinin FAII' de, en yüksek Poisson oranı değerinin ise SAII' de olduğu görülmektedir. Buna göre PS_{350}' ün mukavemetini en çok FA katkısının arttırdığı söylenebilir.

Çizelge 4.5 ve Şekil 4.13 verilerine göre PS_{350}' nin SA, MA ve FA ile modifikasyonu PS_{350}' nin esneklik modülü değerlerinin (L, G, K ve E) hepsini arttırmıştır. Ancak PS_{350}' ye ait esneklik modülü değerlerini en fazla FA ile modifikasyon, FA' dan sonra SA ile modifikasyon arttırırken en az artış MA ile modifikasyonda elde edilmiştir. Bunun nedeninin molekül ağırlığı olduğu söylenebilir. Çünkü FA' nın molekül ağırlığı SA' dan, SA' nın molekül ağırlığı da MA' dan daha büyüktür. Polistirenin aromatik halkasına bağlanan fonksiyonel grupların molekül ağırlıkları da farklı olmaktadır. Bu ise polimerizasyon derecesini ve zincir uzunluğunu etkilemektedir. Molekül ağırlığı arttıkça zincirler arası çekim kuvvetleri de artmaktadır. Bu da malzemenin esneklik modülü değerlerini dolayısıyla da dış darbelere karşı direncini arttırmaktadır.

Çizelge 4.5 ve Şekil 4.14' dan görüldüğü gibi PS_{350}' nin akustik empedansı MA, SA ve FA ile modifiye edildiğinde artmıştır. Ancak PS_{350}' nin akustik empedansını en fazla SA ile modifikasyonu arttırırken en az artış MA ile modifikasyonda elde edilmiştir.

Çizelge 4.6 ve Şekil 4.15' de verilen yoğunluk değerleri incelendiğinde zaman PS_{230}:MAI' in 90:10 oranı sonucu oluşan kompozit dışında saf PS_{230}' lara MPS_{500},

lerden kütlece % 10, 20 ve 30 oranlarında katılması sonucu oluşan kompozitlerin yoğunluklarının saf PS_{230}'un yoğunluğundan daha yüksek çıktığı görülmektedir. Ancak bazı kompozitlerde bileşimdeki MPS yüzdesi arttıkça yoğunluk artarken (PS_{230}:MAI) bazılarında ise bileşimdeki MPS yüzdesi arttıkça yoğunluk azalmıştır (PS_{230}:SAI).

PS_{230}'a, MPS_{500} (SAI, MAI ve FAI)' lerden kütlece % 10, 20 ve 30 oranında katıldığı zaman oluşan kompozitlerin boyuna ve enine ultrases dalga hızları PS_{230}' a göre artmıştır (Çizelge 4.6). KPS_{500}' ler içerisinde en büyük boyuna ultrases dalga hızı 2409 m/s ile PS_{230}:SAI oranı 70:30 olduğu zaman oluşan kompozitte elde edilirken en büyük enine ultrases dalga hızı 1173 m/s ile PS_{230}:FAI oranı 90:10 olduğu zaman elde edilmiştir. Çizelge 4.6 sonuçlarına göre PS_{230}' un hem boyuna hem de enine ultrases dalga hızı PS_{230}' a yapılan SAI katkılama yüzdesi ile doğru orantılı olarak artmaktadır. PS_{230}' a MAI ve FAI' in kütlece % 10 katkılanması hem boyuna hem de enine ultrases dalga hızını arttırırken % 10' dan sonraki artan yüzde oranı ile bu hız azalmaktadır (Şekil 4.16 ve Şekil 4.17).

KPS_{500}' lerin esneklik modülü değerlerine ilişkin Çizelge 4.7 ve Şekil 4.18 – 4.21 verileri incelendiği zaman genel olarak PS_{230}' a MPS_{500}' lerden kütlece % 10, 20 ve 30 oranında katılması sonucunda bütün esneklik modülü değerlerinin arttığı görülmektedir. Örneğin boyuna esneklik modülü, PS_{230}' a yapılan MAI ve FAI katkılama yüzdesi ile doğru orantılı olarak artmıştır (Şekil 4.18). Makaslama, kayma veya kayma esneme direncinin bir ölçüsü olarak da bilinen enine esneklik modülleri incelendiğinde PS_{230}' un enine esneklik modülü, PS_{230}' a yapılan SAI katkılama yüzdesi ile doğru orantılı olarak artarken FAI'in % 10' luk katkısında en büyük değeri aldıktan sonra artan FAI oranları ile birlikte azalmaktadır (Şekil 4.19). Sıkıştırılabilirliğin tersi olan hacimsel esneklik modülleri incelendiği zaman PS_{230}' a MPS_{500}' lerden kütlece % 10, 20 ve 30 oranında katıldığı zaman hacimsel esneklik modülünün en büyük değeri SAI katkısında elde edilirken en küçük değeri FAI katkısında elde edilmiştir (Şekil 4.20). Çizelge 4.7 ve Şekil 4.21 verilerine göre, PS_{230}' a MPS_{500}' lerden kütlece % 10 ve % 20 oranında katıldığı zaman Young modülünün en büyük değeri FAI katkısında elde edilirken % 30' luk MPS_{500} katkısında en büyük Young modülü değeri SAI katkısında elde edilmiştir. Genel olarak değerlendirildiğinde Young modülü, PS_{230}' a yapılan SAI katkılama yüzdesi ile doğru orantılı olarak artmaktadır.

Çizelge 4.7 ve Şekil 4.22 verileri incelendiğinde zaman KPS_{500}' ler içerisinde en düşük Poisson oranı değerlerinin FA katılmış PS' lerde olduğu görülmektedir. Ayrıca %

10’ luk SAI katkılı PS_{230}:SAI ve % 30’ luk MAI katkılı PS_{230}:MAI’de ise Poisson oranı değerlerinin yüksek olduğu görülmektedir.

KPS_{500}’ lerin akustik empedas değerlerine ilişkin Çizelge 4.7 ve Şekil 4.23 verilerine göre, PS_{230}’a MPS_{500}’ lerden kütlece % 10 ve % 30 oranında katıldığı zaman akustik empedansın en büyük değeri SAI katkısında elde edilirken % 20’ lik MPS_{500} katkısında en büyük akustik empedans değeri FAI katkısında elde edilmiştir. Genel olarak değerlendirildiğinde akustik empedans, PS_{230}’ a yapılan MAI katkılama yüzdesi ile doğru orantılı olarak artmıştır.

KPS_{350}’ lerin yoğunluk değerlerine ilişkin Çizelge 4.8 ve Şekil 4.24 verilerine göre saf PS_{230}’ lara MPS_{350}, lerden kütlece % 10, 20 ve 30 oranlarında katılması sonucu oluşan kompozitlerin yoğunluğu saf PS_{230}’ un yoğunluğundan daha yüksek çıkmıştır.

PS_{230}’a, MPS_{350} (SAII, MAII ve FAII)’ lerden kütlece % 10, 20 ve 30 oranında katıldığı zaman oluşan kompozitlerin (KPS_{350}) boyuna ve enine ultrases dalga hızı değerlerinin PS_{230}’ a göre arttığı görülmektedir (Çizelge 4.8). KPS_{350}’ ler içerisinde en büyük boyuna ve enine ultrases dalga hızı değerleri PS_{350}:SAII oranı 70:30 olduğu zaman elde edilmiştir (V_b = 2407 m/s; Ve = 1185 m/s). Bu sonuçlara göre hem boyuna hem de enine ultrases dalga hızı PS_{230}’ a yapılan SAII’ nin katkılama yüzdesi ile doğru orantılı olarak artmaktadır. PS_{230}’ a MAII ve FAII’ nin kütlece % 10 katkılanması hem boyuna hem de enine ultrases dalga hızını arttırırken % 10’ dan sonraki artan yüzde oranı ile bu hız değerleri gittikçe azalmaktadır (Şekil 4.25 ve Şekil 4.26).

KPS_{350}’ lerin esneklik modülü değerlerine ilişkin Çizelge 4.9 ve Şekil 4.27 – 4.30 verileri incelendiğinde genel olarak PS_{230}’ a MPS_{350}’ lerden kütlece % 10, 20 ve 30 oranında katılması sonucunda bütün esneklik modülü değerlerinin arttığı görülmektedir. Çizelge 4.9 ve Şekil 4.27 verilerine göre, PS_{230}’ a MPS_{350}’ lerden kütlece % 10 oranında katıldığı zaman boyuna esneklik modülünün en büyük değeri MAII katkısında elde edilirken % 20 ve % 30’ luk MPS_{350} katkısında en büyük boyuna esneklik modülü değeri SAII katkısında elde edilmiştir. Oldukça zayıf olan Van der Waals veya hidrojen bağlarına bağlı olan enine esneklik modülü değerleri Çizelge 4.9 ve Şekil 4.28 verilerine göre, PS_{230}’ a MPS_{350}’ lerden % 10 oranında katıldığı zaman en büyük değeri FAII katkısında elde edilirken hem %20 hem de % 30’ luk MPS_{350} katkısında en büyük değer SAII katkısında elde edilmiştir. Genel olarak değerlendirildiğinde enine esneklik modülünün değeri, PS_{230}’ a yapılan SAII katkılama yüzdesi ile doğru orantılı olarak artmıştır. Çizelge 4.9 ve Şekil 4.29’ da düzenli bir şekilde sıkıştırılan bir cismin buna karşı koyma özelliğini ifade eden hacimsel esneklik modülü değerlerine ilişkin veriler

incelendiğinde, PS_{230}' a MPS_{350}' lerden kütlece % 10 ve % 30 oranında katıldığı zaman hacimsel esneklik modülünün en büyük değeri MAII katkısında elde ederken % 20' lik katkılamada en büyük hacimsel esneklik modülü değeri FAII katkısında elde etmiştir. Hacimsel esneklik modülü değeri, PS_{230}' a yapılan kütlece % 10' luk FAII katkısında arttıktan sonra bileşimdeki FAII yüzdesi artınca bu değer düşmeye başlamıştır. Çizelge 4.9 ve Şekil 4.30 verilerine göre, PS_{230}' a MPS_{350}'lerden kütlece % 10 oranında katıldığı zaman Young modülünün en büyük değeri FAII katkısında elde edilirken hem % 20 hem de % 30' luk MPS katkısında en büyük Young modülü değeri SAII katkısında elde edilmiştir. Genel olarak değerlendirildiğinde Young modülü değeri, PS_{230}' a yapılan SAII katkılama yüzdesi ile doğru orantılı olarak artmaktadır.

Çizelge 4.9 ve Şekil 4.31 verileri incelendiği zaman KPS_{350}' ler içerisinde en düşük Poisson oranı değerlerinin FAII ile katkılamada elde edildiği görülmektedir. KPS_{350}' ler içerisinde en düşük Poisson oranı değerlerinin SAI katkılanması ile oluşan KPS_{350}' lerde olduğu görülmektedir. Diğer taraftan en yüksek Poisson oranı değerinin ise % 20' lik MAII katkılı kompozitte olduğu görülmektedir (Çizelge4.9 ve Şekil4. 31).

KPS_{350}' lerin akustik empedans değerlerine ilişkin Çizelge 4.9 ve Şekil 4.32 verilerine göre, PS_{230}' a MPS_{350}'lerden kütlece % 10 oranında katıldığı zaman akustik empedansın en büyük değeri MAII katkısında elde edilirken hem % 20 hem de % 30' luk MPS katkısında en büyük akustik empedans değeri SAII katkısında elde edilmiştir.

Genel olarak Çizelge 4.6, Çizelge 4.7 ve Şekil 4.15- 4.23 verileri incelendiği zaman saf PS_{230}' a MPS_{500}' lerin karıştırılması saf PS_{230}' nin ultrasonik hız değerlerini yaklaşık olarak %2,3 ve esneklik katsayı değerlerini de ortalama % 4,1 oranında arttırdığı görülmektedir. Çizelge 4.8, Çizelge 4.9 ve Şekil 4.24 – 4.32 verileri incelendiği zaman saf PS_{230}' a MPS_{350}' lerin karıştırılması saf PS_{230}' nin ultrasonik hız değerlerini yaklaşık % 2,3 ve esneklik modülü değerlerini de ortalama % 4,5 oranında arttırdığı görülmektedir. Saf polistirenlerin modifikasyonu pahalıdır. Dolayısıyla PS' nin özelliklerinin geliştirilmesinde PS' nin MPS' lerle belli oranlarda karıştırılması yöntemi daha ekonomik bir yöntemdir. Çizelge 4.10 verilerine göre PS_{230}' un kullanıldığı yerlerde PS_{230}' u tek başına kullanmak yerine PS_{230}:SAII (70:30), PS_{230}:FAI (90:10) veya PS_{230}:FAII (90:10) şeklinde kullanmak hem daha ekonomik hemde daha güvenilir, dayanıklı ve sağlam malzemelerin elde edilmesine imkân verecektir. Dolayısıyla saf PS' ye MPS' lerden belli oranlarda katılmasıyla esneklik modülü değerlerinde % 4 civarında bir iyileşmenin elde edilmesi bu kompozitlerden elde edilen

birçok malzemenin daha uzun ömürlü olması ve daha düşük bir fiyat ile satılabilmesine imkân verecektir. Bu ise ülke ekonomisi açısından çok önemlidir.

Çizelge 4.11 ve Şekil 4.33' de, DGEBA' nın AGE modifikatörü ile modifikasyonu sonucu yoğunluk değerinin, bileşimdeki AGE oranının artmasıyla azaldığı görülmektedir. DGEBA:EPM bileşiminde EPM oranı % 0 dan % 10' a çıktığında yoğunluk 1164 kg/m^3'den 1139 kg/m^3' e düşmüştür. Ancak yoğunluk değeri bileşimdeki EPM oranı % 20 iken 1211 kg/m^3' e ve EPM oranı % 30 iken 1210 kg/m^3' e yükselmiştir. En yüksek artış % 20' lik oranda elde edilmiştir. % 10' luk modifikatör katkısında en yüksek yoğunluk değeri 90:10' luk DGEBA:AGE oranında elde edilirken % 20 ve % 30' luk modifikatör katkılarında en yüksek yoğunluk değerleri EPM modifikatörü eklenmiş epoksi reçinelerinde görülmüştür.

DGEBA epoksi reçinesinin AGE ve EPM modifikatörleri ile modifikasyonu sonucu elde edilen KDGEBA' lara ait boyuna ve enine ultrases dalga hız değerleri Çizelge 4.11, Şekil 4.34 ve 4.35' de verilmiştir. Çizelge 4.11, Şekil 4.34 ve Şekil 4.35 verilerine göre en yüksek boyuna ultrases dalga hızı 2861 m/s ile DGEBA:AGE bileşim oranı 80:20 iken görülürken en yüksek enine ultrases dalgası hızı 1390 m/s ile DGEBA:EPM bileşim oranı 80:20' de elde edilmiştir. DGEBA' nın hem AGE hemde EPM modifikatörleri ile modifikasyonu DGEBA' nın hem boyuna hemde enine ultrases dalga hız değerlerini arttırmıştır.

KDGEBA' ların esneklik modülleri değerlerine ilişkin Çizelge 4.12 ve Şekil 4.36-4.39 verileri incelendiği zaman genel olarak DGEBA' nın AGE ve EPM modifikatörü ile modifikasyonunun bütün esneklik modülü değerlerini arttırdığı görülmektedir. DGEBA:AGE ve DGEBA:EPM kompozitlerinin 80:20 bileşim oranında KDGEBA' lara ait boyuna esneklik modülü değeri daha yüksek olmuştur (Çizelge 4.12 ve Şekil 4.36). Buna göre AGE ve EPM modifikatörlerinin kütlece % 20 oranında DGEBA' ya katılması DGEBA' nın uzunlamasına mukavemetini daha çok arttırmaktadır. Çizelge 4.12 ve Şekil 4.37 verilerinden EPM modifikatörü katılmış DGEBA' nın enine esneklik modülü değerlerinin AGE katılmış DGEBA' nın enine esneklik modülü değerlerinden daha büyük olduğu görülmektedir. DGEBA' ya katılan AGE ve EPM oranı % 10' dan % 20' ye çıkarıldığı zaman her ikisinde de enine esneklik modülü değeri büyürken bu oran % 30' a çıkarıldığı zaman her ikisinin enine esneklik modülü değerinin küçüldüğü görülmektedir. Çizelge 4.12 ve Şekil 4.38' e göre % 10 ve % 30 oranlarında EPM modifkatörü eklenmiş DGEBA' nın hacimsel esneklik modülü değeri AGE katılmış DGEBA' dan daha büyüktür. Ancak % 20 oranında AGE

katılmış DGEBA' nın hacimsel esneklik modülü değeri, % 20 oranında EPM katılmış DGEBA' nın hacimsel esneklik modülü değerinden daha büyüktür. Modifikatör oranı % 10' dan % 20' ye çıkarıldığı zaman her ikisinde de hacimsel esneklik modülü değeri artarken bu oran % 30' a çıkarıldığı zaman her ikisinin hacimsel esneklik modülü değerlerinin küçüldüğü görülmektedir. Çizelge 4.12 ve Şekil 4.39' a göre % 10, 20 ve 30 oranında EPM katılmış DGEBA' nın Young modülü değeri AGE katılmış DGEBA' dan daha büyüktür. Ancak DGEBA' daki AGE ve EPM oranı % 10' dan % 20' ye çıkarıldığı zaman her ikisinde de Young modülü değeri artarken bu oran % 30' a çıkarıldığı zaman her ikisinin de Young modülü değerinin küçüldüğü görülmektedir.

Çizelge 4.12 ve Şekil 4.40' dan KDGEBA' lara ait Poisson oranı değerleri incelendiğinde kütlece % 10, 20 ve 30 oranında AGE katılmış DGEBA' nın Poisson oranı değerlerinin EPM katılmış DGEBA' nın Poisson oranı değerlerinden daha büyük olduğu görülmektedir. AGE katılmış KDGEBA' da Poisson oranı değeri, AGE oranı % 10 dan % 20' ye çıkarıldığı zaman artış gösterirken AGE oranı % 20' den % 30' a çıkarıldığı zaman azalmaktadır. EPM katılmış KDGEBA' nın Poisson oranı değerlerinin ise artan EPM yüzdesine paralel olarak sürekli azaldığı görülmektedir. Bu sonuçlara göre DGEBA' nın EPM ile modifikasyonu AGE ile modifikasyonuna göre darbe dayanımını daha fazla arttırdığı söylenebilir.

Çizelge 4.12 ve Şekil 4.41' den KDGEBA' lara ait akustik empedans değerleri incelendiğinde % 10 ve % 30 oranlarında EPM modifikatörü eklenmiş KDGEBA' ların akustik empedans değerlerinin AGE katılmış KDGEBA' lardan daha büyük olduğu görülmektedir. Modifikatör % 20 oranında katıldığı zaman AGE katılmış KDGEBA' ların akustik empedans değerleri EPM katılmış KDGEBA' ların akustik empedans değerlerinden daha büyük bulunmuştur. Modifikatör oranı %10' dan % 20' ye çıkarıldığı zaman her ikisinde de akustik empedans değeri büyürken bu oran % 30' a çıkarıldığı zaman her ikisinin akustik empedans değerinin küçüldüğü görülmektedir.

Genel olarak KDGEBA' lar incelendiğinde hem ultrasonik hız değerleri hem de esneklik modüllerinin en yüksek değerleri DGEBA:AGE ve DGEBA:EPM' de bileşim oranı 80:20 olduğu zaman elde edilmiştir. Bu sonuçlara göre DGEBA' nın hem AGE hem de EPM ile modifikasyonu için en uygun bileşim oranının 80:20 olduğu söylenebilir.

Saf PS, MPS ve PS kompozitlerin çekme testi ve darbe-yankı yöntemiyle ölçülen Young modülü değerlerine ait Çizelge 4.13 ve Çizelge 4.14 verilerine göre, hem çekme testi, hem de ultrasonik darbe-yankı yöntemiyle ölçülen Young modülü değerleri

birbirine çok yakın çıkmıştır. Bu değerler arasındaki küçük farklılıkların numunelerdeki hava boşlukları, çatlaklar gibi yapı kusurlarından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu sonuç malzemelerin birçok özelliklerinin ultrasonik yöntemlerle çok daha kısa zamanda malzemeye zarar vermeden ve çok daha ucuza ölçülebileceğini göstermesi açısından oldukça önemlidir.

Yapılan bu çalışmada, üç çeşit saf PS, altı çeşit MPS, onsekiz çeşit KPS ve altı çeşit KDGEBA' nın esneklik modülleri (L, G, K, E), Poisson oranı ve akustik empedans değerleri gibi mekanik özellikleri, ultrasonik darbe-yankı tekniği ile ölçülen ultrasonik hız değerleri yardımıyla belirlenmiştir. Esneklik modüllerinin genel tanımı gerilmenin gerinmeye oranıdır. Bu şekilde esneklik modüllerinin belirlenebilmesi için hangi esneklik modülü değeri ölçülmek isteniyorsa o yönde gerilme kuvveti uygulanarak gerinmenin belirlenmesi ve gerilmenin gerinmeye oranının alınması gerekir.

Sonuç olarak, PS ve PS bileşenli kompozitlerin esneklik modüllerinin mekanik testlerle hesaplanması oldukça zordur ve kompleks çalışmalar gerektirmektedir. Ayrıca mekanik testlerin pahalı ve karmaşık test aletleri gerektirmesi, testlerin uzun süre alması gibi birçok olumsuzluğu bulunmaktadır. Ultrases tekniği ile bütün esneklik modüllerini belirlemek için ise sadece numunenin bir yüzeyinden ultrasesin geçis süresinin ölçülmesi ve yoğunluk değerinin bilinmesi yeterlidir. Diğer yöntemlerle numunelere zarar verilirken ultrases tekniği kullanılan numunelerde hiçbir hasar oluşmamaktadır. Gerekli görülmesi durumunda işlemin istenildiği kadar tekrarlanabilme imkânı vardır.

PS, MPS, KPS ve KDGEBA' ların esneklik modülü değerlerinin bilinmesi özellikle bu ürünlerin hammadde olarak kullanıldığı endüstri alanlarında oldukça önemlidir. Bu polimerler hangi amaçla kullanılacaksa ve hangi yönde fazla yüklemeye maruz kalacaksa o yöndeki kuvvete karşı gösterdiği direnci fazla olan polimer seçilmelidir.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Çalışmadan elde edilen sonuçlar genel olarak kısaca şöyle özetlenebilir;

1- PS_{500} ve PS_{350}' nin SA, MA ve FA ile modifikasyonu hem boyuna ve enine ses dalga hızlarını hem de esneklik modülü değerlerini arttırmıştır.
2- PS_{500}' ün ve PS_{350}' nin ultrases hız değerlerinde ve esneklik modülü değerlerinde en büyük artışlar FA ile modifikasyon sonucu elde edilmiştir.
3- KPS_{500}' lerin ve KPS_{350}' lerin yoğunluk, hız, akustik empedans, Poisson oranı ve diğer bütün esneklik modülü değerleri PS_{230}' un değerlerinden daha yüksek çıkmıştır.
4- KPS_{500}' lerin ve KPS_{350}' lerin yoğunluk, hız, akustik empedans, Poisson oranı ve diğer bütün esneklik modülü değerleri en fazla 70:30' luk PS_{230}:SAI ve PS_{230}:SAII ve 90:10' luk PS_{230}:FAI ve PS_{230}:FAII kompozitlerinde elde edilmiştir.
5- DGEBA' nın AGE ve EPM ile modifikasyonu sonucu elde edilen KDGEBA' lar içerisinde en büyük yoğunluk, hız, akustik empedans, Poisson oranı ve diğer bütün esneklik modülü değerleri en fazla 80:20' lik DGEBA:EPM bileşiminde elde edilmiştir.
6- KDGEBA' lar için en uygun bileşim oranının, DGEBA:AGE ve DGEBA:EPM için 80:20 olduğu görülmüştür.
7- DGEBA'nın EPM ile modifikasyonu AGE ile modifikasyonuna göre daha iyi sonuçlar vermiştir.
8- Saf PS ve KPS' lerin çekme testi ve darbe-yankı tekniği ile ölçülen Young modülü değerleri birbirine çok yakın çıkmıştır.

Bu çalışmada yapılan modifikasyonların PS ve DGEBA' ların fiziksel özellikleri üzerine etkisi, bu malzemelerdeki ultrases hızları ölçülerek incelenmiştir. Teknolojinin gelişmesiyle ultrases cihazları da oldukça gelişmiştir. Yeni cihazlar sayesinde incelenen numunelere ait bütün değerler bilgisayar programlarıyla hesaplanabilmektedir. Ultrases hızları çok hassas olarak ölçülebilmekte ve malzemelerdeki boşluk, çatlak ve farklı oluşumlar hakkında tam ve kesin değerlere ulaşılabilmektedir. Bu çalışmada mekanik testlerle ve ultrasonik darbe-yankı tekniği ile ölçülen esneklik modüllerinin birbirine çok yakın olduğu görülmüştür. Bu nedenle buna benzer çalışmaların ultrasonik yöntemle incelenmesi önerilebilir.

KAYNAKLAR

Abd El-A11, N.S., Yehia, A.A. and El-Sabbagh, S.H., 1994, Ultrasonic Studies on Some Rubber Blends, *J. Pure Appl. Ultrason,* 16: 103.

Abi, E., 2007, Yapı seramiklerinde ultrases geçim hızı ile malzeme parametreleri ilşkisinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Afyon.

Afifi, H.A. and Naser, H.I., 2003, *In: seventh Arbic Inter. Conf. On Polym. Science and Tech.,2003,* Cairo, Hurghada, Egypt.

Afifi, H.A., Al-Ackad, M.M. and Imamura, T., 2002, Polymethyl methacrylate, polystrene and polyvinyl chloride determination of elastic constants by water immersion ultrasonic sing-around method. *KGK Kautschuk Gummi Kunststoffe* 55. Jahrgang, Nr: 6.

Ahmetli, G., Yazıcıgil, Z., Koçak,A. ve Kurbanlı, R., 2005, Effects of different molecular weights of polystyrene on the acylation reaction and on the reaction kinetics, *J App Polym Sci.,* 96,253-259.

Ahmetli, G., Koçak, A., Şen, N. ve Kurbanlı, R., 2006 a, Adhesion and corrosion resistance properties of coatings obtained from modified low-moleculer-weight polystyrenes, *J. Adhesion Sci Technol*., 20, 13, 1431-1441.

Ahmetli, G., Şen, N., Pehlivan, E. ve Durak, S., 2006 b, Adhesive and anticorrosive polymeric coatins obtained from modified ındustrial waste oligostyrenes, *Progress In Organic Coatings*, 55, 262-267.

Akkurt, S., 1991, Plastik malzeme bilgisi, *İTÜ Makine Fakültesi, Birsen Yayınevi*.

Alfrey, T., 1948, *J.Mechanical Behaviour of High Polymers*, Interscience Publishers, New York.

Alig, I., Fedtke, M., Häusler, K. G., Tänzer, W. and Wartewig, S., 1988, Modified epoxies as studied by ultrasonic methods, *Progr. Colloid Poly. Sci*., 78, 54.

Alig, I., Häusler, K., Nancke, K., Tänzer, W. and Wartewig, S., 1989, Ultraschalluntersuchungen zur Bildung von diolmodifizierten Epoxidharznetzwerken, *Acta Polymerica*, 40, 508.

Alig, I., Nancke, K. and Johari, G.P., 1994, Relaxation in thermosets, XXVI. Ultrasonic Studies of the Temperature Dependence of Curing Kinetics of Diglycidyl Ether of Bisphenol A with Catalyst, *Journal of Polymer Science: Part B*, 32, 1465.

American Society for Testing and Materials, 1993, D638M-91a standart test method for tensile properties of plastics, *1993 Annual Book of ASTM Standarts,* Vol 08.01 Plastics (1), ASTM International, Philadelphia, 174- 182.

Anık, S. ve Anık, E.S., 1977, Malzeme bilgisi ve muayenesi, (Weissbach, W.'den çeviri), *Kurtulmuş Matbaası*, 180.

Anonim 1, 2010, http: // stu.inonu.edu.tr / ~idal / piezo.htm [Ziyaret Tarihi: 1 Mayıs 2010].

Anonymous 1, 2010, http: // www.obultrasound.net / ultrasonics_history.html [Ziyaret Tarihi: 1 Mayıs 2010].

Anonymous 2, 2010, http: // www.ndted.org / EducationResources / CommunityCollege / Ultrasonics / cc_ut_index.htm [Ziyaret Tarihi: 10 Mayıs 2010].

Anonymous 3, 2010, http: // www.cnde.iastate.edu / ncce / UT_CC [Ziyaret Tarihi: 10 Mayıs 2010].

Anonymous 4, 2010, http: // hyperphysics.phyastr.gsu.edu / hbase / sound / tralon.html [Ziyaret Tarihi: 20 Mayıs 2010].

Anonymous 5, 2010, http: // www.kettering.edu / ~drussell / Demos / waves / wavemotion.html [Ziyaret Tarihi: 1 Mayıs 2010].

Anonymous 6, 2010, http : // web.ics.purdue.edu / ~braile / edumod / waves / WaveDemo.htm#Seismic_Waves [Ziyaret Tarihi: 5 Nisan 2010].

Anonymous 7, 2010, http: // www.chm.bris.ac.uk / webprojects2004 / phillips / PZ / pzeffect.html [Ziyaret Tarihi: 1 Mayıs 2010].

Anonymous 8, 2011, Elastic modulus measurement. http : // www.olympus-ims.com/ en / ndt-application / 183-id.209715270.html [Ziyaret Tarihi: 08.01.2011].

Aral, E., 1989, Ultrases ders notları, *Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Eskşehir.

Arıkan, A., Kaynak, C. ve Tincer, T., 2002, Influences of liquid elastomer additive on the behavior of short glass fiber reinforced epoxy, *Polymer Composites*, 23 (5): 790-805.

Arman, J. and Lahvrouni, A., 1986, Ph. Monge, *Eur. Polymer J.,* 22, 955.

Avivi, S., Nitzan, Y., Dror, R. and Gedanken, A., 2003, *J.Am. Chem. Soc.* 125:15712

Avundukluoğlu, M.A. ve Turhan, Ş., 2007, Fizik terimleri sözlüğü. *Ötüken Neşriyet A.Ş., Özener Matbaası,* İstanbul.

Bagchi, S., Nema, S.K. and Singh, R.P., 1986, *Eur. Polymer J.* 22, 851.

Bağcı, İ. 2006, Epoksi reçinesi ile nanokompozit sentezi, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,* Ankara.

Baldev, R., Rajendran, V. and Palanichamy, P., 2004, Science and technology of ultrasonics, *Narosa Publishers*, New Delhi.

Bayer, O. ve Karabulut, Y., 2004, Ultrasesin fiziği ve teknolojideki uygulamaları, *E.Ü. Fen Fakültesi Teksir Yayınları*.

Bergmann, L., 1949, Der ultrashall and seine anwendung in wissenschaft und technik, Zürich.

Berke, M. and Hoppenkamps, U., 1990, Testing materials ultrasonically, *Krautkrämer Training System,* Level 1, 3rd Edition.

Berke, M. and Hoppenkamps, U., 1992, Practical training with digital ultrasonic ınstruments, *Krautkrämer Training System*, Part 4, 3rd Edition.

Bilge, A.N., 2003, Türkiye'de tahribatsız muayene uygulamaları, *2. Uluslar arası Tahribatsız Muayene Sempozyumu ve Sergisi, Yeditepe Üniversitesi, 9 – 11 Ekim 2003,* İstanbul.

Bland, D.R., 1960, The theory of linear viscoelasticity, *Pergamon Press*, London

Braun, D. 1970, Polistirenin kimyasal değişiklikleri, *Kunststoffe*, 50, 375.

Cankurtaran, M. ve Çelik, H., 1995, Yüksek sıcaklık süperiletkenlerinin elastik özelliklerinin ultrasonik teknikle incelenmesi, *TBAG-1209 Nolu Tübitak Projesi,* Ankara.

Cansu, Ç., 2008, Ultrases ile ağaçların bazı fiziksel özelliklerinin belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Eskisehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Eskişehir.

Challis, R. E., Cocker, R. P., Chadwick, D. L., Dare, D. J., Martin, C., Mahendrasingam, A. and Fuller, W., 2000, Ultrasonic measurements related to evolution of structure in curing epoxy resins, *Plastics, Rubber and Composites*, 29, 110.

Challis, R. E., Unwin, M. E., Chadwick, D. L., Freemantle, R. J., Partridge, I. K., Dare, D. J. and Karkanas, P. I., 2003, Following network formation in an epoxy/amine by Ultrasound, Dielectric and Nuclear Magnetic Resonance Measurements: A Comparative Study, *Journal of Applied Polymer Science*, 88, 1665.

Challis, R.E., Blarel,F., Unwin, M.E., Paul, J. and Guo, X., 2009, Models of ultrasonic wave propagation in epoxy materials, *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, vol. 56, no. 6.

Corsepius, H.W., 1977, Nondestructive testing of materials using ultrasonics, *Introduction to Basics,* Special Issue 218, USA.

Cowie, J. M. G., 1991, Polymers chemistry & physics of modern materials, *2nd Edt., Blackie*, Glasgow and London.

Cunningham, J. R. and Ivey, D.G., 1956, Dynamic properties of various rubbers at high frequencies, *Journal of Applied Physics*, 27, 967.

Çatalgil Giz, H., Arısan, F., Kuntman, A., Öncül Koç, A. and Giz, A., 1998, Dielectric studies on allyl methacrylate-methylmethacrylate copolymers in a slightly polar medium, *Polymer Bulletin*, 40,563-568.

Çatalgil Giz, H., Giz, A., Alb, A.M., Öncül Koç, A. and Reed, W. F., 2002, Monitoring of composition, sequence length, and molecular weight distributions during free radical copolymerization, and subsequent determination of reactivity ratios, *Macromolecules,* 35, 6557-6571.

Çatalgil Giz, H., Giz, A. and Öncül Koç, A., 1999, Termination mechanism of polymethyl methacrylate and polystyrene studied by ultrasonic degradation technique, *Polymer Bulletin*, 43, 215-222.

Değirmenci, M., Çatalgil Giz, H. and Yağcı, Y., 2004, Synthesis of block copolymers by combined ultrasonic ırradiation and reverse atom transfer radical polymerization processes, *J. of Polym Sci, Polym. Chem. Ed*, 42, 534.

Demirata Öztürk, B., Gümüş, G., Öncül Koç, A., Çatalgil Giz, H., 1996, Preconcentration of copper ion in aqueous phase on methacrylate polymers, *Journal of Applied Polymer Science*, 62, 613-616.

Demircioğlu, G., 2006, Kısa cam elyaf takviyeli epoksi kompozit malzemelerde elyaf boyutunun etkisi, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara.

Deng, S., Ye, L. and Mai, Y., 1999, Influence of fibre cross-sectional aspect ratio on mechanical properties of glass fibre/epoxy composites I. Tensile and flexure behaviour, *Composite Science and Technology*, 59 (9): 1331-1339.

Deniz, A., 2005, Alümina seramiklerinde tanecik boyutunun ultrases ile belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Afyonkarahisar.

Deniz, C., 2007, Geniş bandlı 3 MHZ ultrasonik dönüştürücünün tasarımı ve gerçeklestirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Bilişim Enstitüsü*, Ankara.

Deveci, H., 2009, Karboksil gruplu stiren kopolimerleri ve modifiye polistirenlerin sentezi ve özelliklerinin incelenmesi, Doktora Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,* Konya.

Dinçer, N., 2004, Hegzagonal kristallerin esneklik özellikleri üzerine bir araştırma, Yüksek Lisans Tezi, *Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri enstitüsü*, İzmir.

Dong, H., Wu, J., Wang, G., Chen, Z. and Zhang, G., 2009, The ultrasound-based ınterfacial treatment of aramid fiber/epoxy composites, *Journal of Applied Polymer Science,* Vol. 113, 1816–1821.

Döring, J., Mc Hugh, J., Schmachtenberg, E. and Töpker, J., 2002, RTM process optimization using ıncorporated ultrasonic sensors, *5. International AVK-TV Conference 2002,* Baden-Baden, Germany.

Döring, J., McHugh, J., Bartusch, J. and Stark, W., 2003, Process monitoring using ıncorporated ultrasound sensors, *6th International Conference for Reinforced Plastics 2003,* Baden–Baden, Germany.

Eckert, S., Hoffmann, S., Meier, G. and Alig, I., 2002, *Phys. Chem.,* 4:2594.

Ege, Y. ve Göktepe, M., 2004, Manyetik yöntemde, çatlakları algılamada kullanılan sensörlerin karakteristiklerinin karşılaştırılması, *Süleyman Demirel üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 8-2, 137-140.

Ekinci, Ş., 2002, Malzemelerin ultrasonik testi seviye 1, *Çekmece Nükleer Araştırma Enstitüsü,* İstanbul.

Erim, F. B., Esen, N., Öncül Koç, A., Çatalgil Giz, H., 1996, Preconcentration of cadmium ion in aqueous phase on polymethylmethacrylate, polymethacrylonitrile and their copolymers, *Journal of Applied Polymer Science*, 61, 715- 717.

Ertaş, İ., 1995, Denel fizik dersleri, *Ege Üniversitesi Fen Fakültesi Yayınları*, İzmir.

Fenner, D.B., 1987, *J. Chem.Phys.,* 87:2377.

Ferry, J. D., 1980, Viscoelastic properties of polymers, *3rd edt, John Wiley and Sons Inc.,* New York.

Frect, J.M., Smet, M.D. and Faral, M.J., 1979, Functionalization of crosslinked polystyrene resin, *Polymer*, 20, 675-680.

Freemantle, R. J. and Challis, R. E., 1998, Combined compression and shear wave ultrasonic measurements on curing adhesive, *Measurement Science & Technology,* 9, 148.

Frigione, M., Maffezzoli, A., Acierno, A., Luprano, V.A.M. and Montagna, G., 2000, Nondestructive and in-situ monitoring of mechanical property build-up in epoxy adhesives for civil applications by propagation of ultrasonic waves, *Polymer Engineering and Science,* 40, 656.

Fu, S., Lauke, B., Mäder, E., Yue,C. and Hu, X., 2000, Tensile properties of shortglass-fiber- and short-carbon-fiber-reinforced polypropylene composites, *Composites: Part A: Applied Science and Manufacturing,* 31 (10):1117-1125.

Fuchs, F.J., 2002, Ultrasonic cleaning: fundamental theory and application, www.blackstone-ney.com/pdfs/T_Fundamentals.pdf [Ziyaret Tarihi: 4 Nisan 2010].

Garney F.A., 1967, Process for acylation aromatic polymer. *USA Patent Aplication*, 3299025.

Gaylord, N.G. and Mehta, R., 2003, Peroxide-catalyzed grafting of maleic anhydride onto molten polyethylene in the presence of polar comgeunds, *J. Appl. Polym. Sci.,* 26,4, 1189-1198.

Gaylord, N.G., Mehta R., Mohan, D.R. and Kumar, V., 2003, Maleation of linear low-density polyethylene by reactive processing, *J. Appl. Polym. Sci.,* 44, 11, 1941-1949.

Gibson, W., 1980, Chemical modification of polymers sulfonation of polystyrene surfaces, *Macromolecules*, 13, 34-41.

Goodman, S. H., 1998, Hanbook of thermoset plastics, *2nd ed., Noyes Publications*, New Jersey, 193-268.

Grechishkin, V.A., Kazarian, L.G. and Perepechko, I.I., 1970, *Akust.zh.,*16, 2:223.

Güler, Ç. ve Çobanoğlu, Z., 1997, Plastikler, çevre sağlığı, *Temel Kaynak Dizisi,* No:46, Ankara.

Gündüz, T., 1993, İnstrumental analiz, *Ankara Üniverstitesi Fen Fakültesi*, Ankara.

Güney, H. Y., 2005, Elastic properties and mechanical relaxation behaviors of PVDF (poly (vinylidene fluoride)) at temperatures between -20 and 100 ^{0}C and at 2 MHz ultrasonic frequency, *J. Poly. Sci. Part B: Polymer Physics*, Vol. 43, 2862–2873.

Güney H. Y., Oskay, T. and Özkan, H.S., 1995, Ultrasonic properties of PVC(S-27/R63) in the glassy region ", *J. Poly. Sci. Part B: Polymer Physics*, 33 (7), 985-991.

Gür, C. H., 2001, Investigation of SiCp reinforced aluminium matrix composites by shear and longitudinal ultrasonic waves, INSIGHT – *J British Inst of NDT* 43, 748-750.

Gür, C. H., 2003, Investigation of microstructure-sound velocity relationship in SiCp reinforced aluminium metal matrix composites, *Mater. Sci. Eng.- A,* 361/1-2, 29-35.

Gür, C. H. and Keleş, Y., 2003, Ultrasonic characterisation of hot-rolled and heat-treated plain carbon steels, INSIGHT – *J. British Inst of NDT* 45, 615-620.

Gür, C. H. and Ögel, B., 2001, Non-destructive microstructural characterization of aluminum matrix composites by ultrasonic techniques, *Mater. Charac.,* 47/3-4, 227-233.

Gür, C. H. and Tuncer, B.O., 2005, Characterization of microstructural phases of steels by sound velocity measurement, *Mater. Charac.,* 55, 160-166.

Gür, C.H. and Yıldız, I., 2004, Non-destructive investigation on the effect of precipitation hardening on impact toughness of 7020 Al-Zn-Mg alloy, *Mater. Sci. Eng.- A,* 382/1-2, 395-400.

Gür, C. H. and Yıldız, I., 2008, Utilization of non-destructive methods for determining the effect of age-hardening on impact toughness of 2024 Al-Cu-Mg Alloy, *J. Nondestructive Evaluation,* 27, 99-104.

Gürpınar, G. 2007. Ses ötesi dalgaların cevher zenginlestirmede kullanılabilirliginin arastırılması, Doktora Tezi, Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.

Güzel, H., 1996, Transduser tasarımı ve sıvı gıdalarda ultrasonik hız ölçümleri, Doktora Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya.

Güzel, H. ve Merdan, M., 1998, Sıvı gıdalarda ultrasonik hız ölçümleri, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi,* 15, 1-2, 1-14.

Güzel, H. ve Merdan, M., 1999, Bitkisel sıvı yağlarda ultrasonik hız ölçümleri, *S.Ü. Eğitim Fakültesi Fen Bilimleri Dergisi*.

Haris, B., 1986, Engineering composite materials, *The Institute of Metals*, London, 1-15: 84-91.

Hazer, B., 1993, Polimer teknolojisi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, *K.T.Ü. Basım Evi*, Yayın No: 161, Trabzon.

Hellier, C., 2001, Handbook of nondestructive evaluation. *McGraw-Hill Professional Publishing*, Blacklick, OH, USA.

Higazy, A.A., Afifi, H., Khafagy, A.H., El-Shahawy, M.A. and Mansour, A.M., 2006, Ultrasonic studies on polystyrene/styrene butadiene rubber polymer blends filled with glass fiber and talc. *Ultrasonics* 44,e1439–e1445.

Hiorns, R.C., Khoukh, A., Ghigo, P., Prim, S. and Francois, J., 2002, *Polymer*, 43:3365.

Hirsekorn, S., 1982. The scattering of ultrasonic waves by poly crystals, *J.Acoust Soc.Am.* 72, pp.1021-1031.

Hourston, D.J., Hughes, I.D., 1977, *Polymer* 18, 1175.

Hourston, D.J., Hughes, I.D., 1978, *Polymer* 19, 1181.

Hueter, T. F. and Bolt, R. H., 1955, Sonics: Techniques for the use of sound and ultrasound in engineering and science, *John Wiley and Sons*, Inc.

Jones, H.M., 1956, *Canad. J.Chem.,* 34, 948.

Jordan, T.L. and Ounaies, Z., 2001, *Piezoelectric ceramics characterization*, NASA CR-2001-211225, ICASE Report No. 2001-28, NASA Langley Research Center Hampton, US.

Iba, H., Chang, T. and Kagawa, Y., 2002, Optically transparent continuous glass fibre-reinforced epoxy matrix composite: fabrication, optical and mechanical properties, *Composites Science and Technology*, 62 (15):2043-2052.

Ilıcan, S., 1995, Ultrases ile betonun bazı fiziksel özelliklerinin tayini, Yüksek Lisans Tezi, *Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Eskişehir.

Ivey, D.G, Mrowca, B.A. and Guth, E., 1949, Propagation of ultrasonic bulk waves in high polymers, *Journal of Applied Physics*, 20, 486.

İşçi, C., 1978, Hegzagonal kristallerin esneklik özellikleri, *Ege Üniversitesi Dergisi*, Seri A, C.2, 3,279-299.

İşçi, C. ve İlk, E.M., 1999, Tek Kristal sistemlerde esneklik özelliklerinin incelenmesi, *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi,* C.1,3,81-88.

Kak, A.C. and Dines, K.A., 1978, Signal processing of broadband pulsed ultrasound: measurement of attenuation of soft biological tissues, *IEEE Transactions on Biomedical Engineering,* 25, 321.

Karahan, A., Demir, A., Özdoğan, E., Öktem, T. ve Seventekin, N., 2007, Tekstil malzemelerinin yüzey modifikasyonlarında kullanılan bazı yöntemler, *Tekstil ve Konfeksiyon Dergisi*, Yıl 17, Sayı 4, Ekim-Aralık.

Kaushik, A., Singh, P. and Kaushik, J., 2006, The mechanical properties and chemical resistance of short glass-fiber-reinforced epoxy composites, *International Journal of Polymeric Materials,* 55 (6):425-440.

Kaya, A., 2005, Yüksek molekül ağırlıklı blok polistirenlerin asetik anhidritle kimyasal modifikasyon reaksiyonun ve ürünlerinin incelenmesi, Yüksek Lisans tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,* Konya.

Kayrak, M.A., 2001, Uçak bakımında tahribatsız kontrol yöntemleri, Anadolu Üniversitesi, *Sivil Havacılık Yüksekokulu Yayınları*, Eskisehir.

Kim, H., Lee, J.W., 2002, *Polymer,* 43:2585.

Kolsky, H., 1963, Stress waves in solids, *Dover Publications*, New York.

Kono, R., 1961, The dynamic bulk and shear viscosities of PVC, *Journal of the Physical Society of Japan*, 16, 1793.

Kökdemir, E., 2007, Alaşımsız yapı çeliği levhalarında kaynak dikişlerinin ultrasonik muayenesi, Yüksek Lisans Tezi, *Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.

Krause, S., 1978, In: D.R. Paul, S. Newman (Eds.), Polymer-polymer compatibility in polymeric blends, vol. 1, *Academic press*, New York.

Krautkrämer, J. and Krautkrämer, K., 1990, Ultrasonic testing of materials, Krautkrämer GmbH & Co., 4th Edition, *Springer-Verlag*.

Krautkramer, J. and Krautkramer, H., 1993, Ultrasonic testing of materials, *Narosa Publishing House*, New Delhi.

Kroll, J., Alshuth, T. and Shuster, R. H., 2006, Dynamische moduli von elastomeren in ultraschall und dynamisch-mechanischer-analyse, *Kautschuk, Gummi, Kunststoffe,* 4, 49.

Kundu, T., 2004, Ultrasonic nondestructive evaluation, *CRC Press*, 1. Edition, Danvers, USA.

Kurbanova, R.A., Ragimov, A.V. ve Aslanov, K.A., 1974, Polistirenin epiklorhidrinle kimyasal modifikasyonu, *Plast. Massy.,* 6, 66-68.

Kurbanova, R.A., Ragimov, A.V. ve Aslanov, K.A., 1979, Alkilleşmiş polistirenin yapısı ve özelliklerinin incelenmesi, *Zh. Prikl. Khim*., 10, 2311-2314.

Kurbanova R.A, Kroxmalniy A.M., Zin I.I. and Nagieva Y.M., 1990, *J. Fizikoximiceskaya Mexanika Mater.,* v 5, 114.

Kurbanova, R.A., Mirzaoğlu, R., Akovalı, G., Rzaev, Z.M.O., Karataş, I. and Okudan, A., 1996, Side-chain functionalization of polystyrene with maleic anhydride in the presence of lewis acids, *J Appl Polym Sci*, 59, 235-241.

Kurbanova, R., Mirzaoğlu, R., Karataş, İ. ve Uçan, İ., 2005, Polimer ve plastikler teknolojisi, *S.Ü. Fen-Edebiyat Fakültesi Yayınları*, Konya.

Landau, L.D. and Lifshitz, E.M., 1986, Theory of elasticity, *Butterworth & Heinemann*.

Lee S.C. and Suen J.M., 1990, Ultrasonic nondestructive Evaluation of matrix structures and nodularity in cast ırons, *Metallurgical Transaction A*., Volume 20. P. 2399-2407.

Lee, S., Han, S., Cho, D., Park, W. and Lee, S., 2005, Influence of chopped fibre length on the mechanical and thermal properties of silk fibre-reinforced poly(butylene succinate) biocomposites, *Polymers & Polymer Composites*, 13 (5): 479-488.

Li, J. and Li, H.M., 2005, Functionalization of syndiotactic polystyrene with succinic anhydride in the presence of aluminum chloride, *European Polymer Journal* 41, 823–829.

Lionetto, F. and Maffezzoli, A., 2004a, Relaxations during the postcure of unsaturated polyester networks by ultrasonic wave propagation, dynamic mechanical analysis, and dielectric analysis, *Journal of Polymer Science Part B*, 43, 596.

Lionetto, F., Rizzo, R., Luprano, V. A .M. and Maffezzoli, A., 2004b, Phase transformations during the cure of unsaturated polyester resins, *Materials Science and Engineering A*, 370, 284.

Love, A. E. H., 1927, Mathematical theory of elasticity, *Cambridge University Press*, London.

Lubin, G., 1969, Handbook of fiberglass and advanced plastic composites, *Van Nostrand Reinhold Company*, New York, 143-181, 46-84.

Maffezoli, A., Quarta, E., Luprano, A. M., Montagna, G. and Nicolais, L., 1999, Cure monitoring of epoxy matrices for composites by ultrasonic wave propagation, *Journal of Applied Polymer Science*, 73.

Mason, W.P., 1965, Physical acoustics, vol.111B, *Academic Press*, New York, 46.

Mayer, W., Hoffmann, S., Meier, G. and Alig, I., 1997, *Phys. Rev. E.,* 55:3102.

Memmedov, F. A. ve Zeynalova Z., 1981, Plastik kütlelerin teknolojisi, 70-83, Bakü.

Mets, D.V. and Mersobian R.B., 1971, Alkylation of polystyrene by isopropyl chloride, *J.Polym. Sci.,* 2115.

Meyer, P.A., 1988, Ultrasound as a quality control tool, quality progress, February, 51-53.

Mc Hugh, J., Stark, W. and Döring, J., 2003, Evaluation of the cure behaviour of epoxy resin using rheometric and ultrasonic techniques, Nondestructive Characterization of Materials XI (2003), 651-658; Edt. Robert E. Green, *Springer-Verlag.*

Mc Hugh, J., Döring, J., Stark, W. and Guey, J. L., 2006, Relationship between the mechanical and ultrasound properties of polymer materials, *9th European Conference on NDT, 2006,* Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V Berlin.

McHugh, J., 2008, Ultrasound technique for the dynamic mechanical analysis (DMA) of polymers, *BAM- Dissertationsreihe*, Berlin.

McSkimin H. J., 1964, Ultrasonic methods for measuring the mechanical properties of liquids and solids, *Physical Acoustics* vol 1, edt. Warren P. Mason, New York: Academic.

Mikhailov, I. G., Solovev, V.A. and Syrnikov, Yu. P., 1964, Osnovy molekülyarnoi akustiki (The fundamnetal of molecular acoustics), Moscow.

Mirzaoğlu R., Kurbanova R. and Ersöz M. 1997. Handbook of Engineering Polymeric Materials, No.4, p. 888 (USA).

Mogno, A., 1977, Phosforalkylation of polystyrene, *J.Polum. Sci.*,513–519.

Moseley, W.W., 1960, *J. Appl.Polymer Sci*.,3,9:266.

Muthupari, S., Raghavan, S.L., Rao, K.J., 1996, *Mater. Sci. Eng. B* (38), 237.

Mutlu, İ., 2006, Paslanmaz ve takım çeliklerinde tane boyutunun ultrasonik dalgaların saçılmasına etkisi, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,* İstanbul.

Nakao, A., Koboyashi, T. and Iwaki, M., 2002, Surface modification of polystyrene by K ion Implation, 191, 685-689.

Nolle, A. W., 1946, Acoustic determination of the physical properties of rubber-like materials, *J. Acoustic Society of America*, 19, 194.

Nolle, A. W. and Mowry, S.C., 1948, Measurement of ultrasonic bulk-wave propagation in high polymers, *J. Acoustical Society of America*, 20, 432.

Nolle, A. W. and Sieck, P.W., 1952, *J.Appl.Phys*.,23:888.

Okudan, A., 1998, Blok polistirenin katyonik katalizörler ortamında maleik anhidritle kimyasal modifikasyonunun ve kullanım alanlarının incelenmesi, Doktora Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya.

Onaran, K., 2006. Malzeme bilimi, *Bilim Teknik Yayınevi*,10. Baskı.

Öktem, H.F., 2002, Ultrasonik tahribatsız muayene tekniginin sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmesi, Doktora Tezi, *Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir.

Öncül Koç, A., 2001, Ultrases kullanılarak elde edilen etiketli polimerler ve uygulamaları İstanbul Teknik Üniversitesi

Öncül Koç, A., Çatalgil Giz, H., 1995, Allyl reactivity in group transfer copolymerization, *Macromol.Chem.Phys*., 196, 2475-2481.

Öncül Koç, A., Giz, A. and Çatalgil Giz, H., 2004, Obtaining the ratio of termination rate constants of poly(methyl methacrylate) by the ultrasonic scission method, *ARI The Bulletin of the İstanbulTechnical University***,** 54, (2), 6.

Özdemir, Ö., 2007, Otomotiv sektöründe kullanılan küresel grafitli dökme demir üretimine etki eden parametrelerin teorik incelenmesi ultrasonik ses hızı yöntemiyle tahribatsız kontrolü ve mekanik özelliklerinin karsılastırılması, Yüksek Lisans Tezi, *Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Eskişehir.

Özden, N., 1981, Sesötesi (ultrasonik) ile muayene, *SEGEM,* Yayın No: 48, Ankara, 142 s.

Özer, H., 1986, Ultrasonik dalgaların özellikleri, Ultrasonografi Seminerleri, *Tıbbi Ultrasonografi Dernegi Yayın Organı*, İzmir.

Özkeçeci, A., 2006, Yüksek molekül ağırlıklı emülsiyon polistireninaçilasyon reaksiyonuve fiziko−mekanik özelliklerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniverstitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya.

Öztürk, A. and Gür, C. H., 2005, Determination of the influence of TiO2 on the elastic properties of a mica based glass ceramic by ultrasonic velocity measurements, *J. of Non-Crystalline Solids,* 351, p. 3655-3662.

Pain, H.J., 1993, The physics of vibrations and waves, 4th Edition, *Wiley & Sons*, New York.

Papadakis E. P., 1976, Ultrasonic velocity and attenuation: measurement methods with scientific and industrial applications, *Physical Acoustics*, vol. 12, New York: Academic.

Parthun, M.G., 1994, Dynamics of a molecules growth: ultrasonic relaxation studies, *Journal of Chemical Physics*, 15, 6301.

Peker, M., 1989, Ultrases ile katı, sıvı ve gaz ortamların fiziksel özelliklerinin incelenmesi, Yüksek lisans tezi, *Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, s. 61.

Perepechko, I.I., 1975, Acoustic methods of ınvestigating polymers, (Translated from Russian by G.Leib), English Translation, *Mir Publishers*, Moscow.

Perepechko, I.I., Danilov, V.A. and Nizhegorodov, V.V., 1996, Ultrasonıc velocity in epoxy resin at temperatures down to 4.2 K. *Mechanics Of Composite Materials*, Vol. 32, No. 4.

Pethrick, R.A., 1983, Ultrasonic studies of macromolecules, *Prog. Polymer Science*, 9, 197-295.

Piau, M., Verdier, C., 1996, On-line ultrasonic characterization of polymer Blends, *Proceeding XIIth Int Congress on Rheology*, 1:43.

Polymeric Materials Encylopedia, 1996, *CRC Press Inc.,* USA, 3-7.

Postacıoğlu, B., 1981, Cisimlerin yapısı ve özellkleri, *İTÜ Yayınları*, No:1176.

Ramazanoğlu, M., 2010, *Ultra ses*, http: // www.sizinti.com.tr / konular / ayrinti / ultra-ses.html [Ziyaret Tarihi: 29 Temmuz 2010].

Richeton, J., Schlatter, G., Vecchio, K. S., Remond, Y. and Ahzi, S., 2005, A unified model of the stiffness of amorphous polymers across transition temperatures and strain rates, *Polymer*, 46, 8194.

Saçak, M., 2005, Polimer kimyası, *Gazi Kitabevi*, Ankara.

Sahoune, A., Massine, F. and Piche, L., 1996, Ultrasonic measurement of relaxation behaviour in polystyrene, *Journal of Polymer Science: Polymer Physics*, 34, 341.

Sakai, T., Sakai, H. and Abe, M., 2002, Langmuir 18:3763.

Sarıkaş, M., 2008, Ultrasonik attenuatıon metoduyla karbon çeliklerinde sönüm katsayılarının belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon.

Sarpün, İ.H., 2004, Ultrases yöntemi ile çesitli mermerlerin ortalama tanecik boyutlarının tayini, Doktora Tezi, *Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Eskisehir.

Savaroğlu, G., 1996, Sıvılarda ultrases uygulamaları, Yükseklisans tezi, *Osmangazi Üniversitesi,* s.80, Eskişehir.

Savasçı, T., Uyanık, N. ve Akovalı, G., 1998, Ana hatları ile plastikler ve plastik teknolojisi, *Çantay Kitabevi*, İstanbul.

Savaşkan, T., 1999, Malzeme bilgisi ve muayenesi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, *Derya Basım Evi*, Trabzon.

Selvin, T.P., Kuruvilla, J. and Sabu, T., 2004, Mechanical properties of titanyum dioxide-filled polystrene microcomposites, *Matterial Letters*, 58: 281-289.

Serway, R.A., 1996, Fenciler ve mühendisler için fizik, Editör; Prof.Dr. Kemal Çolakoğlu, *Palme Yayıncılık*, Ankara.

Seshadri, A.T., Narasimham, A.V. and Subramangam, B., 1987, *J. Pure App. Ultrasonic* 9, 54.

Show,S., Singh, R.P.,1987, *Eur. Polymer J.,* 23, 547.

Shull, P. J., and Tittmann, B. R. 2002. *Ultrasound, in nondestructive evaluation: theory, techniques, and applications*, P. J. Shull, Ed., Marcel Dekker, Inc, New York, NY, pp. 63-193.

Sidkey M.A., Yehia, A.A., Abd El-Malak N.A. and Gaafar M.G., 2001a, Compatibility studies on some rubber blend systems by ultrasonic technique, *J. Materials Chem and Phys,* 14:23.

Sidkey M.A., Yehia, A.A., Abd El-Malak N.A. and Gaafar M.G., 2001b, Elastic properties of some rubber blends, *J. Pure Appl Ultrasonic,* 23:610.

Sigh, Y.P., Das, S., Maiti,S., Sigh, R.P., 1981, *J. Pure App. Ultrasonic,* 3, 1.

Sigh, Y.P., Sigh, R.P., 1983a, *Eur. Polymer J.* 19, 535.

Sigh, Y.P., Sigh, R.P., 1983b, *Eur. Polymer J.* 19, 559.

Sigh, Y.P., Sigh, R.P., 1984, *Eur polymer J.* 20, 201.

Siqueira-Petri, D.F., Wenz, G., Schunk, P., Schimmel, T., Bruns, M. and Dichtl, M.A., 1999, Surface modification of thin polystyrene films, *Colloid-Polym Sci.277*, 673-679.

Somanathan,N., Sanjay,A. and Arumugam, V., 2002, Compatibility studies on polystyrene and poly-n-butyl methacrylate, *Journal Of Applied Polymer Science*, Vol. 83, 2322–2330.

Stark, W. and Döring, J., 1997, Aushärtung von Duroplasten mit ultraschall messen, *Materialprüfung*, 39, 308.

Stark, W., Döring, J., McHugh, J. and Rath, M., 1999, Fließ-härtungsverhalten von vernetzenden systemen- das neue BAM Verfahren im kritischen vergleich, *2. Int. Jahrestagung der AVK/TV,* Baden-Baden, Tagungsband.

Stefan, K. and Zdenko, F., 1996, Ultrasonic measurements and technologies, *Chapman and Hall,* London.

Suslick, K.S. and Price, G.J., 1999, *Annu Rev. Mater. Sci.* 29:295.

Sutherland, H. J. and Lingle, R., 1972, An acoustic characterization of polymethylmethacrylate and three epoxy formulations, *Journal of Applied Polymer Physic*s, 43, 4022.

Swiger, R.T., 1976, Imidoalkylation of polystyrene in melt, *J. Am. Chem. Soc.*, 17,504.

Tagieva, M.M. and Perelomova, N.V., 1983, Problems ın crystal physics english translation, *Mir Publishers*.

Thomason, J. L. and Vlug, M. A., 1997, Influence of fibre length and concentration on the properties of glass fibre-reinforced polypropylene: 4. *Impact properties, Composites: Part A: Apllied Science and Manufacturing*, 28 (3): 277-288 .

Tonimoto, S., 1968, *J. Synth. Organ. Chem. Japan*, 26, 849-861

Tuncel, S., 1987, Ultrasonik muayene transduserleri proje sonuç raporu. *Marmara Bilimsel ve Endüstriyel Araştırma Enstitüsü Malzeme Araştırma Bölümü*, Gebze.Kocaeli.

Udaya S. T. and Tejraj M. A., 2001, Ultrasonic and refractometric studies on polystyrene in 1,4 –dioxane + tetrahydrofuran mixtures at 25 ^{0}C, *European Polymer Journal* 37, 1133-1138.

Vary, A., 1980, Ultrasonic measurement of material properties, Research Techniques in Nondestructive Testing, *Academic Press*, New York.

Velasco, M.A. and Lopez, E.G.R., 1997, Quantification of polystyrene acylation by ır spectroscopy, *An Experiment on Polymer IR Analysis*, 74, 5, 551.

Velde, B., 1992, Introduction to clay minerals, chemistry, origins, uses and environmental significane, 1 th Edition, *Chapman & Hall Inc.*, London, Great Britain,10-15.

Venwo, G., Manson, J. and Sperling, L., 1977, *J. Appl. Polym. Sci.,* 21, 1531.

Verdier, C. and Piau, M., 1996, Analysis of the morphology of polymer blends using ultrasound, *J. Phys. D. Appl. Phys.,* 29:1454.

Wade, G., 2000, Human uses of ultrasound: ancient and modern, *Ultrasonics,* 38,1-5.

Waterman, H. A., 1963, Determination of the complex moduli of viscoelastic materials with the ultrasonic pulse method (part 1 & part 2), *Kolloid-Zeitschrift & Zeitschrift für Polymere*,192, 1-16.

Waterman, H. A., 1977, Relations between loss angles in ısotropic viscoelastic materials, *Rheologica Acta*, 16, 31.

Wróbel, G. and Pawlak, S., 2006, Ultrasonic evaluation of the fibre content in glass/epoxy composites, *Journal Of Achivements İn Materials And Manufacturing Engineering,* Volume 18, Issues 1-2.

Wróbel, G. and Pawlak, S., 2007, The effect of fiber content on the ultrasonic wave velocity in glass/polyester composites, *Journal of Achivements in Materials and Manufacturing Engineering*.Volume 20, Issues 1-2.

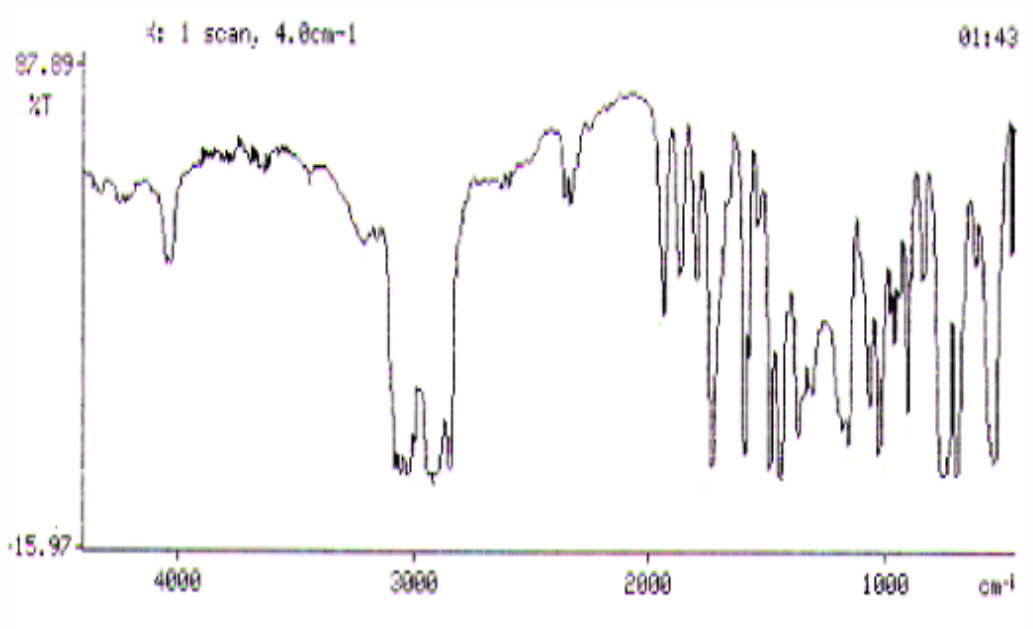
Yıldız, G., Çatalgil Giz, H. and Giz, A., 2002, The effect of ultrasound in electrochemically initiated acrylamide polymerization. *J. of Appl. Polym. Sci.* 84, 83-89.

Yükler, A.İ. ve Çatalgöl, Z., 1996, Kaynak hataları ve kaynak kalitesi, *MÜTEF Yayını*, İstanbul.

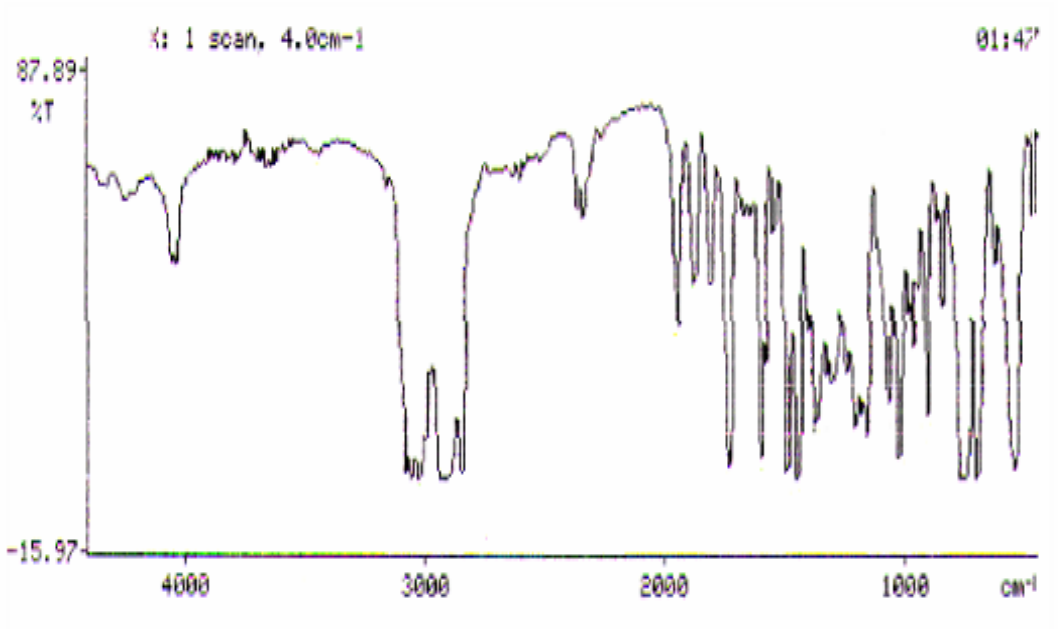
Zheng, S., Wang, H., Luo, X., Zhang, N. and Dezhu, M.A., 1995, Ultrasonic behaviour of epoxy resins / poly (ethylene oxide blends cured with phtalic anhydride, *Chinese Journal of Polymer Science*, Vol.13, No.1.

EKLER

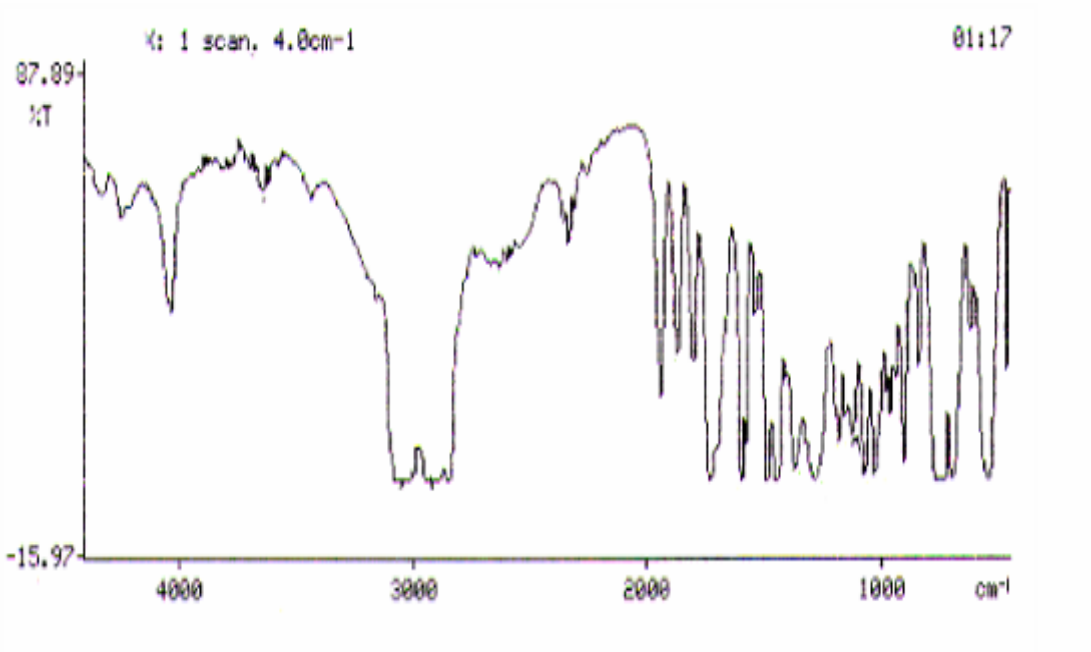
EK-1: $5{,}0.10^5$ molekül ağırlıklı MPS' lere ait FT-IR spektrumları



Şekil ek 1.1. Süksinik anhidritle modifiye edilen MPS_{500}' nin (SAI) FT-IR spektrumu



Şekil ek 1.2. Maleik anhidritle modifiye edilen MPS_{500}' nin (MAI) FT-IR spektrumu



Şekil ek 1.3. Ftalik anhidritle modifiye edilen MPS_{500}' nin (FAI) FT-IR spektrumu

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı	**:**	İmran ORAL
Uyruğu	**:**	T.C.
Doğum Yeri ve Tarihi	**:**	Suçatı – 01/01/1979
Telefon	**:**	0 332 323 82 20-5876
Faks	**:**	0 332 323 82 25
e-mail	**:**	oralimran@selcuk.edu.tr

EĞİTİM

Derece		**Adı, İlçe, İl**	**Bitirme Yılı**
Lise	**:**	Konya Lisesi (Yab. Dil. Ağ. L.), Konya	**1997**
Üniversite	**:**	Selçuk Ün., Eğitim Fak. Fizik Öğrt., Konya	**2003**
Yüksek Lisans	**:**	Selçuk Ün. Fen Bilimleri Ens., Fizik Eğitimi, Konya	**2006**
Doktora	**:**	Selçuk Ün. Fen Bilimleri Ens., Fizik, Konya	**2011**

İŞ DENEYİMLERİ

Tarih	**Kurum**	**Görev Yeri**	**Görevi**
17. 01. 2005 - 17. 01. 2011	**Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**	**Ahmet Keleşoğlu Eğitim Fak. OFMAE Bölümü Fizik ABD**	**Araştırma Görevlisi**
17. 01. 2011 …	**Selçuk Üniversitesi Ahmet Keleşoğlu Eğitim Fakültesi**	**OFMAE Bölümü Fizik ABD**	**Araştırma Görevlisi**

UZMANLIK ALANI: Fizik Eğitimi, Polimer Fiziği, Ultrases ve Uygulamaları

YABANCI DİLLER: İngilizce, Fransızca.

BELİRTMEK İSTEĞİNİZ DİĞER ÖZELLİKLER: Konya da değişik spor klüplerinde, amatör liglerde ve Türkiye Profesyonel 3. Voleybol Liginde profesyonel olarak voleybol oynamıştır. Bunun dışında futbol, basketbol ve yüzme spor dallarıyla ilgilenmektedir. Araştırmacı evli olup bir erkek ve iki kız çocuğu babasıdır.

YAYINLAR

1- Oral, I., Guzel, H., Ahmetli, G. and Gur, C.H., 2011, Determining the elastic properties of modified polystyrenes by sound velocity measurements, *Journal of Applied Polymer Science (In Press).[Doktora tezinden türetilmiştir]*

2- Oral, I., Guzel, H. and Ahmetli, G., 2011, Measuring the Young's modulus of polystyrene based composites by tensile test and pulse-echo method, *Polymer Bulletin (Under review). [Doktora tezinden türetilmiştir]*