

T. C.
NECMETTİN ERBAKAN ÜNİVERSİTESİ
EĞİTİM BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ORTAÖĞRETİM FEN VE MATEMATİK ALANLARI EĞİTİMİ
ANABİLİM DALI
FİZİK EĞİTİMİ BİLİM DALI

ELYAF TAKVİYELİ KOMPOZİT MALZEMELERİN
ESNEKLİK KATSAYILARININ ULTRASONİK
ÖLÇÜMÜ

Hüseyin İŞLER
YÜKSEK LİSANS TEZİ

Danışman
Doç. Dr. Hatice GÜZEL

Konya - 2015

T. C.
NECMETTİN ERBAKAN ÜNİVERSİTESİ
EĞİTİM BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ORTAÖĞRETİM FEN VE MATEMATİK ALANLARI EĞİTİMİ
ANABİLİM DALI
FİZİK EĞİTİMİ BİLİM DALI

ELYAF TAKVİYELİ KOMPOZİT MALZEMELERİN
ESNEKLİK KATSAYILARININ ULTRASONİK
ÖLÇÜMÜ

Hüseyin İŞLER
YÜKSEK LİSANS TEZİ

Danışman
Doç. Dr. Hatice GÜZEL

Konya – 2015



T.C.

NECMETTİN ERBAKAN ÜNİVERSİTESİ

Eğitim Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü

BİLİMSEL ETİK SAYFASI

| | | | |
|------------|---|---|----------------------------------|
| Adı Soyadı | Hüseyin İŞLER | | |
| Numarası | 088307051002 | | |
| Öğrencinin | Anabilim/ Bilim Dalı | Ortaöğretim Fen ve Matematik Alanları Eğitimi / Fizik Eğitimi | |
| | Programı | Tezli Yüksek Lisans <input checked="" type="checkbox"/> | Doktora <input type="checkbox"/> |
| Tezin Adı | Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemelerin Esneklik Katsayılarının Ultrasonik Ölçümü | | |

Bu tezin proje safhasından sonuçlanmasına kadarki bütün süreçlerde bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle riayet edildiğini, tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel kurallara uygun olarak atıf yapıldığını bildiririm.

Hüseyin İŞLER



T.C.
NECMETTİN ERBAKAN ÜNİVERSİTESİ
Eğitim Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü
YÜKSEK LİSANS TEZİ KABUL FORMU

| | | |
|------------|----------------------|--|
| Öğrencinin | Adı Soyadı | Hüseyin İŞLER |
| | Numarası | 088307051002 |
| | Anabilim/ Bilim Dalı | Ortaöğretim Fen ve Matematik Alanları Eğitimi / Fizik Eğitimi |
| | Programı | Tezli Yüksek Lisans |
| | Tez Danışmanı | Doç. Dr. Hatice GÜZEL |
| | Tezin Adı | Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemelerin Esneklik Katsayılarının Ultrasonik Ölçümü |

Yukarıda adı geçen öğrenci tarafından hazırlanan ‘Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemelerin Esneklik Katsayılarının Ultrasonik Ölçümü’ başlıklı bu çalışma 03/07/2015 tarihinde yapılan savunma sınavı sonucunda oybirliği/oyçokluğu ile başarılı bulunarak, jürimiz tarafından yüksek lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

| Ünvanı, Adı Soyadı | Danışman ve Üyeler | İmza |
|------------------------------|--------------------|------|
| Doç. Dr. Hatice GÜZEL | Danışman | |
| Doç. Dr. Ömer DERELİ | Üye | |
| Yrd. Doç. Dr. Mücahit YILMAZ | Üye | |

ÖN SÖZ

Tez çalışmamın konu tespitinden son aşamasına kadar her konuda yardım ve desteklerini esirgemeyen saygıdeğer tez danışmanım ve hocam sayın Doç. Dr. Hatice GÜZEL' e en derin minnet ve şükranlarımı sunarım.

Üzerinde deney yaptığımız ortotropik kompozit malzemelerin teminini sağlayan Prof. Dr. Mesut UYANER' e, ultrasonik hız ölçümlerinin yapılmasında bana yol gösteren ve yardımcı olan Yrd. Doç. Dr. İmran ORAL' a, bana yardımcı olan diğer hocalarıma ve çalışma arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Ayrıca, çalışmamın her aşamasında sonsuz sabırları ve hoşgörülerıyla bana destek olan anneme, eşim Esmâ ve kızım Şerife' ye sonsuz teşekkür ederim.

Bu tezi yazma sabrını ve gücünü lütfetmiş olan CENÂB-I HAKK' a, diğer bütün nimetleri için de olduğu gibi, lâıykıyla hamd ve şükürden âcizim.

Hüseyin İŞLER

Konya – 2015



T.C.
NECMETTİN ERBAKAN ÜNİVERSİTESİ

Eğitim Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü

| | | | |
|----------------------|---|---|----------------------------------|
| Adı Soyadı | Hüseyin İŞLER | | |
| Numarası | 088307051002 | | |
| Öğrencinin | Anabilim/ Bilim Dalı | Ortaöğretim Fen ve Matematik Alanları Eğitimi / Fizik Eğitimi | |
| | Programı | Tezli Yüksek Lisans <input checked="" type="checkbox"/> | Doktora <input type="checkbox"/> |
| Tez Danışmanı | Doç. Dr. Hatice GÜZEL | | |
| Tezin Adı | Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemelerin Esneklik Katsayılarının Ultrasonik Ölçümü | | |

ÖZET

Bu çalışmada, E-cam/epoksi ve karbon/epoksiden oluşan ortotropik kompozit malzemelerde, ultrasonik darbe-yankı yöntemiyle ölçülen ultrases hızlarından yararlanarak Young modülleri, Poisson oranları ve kayma modülleri hesaplanmıştır. Ultrases hızlarının ölçülmesinde 35 MHz' lik bilgisayar kontrollü çözümleyici, 60 MHz' lik dijital osiloskop, 5 MHz' lik boyuna prob ve 2,25 MHz' lik enine prob kullanılmış, ölçümler oda sıcaklığında yapılmıştır. Christoffel denklemleri aracılığıyla yüksek simetri doğrultularında ultrases hızları ile esneklik sabitleri (C_{ij}) arasında bağıntılar çıkarılmıştır. Bu bağıntılardan yararlanarak esneklik katsayılarının (mühendislik sabitlerinin) malzeme doğrultularına bağlı olarak nasıl değiştiği bulunmuştur.

Çalışmada elde edilen verilerden ölçülen ultrases hızlarının ve hesaplanan esneklik katsayılarının elyaf yönelimine bağlı olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Christoffel denklemleri, elastik sabitler, kayma modülü, kompozit, ortotropik malzeme, Poisson oranı, ultrases, Young modülü



T.C.
NECMETTİN ERBAKAN ÜNİVERSİTESİ

Eğitim Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü

| | | | |
|------------|----------------------|--|----------------------------------|
| | Adı Soyadı | Hüseyin İŞLER | |
| | Numarası | 088307051002 | |
| Öğrencinin | Anabilim/ Bilim Dalı | Ortaöğretim Fen ve Matematik Alanları Eğitimi / Fizik Eğitimi | |
| | Programı | Tezli Yüksek Lisans <input checked="" type="checkbox"/> | Doktora <input type="checkbox"/> |
| | Tez Danışmanı | Doç. Dr. Hatice GÜZEL | |
| | Tezin İngilizce Adı | The Ultrasonic Measurement of Elasticity Coefficient of Fiber Reinforced Composite Materials | |

SUMMARY

In this study, Young moduli, Poisson's ratios, and shear moduli of orthotropic composite materials, consisting of E-glass/epoxy and carbon/epoxy, were calculated by ultrasonic velocities which were measured using ultrasonic pulse-echo method. 35 MHz computer controlled analyzer, 60 MHz digital oscilloscope, 5 MHz longitudinal probe, and 2,25 MHz transverse probe were used for the measurements of ultrasound velocities, the measurements were performed at ambient temperature. In high symmetry directions, the relations between ultrasound velocities and elasticity constants (C_{ij}) were derived by means of Christoffel's equations. Using these relations, the changes in elasticity coefficients (engineering constants) commitment to material direction were determined.

It was understood from the data obtained in this study that, measured ultrasound velocities and the calculated elasticity coefficients were depending on the fiber orientations.

Key Words: Christoffel's equations, elastic constants, shear modulus, composite, orthotropic material, Poisson's ratio, ultrasound, Young's modulus

İÇİNDEKİLER

| | <u>Sayfa No</u> |
|--|-----------------|
| BİLİMSEL ETİK SAYFASI..... | ii |
| YÜKSEK LİSANS TEZİ KABUL FORMU..... | iii |
| ÖN SÖZ..... | iv |
| ÖZET | v |
| SUMMARY | vi |
| İÇİNDEKİLER | vii |
| SİMGELER VE KISALTMALAR | x |
| TABLOLAR LİSTESİ | xiii |
| ŞEKİLLER LİSTESİ | xiv |
| 1. GİRİŞ | 1 |
| 2. KURAMSAL BİLGİLER | 3 |
| 2.1. ULTRASES | 3 |
| 2.1.1. Ultrases Tarihi | 3 |
| 2.1.2. Sesin Temel Özellikleri | 5 |
| 2.1.2.1. Frekans ve Periyot | 5 |
| 2.1.2.2. Dalga Boyu ve Hız | 5 |
| 2.1.2.3. Temel Dalga Denklemi | 6 |
| 2.1.2.4. Akustik Empedans, Yansıma ve Zayıflama | 7 |
| 2.1.2.5. Akustik Basınç ve Şiddet | 7 |
| 2.1.3. Ultrasonik Dalga Türleri | 8 |
| 2.1.3.1. Boyuna Dalgalar | 8 |
| 2.1.3.2. Enine Dalgalar | 9 |
| 2.1.3.3. Yüzey Dalgaları | 9 |
| 2.1.3.4. Plaka (Lamb) Dalgaları | 10 |
| 2.1.4. Ultrases Dalgalarının Üretilmesi | 11 |
| 2.1.4.1. Piezoelektrik Transduserler (Piezoelektrik Olay) | 12 |
| 2.1.4.2. Manyetostriksiyon Transduserler (Manyetostriksiyon Olayı) | 12 |
| 2.1.4.3. Elektriksiyon Transduserler (Elektriksiyon Olayı) | 13 |
| 2.1.5. Ultrasonik Demet ve Özellikleri | 14 |
| 2.1.5.1. Yakın Alan | 15 |

| | |
|--|----|
| 2.1.5.2. Uzak Alan | 17 |
| 2.1.5.3. Demet Genişlemesi | 17 |
| 2.1.6. Ultrasonik Testte Kullanılan Prob Tipleri | 18 |
| 2.1.6.1. Tek Kristalli Normal Problar | 19 |
| 2.1.6.2. Çift Kristalli Normal Problar | 19 |
| 2.1.6.3. Açılı Problar | 20 |
| 2.1.7. Ultrasonik Test Yöntemleri | 21 |
| 2.1.7.1. Darbe-Yankı (Puls-Eko) Yöntemi | 21 |
| 2.1.7.2. Doğrudan İletim (Transmisyon) Yöntemi | 22 |
| 2.1.7.3. Rezonans Yöntemi | 23 |
| 2.1.8. Ultrasesin Kullanıldığı Yerler | 24 |
| 2.2. KOMPOZİT MALZEMELER | 27 |
| 2.2.1. Kompozit Malzemelerin Tanıtımı | 27 |
| 2.2.2. Kompozit Üretiminde Kullanılan Malzemeler | 28 |
| 2.2.2.1. Matris Malzemeleri | 28 |
| 2.2.2.1.1. Plastik Matrisler | 29 |
| 2.2.2.1.1.1. Termoset Matrisler | 29 |
| 2.2.2.1.1.2. Termoplastik Matrisler | 31 |
| 2.2.2.1.2. Metal Matrisler | 32 |
| 2.2.2.1.3. Seramik Matrisler | 32 |
| 2.2.2.2. Takviye Malzemeleri | 32 |
| 2.2.2.2.1. Cam Elyafı | 34 |
| 2.2.2.2.2. Karbon Elyafı | 36 |
| 2.2.2.2.3. Bor Elyafı | 37 |
| 2.2.3. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması | 38 |
| 2.2.3.1. Elyaflı Kompozitler | 38 |
| 2.2.3.2. Parçacıklı Kompozitler | 40 |
| 2.2.3.3. Tabakalı Kompozitler | 41 |
| 2.2.3.3.1. Metal Tabakalı Kompozit Malzemeler | 42 |
| 2.2.3.3.2. Cam Tabakalı Kompozit Malzemeler | 42 |
| 2.2.3.3.3. Polimer Esaslı Tabakalı Kompozit Malzemeler | 43 |
| 2.2.3.3.4. Ahşap Tabakalı Kompozit Malzemeler | 43 |

| | |
|--|------------|
| 2.2.3.3.5. Tabakalı Lifli Kompozit Malzemeler | 43 |
| 2.2.3.4. Karma (Hibrid) Kompozitler | 43 |
| 3. KATILARIN ESNEKLİK ÖZELLİKLERİ | 44 |
| 3.1. Esneklik Katsayıları | 46 |
| 3.1.1. Esneklik (Young) Modülü | 46 |
| 3.1.2. Poisson Oranı | 46 |
| 3.1.3. Kayma (Kesme) Modülü | 47 |
| 3.2. Hooke Kanunu ve Esneklik (Elastik) Sabitleri | 47 |
| 3.3. Elastik Simetrisinin Temel Halleri | 50 |
| 3.3.1. Monoklinik Malzeme | 50 |
| 3.3.2. Ortotropik Malzeme | 50 |
| 3.3.3. Enine İzotropik Malzeme | 51 |
| 3.3.4. İzotropik Malzeme | 52 |
| 3.4. Hareket Denklemi ve Çözümleri | 53 |
| 3.5. Christoffel Denklemleri | 53 |
| 3.5.1. Ortotropik Malzemelerde Christoffel Sabitleri ve Hız İfadeleri | 54 |
| 3.5.2. Ortotropik Malzemelerde Esneklik (Young) Modülleri (E), Poisson Oranları (v) ve Kayma Modülleri (G) | 65 |
| 4. LİTERATÜR İNCELEMESİ | 71 |
| 5. MATERYAL VE METOT | 78 |
| 5.1. Kullanılan Malzemeler | 78 |
| 5.2. Kullanılan Alet ve Cihazlar | 78 |
| 5.3. Malzemelerin Analizi | 79 |
| 5.3.1. Yoğunluk Tayini | 79 |
| 5.3.2. Ultrasonik Hız Ölçümü | 80 |
| 6. DENEYSEL BULGULAR | 85 |
| 6.1. Ultrases Hız Deney Sonuçları | 85 |
| 6.2. Esneklik Katsayılarının Hesaplanması | 88 |
| 6.3. Yakma Deneyi | 92 |
| 7. SONUÇLAR VE TARTIŞMA | 94 |
| KAYNAKÇA | 101 |
| ÖZGEÇMİŞ | 109 |

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

| | |
|--------------------|--|
| A | : Ultrases dalga genliği |
| a | : Parçacık titreşimi |
| a_0 | : Parçacık titreşimi genliği |
| C | : Esneklik (elastik) sabiti |
| C_{ij} | : Rijitlik matrisi |
| C_{ijkl} | : Rijitlik tensörü |
| $^{\circ}C$ | : Santigrat derece |
| D | : Kristal çapı, bir parametre |
| d | : Malzeme kalınlığı |
| E | : Esneklik (Young) modülü |
| E_1, E_2, E_3 | : x, y, z doğrultularındaki Young modülleri |
| f | : Frekans |
| f_0 | : İlk rezonansı sağlayan temel frekans |
| G | : Kayma (Kesme) modülü |
| G_{ij} | : ij düzlemindeki kayma modülü |
| I | : Ses dalgası şiddeti |
| k | : Transduser tipine ve genişleme açısına bağlı katsayı |
| k | : Yayılma veya dalga vektörü |
| L_{ik} | : Christoffel sabitleri |
| N | : Yakın alan uzunluğu |
| n | : İlgili sınır demetini belirleyen alt indis |
| Ni | : Nikel |
| n_1, n_2, n_3 | : Doğrultu kosinüsleri |
| P | : Akustik basınç |
| r | : Yer vektörü |
| S_{ij} | : Uyum matrisi |
| T | : Periyot |
| t | : Zaman |
| $u(u_1, u_2, u_3)$ | : Yerdeğiştirme vektörü |

| | |
|--------------------------|--|
| u_i | : Yerdeğiştirme vektörü bileşenleri |
| u_{0i} | : Yerdeğiştirme vektörü bileşenlerinin maksimum değeri |
| u, v, w | : x, y, z doğrultularındaki yer değişimi |
| V | : Ultrases dalga hızı, sürat |
| V_b | : Boyuna dalga hızı |
| V_e | : Enine dalga hızı |
| V_p | : Plaka dalga hızı |
| V_y | : Yüzey dalga hızı |
| V_{11}, V_{22}, V_{33} | : x, y, z doğrultularındaki boyuna ses dalga hızları |
| V_{12}, V_{13}, V_{23} | : x, y, z doğrultularındaki enine ses dalga hızları |
| V_{s1}, V_{s2}, V_{s3} | : Numunenin y-z, x-z, x-y eksenleri ile 45^0 açıyla kesilmesiyle elde edilen düzlemlerindeki enine ses dalga hızları |
| $x (x_1, x_2, x_3)$ | : Konum vektörü |
| Z | : Akustik empedans |
| Z_1 | : Birinci ortamın akustik empedansı |
| Z_2 | : İkinci ortamın akustik empedansı |
| α_i | : Kritik açı |
| γ | : Demet genişleme açısı |
| δ_{ik} | : Kronecker deltası |
| ε | : Gerilme (strain), deformasyon, zorlanma |
| ε_{ii} | : Normal zorlanmalar ($i= 1, 2, 3$) |
| ε_{ij} | : Kayma zorlanmaları ($i \neq j, i, j= 1, 2, 3$) |
| λ | : Dalga boyu, Lamè sabiti |
| μ | : Lamè sabiti |
| ν | : Poisson oranı |
| ρ | : Yoğunluk |
| σ | : Gerilme (Stress) |
| σ_{ii} | : Normal gerilmeler ($i= 1, 2, 3$) |
| σ_{ij} | : Kayma gerilmeleri ($i \neq j, i, j= 1, 2, 3$) |
| w | : Açısal frekans |

Kısaltmalar

| | |
|---------|---|
| cm | : Santimetre |
| DMA | : Dinamik Mekanik Analiz |
| dB | : Desibel |
| GHz | : Gigahertz |
| GPa | : Gigapascal |
| gr | : Gram |
| Hz | : Hertz |
| kHz | : Kilohertz |
| MHz | : Megahertz |
| MPa | : Megapascal |
| mm | : Milimetre |
| Pa | : Pascal |
| PVDF | : Poliviniliden Flöörür |
| SI | : Uluslararası Sistem |
| s | : Saniye |
| TÜBİTAK | : Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu |
| UV | : Ultraviyole ışınları |
| vd. | : Ve diğçerleri |
| µs | : Mikrosaniye |

TABLOLAR LİSTESİ

| | <u>Sayfa No</u> |
|---|-----------------|
| Tablo-1: Bazı Termosetlerin Mekanik Özellikleri..... | 31 |
| Tablo-2: Ortotropik Malzemelerde Ultrases Hızı ile Esneklik Sabitleri Arasındaki Bağıntılar..... | 64 |
| Tablo-3: Ortotropik Malzemelerde Esneklik Katsayıları (Mühendislik Sabitleri) ile Esneklik Sabitleri Arasındaki Bağıntılar..... | 69 |
| Tablo-4: Epoksi Reçine ve Elyafıara Ait Özellikler..... | 78 |
| Tablo-5: Kompozit Malzemelerin Yoğunluk (ρ) Değerleri..... | 85 |
| Tablo-6: E-cam/Epoksi Kompozit ve Karbon/Epoksi Kompozit Malzemelerin Farklı Yüzeylerinden Ölçülen Ultrases Dalgası Hız Değerleri..... | 86 |
| Tablo-7: E-cam/Epoksi Kompozit ve Karbon/Epoksi Kompozit için Hesaplanan Esneklik Sabiti (C_{ij}) Değerleri (GPa)..... | 89 |
| Tablo-8: E-cam/Epoksi Kompozit ve Karbon/Epoksi Kompozit için Hesaplanan D Parametresi Değerleri..... | 89 |
| Tablo-9: E-cam/Epoksi Kompozit ve Karbon/Epoksi Kompozit için x (1), y (2) ve z (3) Eksenlerinde Young Modülü (E_1, E_2, E_3) Değerleri..... | 90 |
| Tablo-10: E-cam/Epoksi Kompozit ve Karbon/Epoksi Kompozitin Poisson Oranları ($\nu_{12}, \nu_{13}, \nu_{21}, \nu_{23}, \nu_{31}, \nu_{32}$) Değerleri..... | 91 |
| Tablo-11: E-cam/Epoksi Kompozit ve Karbon/Epoksi Kompozit için xy, xz ve yz Düzlemlerinde Kayma Modülü (G_{12}, G_{13}, G_{23}) Değerleri..... | 91 |
| Tablo-12: Bazı Metallerin ve Alaşımların Young Modülü Değerleri..... | 97 |

ŞEKİLLER LİSTESİ

| | <u>Sayfa No</u> |
|--|-----------------|
| Şekil-1: Mekanik Dalganın Fiziksel Bileşenleri..... | 6 |
| Şekil-2: Boyuna Dalga..... | 8 |
| Şekil-3: Enine Dalga..... | 9 |
| Şekil-4: Yüzey Dalgaları..... | 10 |
| Şekil-5: Plaka Dalgaları..... | 11 |
| Şekil-6: Manyetostriksiyon Prensibine Göre Çalışan Bir Ultrases Vericisi..... | 13 |
| Şekil-7: Ultrasonik Demet..... | 15 |
| Şekil-8: Yakın Alanda Dalga Önü Düzlemi..... | 15 |
| Şekil-9: Dairesel Kesitli Bir Transduserin Akustik Eksen Üzerinde Basınç Değişimi | 16 |
| Şekil-10: Demet Genişlemesi..... | 17 |
| Şekil-11: Tek Kristalli Normal Prob..... | 19 |
| Şekil-12: Çift Kristalli Normal Prob..... | 20 |
| Şekil-13: Açılı Prob..... | 20 |
| Şekil-14: Darbe-Yankı Yönteminin Prensibi..... | 22 |
| Şekil-15: Transmisyon Yönteminin Prensibi..... | 23 |
| Şekil-16: Akustik Yağlama Adaptörü..... | 26 |
| Şekil-17: Elyaf Dokuma Türleri..... | 34 |
| Şekil-18: Cam Elyaf Üretimi..... | 35 |
| Şekil-19: Karbon Elyaf Örnekleri..... | 37 |
| Şekil-20: a) Tek Yönlü Sürekli Elyaf b) Kırpılmış (Kısa) Elyaf c) Ortogonal Elyaf d) Çapraz Dizilmiş Sürekli Elyaf e) Rastgele Dizilmiş Sürekli Elyaf.. | 39 |
| Şekil-21: Cam Elyaf Dokuma ve Cam Elyaf Kırpılmış Demetler..... | 40 |
| Şekil-22: Bir Eleman Üzerinde Gerilmeler..... | 44 |
| Şekil-23: y ve z Eksenleri ile 45^0 Açıyla Kesilen Düzlem..... | 59 |
| Şekil-24: x ve z Eksenleri ile 45^0 Açıyla Kesilen Düzlem..... | 61 |
| Şekil-25: x ve y Eksenleri ile 45^0 Açıyla Kesilen Düzlem..... | 63 |
| Şekil-26: Radwag Analitik Terazisi ve Yoğunluk Kiti..... | 80 |
| Şekil-27: Hız Ölçümlerinde Kullanılan Proplar..... | 81 |
| Şekil-28: Ultrases Dalgalarının Hız Ölçümlerinde Kullanılan Düzenek..... | 82 |

| | |
|--|----|
| Şekil-29: Hız Ölçümlerinde Kullanılan Kuplaj Sıvıları a) Boyuna Ultrases Dalga Hızlarının Ölçülmesinde Kullanılan Kuplaj Sıvısı, b) Enine Ultrases Dalga Hızlarının Ölçülmesinde Kullanılan Kuplaj Sıvısı ve Sürme Aparatı..... | 83 |
| Şekil-30: Numunelerin Kalınlık Ölçümlerinde Kullanılan Mikrometre..... | 83 |
| Şekil-31: E-cam/Epoksi Kompozit ve Karbon/Epoksi Kompozit Malzemelerin x, y, z Doğrultularında Boyuna Ultrases Dalga Hızları Grafiği..... | 86 |
| Şekil-32: E-cam/Epoksi Kompozit ve Karbon/Epoksi Kompozit Malzemelerin x, y, z Doğrultularında Enine Ultrases Dalga Hızları Grafiği..... | 87 |
| Şekil-33: E-cam/Epoksi Kompozit ve Karbon/Epoksi Kompozit Malzemelerin 45 ⁰ Açıyla Kesilen Düzlemlerinde Yayılan Enine Ultrases Dalga Hızları Grafiği..... | 88 |
| Şekil-34: E-cam/Epoksi Kompozit ve Karbon/Epoksi Kompozit Malzemelerin x, y, z Doğrultularındaki Young Modülleri Grafiği..... | 90 |
| Şekil-35: E-cam/Epoksi Kompozit ve Karbon/Epoksi Kompozit Malzemelerin xy, xz, yz Düzlemlerindeki Kayma Modülleri Grafiği..... | 92 |

1. GİRİŞ

“20. yüzyılın ikinci yarısında bilim ve teknolojinin ilerlemesine paralel olarak, malzeme biliminin gelişmesine duyulan ihtiyaç had safhaya ulaşmıştır. Yeryüzündeki elementlerin sınırlı olması, malzeme bilimini, talep edilen ihtiyacı karşılamakta yetersiz kılmıştır. Malzeme biliminin, gelişen teknolojiye ayak uydurabilmesinin bir sonucu olarak ortaya çıkan kompozit malzemelerle birlikte hafiflik, dayanım gibi özellikler geliştirilmiş, maliyet azaltılmıştır” (Erkan, 2009). Kompozit malzemeler; bugün yaygın olarak uçak, roket, füze gövdesi, yüksek kalitede spor malzemeleri, otomotiv, yapay kemik, helikopter motorları gibi maliyet yüksekliğinin pek önemli olmadığı alanlarda kullanıldığı gibi lastik, otomotiv sanayi, beyaz eşya, basınç dayanımlı boru ve deniz araç gövdeleri gibi geniş bir spektrumda işlev görmektedirler (Demircioğlu, 2006). Gelişen endüstrinin dinamik yapısı içinde kullanım alanı hızla artan kompozit malzemeleri daha yakından tanımak bir ihtiyaç haline almıştır. Kompozit malzemelerin, yapı olarak klasik malzemelerden farklı olması bizleri mekanik özelliklerini incelemeye yöneltmiştir çünkü malzemelerin sağlıklı bir şekilde kullanılması için onların tüm karakteristik ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi gerekmektedir (Sakin, 1994). “Malzemenin özelliklerini incelemenin tahribatlı ve tahribatsız birçok yolu mevcuttur. Tahribatlı malzeme analizleri, malzemeye zarar vermesi, uzun zaman alması, her malzemede kullanılamaması ve ekonomik olmamasından kaynaklı 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” (Oral, 2011).

Geçmişinin fazla uzun olmamasına rağmen ultrasonik muayene metodunun gelişimi hızlı olmuş ve günümüzde kullanılan en önemli tahribatsız muayene metodu haline gelmiştir. “Ultrasonik metot, yüksek frekanslardaki ses dalgalarının malzemenin içinden geçerken parçacıklar ile etkileşerek sönümlenmesi, saçılması ve yansımaları olaylarına dayanmaktadır” (Abi, 2007).

Yapılan bu tez çalışmasında, özel bir firmaya yaptırılan E-cam/epoksi ve karbon/epoksiden oluşan ortotropik kompozit malzemelerin Young modülleri,

Poisson oranları ve kayma modülleri ultrasonik muayene metoduyla incelenmiştir. Bu amaçla, üzerine kuvvet etki eden ρ yoğunluğuna sahip esnek bir ortama uygulanan Newton' un ikinci kanununda, Hooke kanunundaki gerilme ifadesi kullanılarak Christoffel denklemleri elde edilmiştir. Bu denklemler aracılığıyla malzemenin yüksek simetri doğrultularında ultrasonik hızlarla esneklik sabitleri arasında bağıntılar çıkarılmıştır. Daha sonra ortotropik malzemelerin gerilme – gerinme denklemlerinde esneklik katsayılarının tanımları kullanılarak Young modülleri, Poisson oranları ve kayma modülleri esneklik sabitlerine (C_{ij}) bağlanmıştır. Ultrasonik darbe–yankı yöntemiyle yapılan hız ölçümleri ve Archimedes prensibinden yararlanılarak ölçülen yoğunluk değerleri kullanılarak esneklik katsayıları hesaplanmıştır. Yapılan çalışma sonunda, elyaf yönlenmelerinin kompozitin mekanik dayanımında oldukça etkili olduğu görülmüştür.

Bu çalışma yedi bölümden oluşmaktadır. 1. bölüm giriş kısmıdır. 2. bölümde ultrasesin tanımı ve tarihi gelişimi, ultrases dalgalarının özellikleri, üretilmesi ve ultrases test yöntemleriyle ilgili teorik bilgiler ile kompozit malzemelerle ilgili teorik bilgiler verilmiştir. 3. bölümde ise gerilim, deformasyon, Hooke kanunu, esneklik sabitleri ve Christoffel denklemleri gibi önemli tanımlar kullanılarak esneklik teorisi açıklanmış ve farklı doğrultulardaki hızlarla esneklik sabitleri arasındaki bağıntılar çıkarılmıştır. 4. bölümde konuyla ilgili literatürde yapılan çalışmalar hakkında bilgiler verilmiştir. 5. ve 6. bölümlerde ise çalışmada yapılan ultrasonik hız deneyleri ve yakma deneyi ile ilgili bilgiler, elde edilen bulgular; tablolar ve şekillerle verilmiştir. 7. bölümde ise bulgulardan elde edilen araştırma sonuçları tartışılmış ve çeşitli önerilerde bulunulmuştur.

2. KURAMSAL BİLGİLER

2.1. ULTRASES

Ses bir titreşim hareketinden meydana gelir. Bunun tersi her zaman doğru değildir. Her titreşim hareketi muhakkak duyulabilir bir ses meydana getirmez. Deneyler, işitilebilecek bir ses verebilmesi için bir titreşim hareketi frekansının saniyede 20 ile 20.000 arasında bulunması gerektiğini göstermektedir. Bir ses titreşiminin işitilebilir olması için genlik bakımından da sınırlanmış olması gerekir. Genliği yeterli derecede büyük olmayan ses titreşimleri duyulamadığı gibi genliği yeterli derecede büyük olanları da kulağı rahatsız hatta sağır edebilir.

“Ses dört kategoride sınıflandırılabilir” (Güzel, 2005);

1. İnfrases (infrasound): Frekansı 0 ile 20 Hz arasındadır.
2. Duyulabilir ses (audible sound): Frekansı 20 Hz ile 20 kHz arasındadır.
3. Ultrases (ultrasound): Frekansı 20 kHz ile 1 GHz arasındadır.
4. Hiperses: 1 GHz den yukarı olan sestir.

Köpekler ile farelerin 50.000 Hz, yarasaların ise 200.000 Hz frekansa kadar sesleri duyabildikleri deneylerle ortaya konmuştur. Ultrases meydana getiren canlılar da vardır. Örneğin cırcır böceği (17.000-28.000) Hz aralığında, çekirgeler 40.000 Hz, yarasalar ise 70.000 Hz civarında ultrases meydana getirebilmektedir.

“Ultrasonik sesler çıkararak ve bu seslerin yankılarını algılayarak uzaklardaki cisimleri saptayabilen yunuslar, insanlar için bir esin kaynağı olmuştur. Bu ses üstü dalgaların, ‘görmek’ için kullanılabilceği fikri, sonarların geliştirilmesine yol açmıştır. İkinci Dünya Savaşı sırasında yaygın bir şekilde kullanılmaya başlanılan sonarlar, yani deniz radarları, ultrasonik dalgalar göndererek deniz altılarının yerlerini saptayabilmektedirler” (Skolnick, 1983).

2.1.1. Ultrases Tarihi

Piezoelektrik olayın 1880 yılında, Pierre ve Paul Jacques Curie kardeşler tarafından keşfedilmesi ve daha sonra G. Lipmann’ ın yapmış olduğu çalışmalarla ters piezoelektrik olayını ispatlaması birçok fizikçinin çalışmalarını bu konu üzerine yoğunlaştırmasına sebep olmuştur. Bu yapılan çalışmalar ultrases ile ilgili olan araştırmaların temelini oluşturmuştur.

“1904 yılında fizik dalında ödül kazanan Lord Rayleigh ultrases biliminin kurucusudur. 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 eserlerinden biridir” (Öktem, 2002).

“1914-1918 yılları arasında Fransız fizikçi Paul Langev ultrases dalgalarını kullanarak bir ultrases alıcı-verici sistemi geliştirmiş ve denizde yüksek frekanslı ultrases atmaları göndermiştir. Ultrases dalgalarının doğrusal olarak sapmadan ilerlediğini ve herhangi bir cisme çarptığında gönderilen yüksek frekanslı ultrases atmalarının geri döndüğünü incelemiştir” (Özkan, 2008). Başlangıçta akustik alanın yoğunluğu çok zayıftı. Üç yıl sonra ultrasonik alanı arttırmak için piezoelektrik problemlerin rezonans frekansında çalıştırılması gerektiği bulundu. 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). “Ultrasesin, materyal karakterizasyonunda ilk kullanımı 1929 ve 1935 yıllarında Rus bilim adamı Skolov tarafından gerçekleştirilmiştir” (Sevim, 2008). “Ultrasonik dalgaların problemler yardımıyla malzeme içerisinden geçirilmesi esnasında yaşanan teknik imkansızlıklar Skolov’ un yüksek frekanslarda çalışmasını engelledi; fakat onun ortaya koyduğu ilkelere göre geliştirilen cihaza daha sonra Skolov tüpü adı verilmiştir” (Abi, 2007).

“1931 yılında ise Mulhaser, iki transduser kullanarak ultrases dalgaları ile katı içindeki çatlak ve kusurları belirleyerek bu sistemin patentini almıştır. 1945 yılında Simons tek transduser ile puls-eko tekniğini geliştirmiştir” (Graff, 1977).

“Ultrases ile malzeme karakterizasyonunda dalga hızı ve azalma ölçümleri ile yapılan çalışma Mason ve McSkimmin tarafından 1947’ de başlamıştır. Roderick ve Truell ise azalma (attenuation) metoduyla 1952 yılında ultrases ile tanecik boyutunu belirlemiştir. 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 yansımaya tekniğini kullanarak tanecik boyutunun belirlenmesinin ilk deneysel çalışması Beecham (1966) tarafından yapılmıştır. Bununla ilgili teorik çalışma Fay ve arkadaşları (1976) tarafından gerçekleştirilmiş, değişik yapılara uygulanması ise Goebbels ve Höller (1976) tarafından yapılmıştır” (Sarpün, 2004).

Türkiye’ de ise tahribatsız testler 60’ lı yılların başlarında ve özellikle Türkiye’ de iş yapan yabancı kuruluşların öncülüğünde uygulanmaya başlamıştır. Türkiye’ de modern teknoloji kullanılmaya 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.

Schneider (1998), alüminyum numunelerinin elastik sabitlerini ve malzeme dayanımını ultrases ile araştırmıştır. Ultrases hız tekniğini kullanarak mermerlerdeki ortalama tanecik boyutunu Sarpün (2004), belirlemiştir. Bor karbür-alüminyum ve bor karbür-alüminyum-nikel kompozitlerinin ortalama tanecik boyutunu Özdemir (2006) ultrases hız tekniği ile incelemiştir. Cansu (2008), ultrases ile ağaçların bazı fiziksel özelliklerini belirlemiştir. Metallerin mekanik özellikleriyle doğrudan ilişkili olan tane boyutu, bazı çeliklerde ultrasonik yöntemle incelenmiştir (Deniz, 2012).

“Araştırmacılar yaptıkları çalışmalarda, katı maddelerin özellikleri (sertlik, kırılma dayanımı, çekme dayanıklılığı, mukavemeti vb.) ile yutulma (attenuation) ve dalga hızının ultrases özellikleri arasındaki ilişkileri ortaya çıkarmışlardır” (Özkan, 2008).

2.1.2. Sesin Temel Özellikleri

2.1.2.1. Frekans ve Periyot

Frekans (f): bir parçacığın saniyedeki titreşim sayısı olup birimi hertz (Hz) dir. Saniyedeki 1 titreşim = 1 Hz dir.

Periyot (T): bir titreşimin oluşması için geçen zamana dalganın periyodu denir ve birimi saniye (s) olup, frekans ile arasındaki ilişki aşağıdaki bağıntı ile ifade edilir.

$$f = 1/T \text{ (Hz =1/s)} \quad (2.1)$$

2.1.2.2. Dalga Boyu ve Hız

Titreşimin periyodu (T) süresince, ortamda yayılan dalga belli bir yol kat eder. Bu mesafe, dalganın dalga boyu olarak adlandırılır ve λ harfi ile gösterilir.

Ortamda yayılan dalgaların belli bir zaman içinde aldıkları yola dalga hızı denir ve V harfi ile gösterilir. Hız, dalga boyu ve periyot arasındaki ilişki aşağıdaki bağıntıyla ifade edilir:

$$V = \lambda / T \text{ [m/s]} \quad (2.2)$$

2.1.2.3. Temel Dalga Denklemi

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

$$a = a_0 \sin 2\pi \cdot f \cdot t \quad (2.3)$$

burada; a: t zamanında parçacık yer değişimi
 a₀: parçacık titreşiminin genliği
 f: parçacık titreşiminin frekansdır.

Mekanik dalgaların ortamda yayılırken, zaman ve mesafeye bağlı olarak hareket denklemi aşağıda verilmiştir. Bu bağıntı titreşen parçacıkların fazlarını mesafeye bağlı olarak vermektedir.

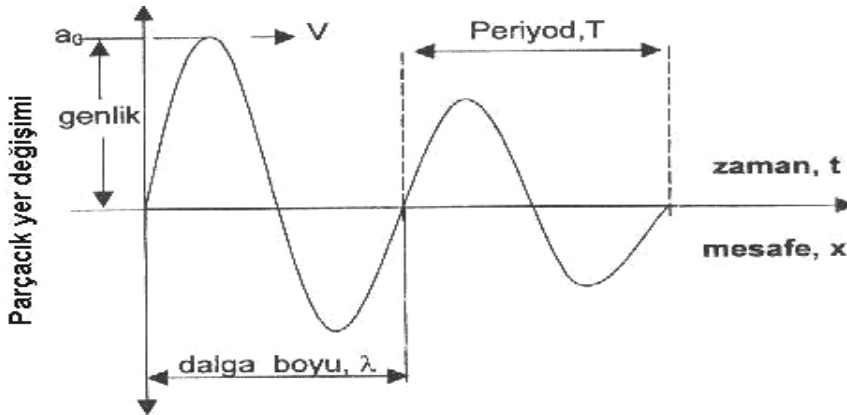
$$a = a_0 \sin 2\pi f \left(t - \frac{x}{V} \right) \quad (2.4)$$

burada;

a: mekanik dalgaların yayıldığı ortam parçacığının yer değişimi (t zamanında ve ilk uyarılan parçacıktan x mesafesinde)
 a₀: dalganın genliği (titreşen ortam parçacığının genliği ile aynıdır)
 V: dalganın yayılma hızının büyüklüğü
 f: dalganın frekansı

bir mekanik dalganın fiziksel bileşenleri Şekil-1' de gösterilmiştir.

Şekil-1: Mekanik Dalganın Fiziksel Bileşenleri



2.1.2.4. Akustik Empedans, Yansıma ve Zayıflama

Akustik empedans (Z): sesin yayıldığı ortamın ses dalgalarına karşı direnci veya sertliği olarak tanımlanır. Bir ortamın akustik empedansı, ortamın yoğunluğu ile ses hızının çarpımına eşittir (Berke ve Hoppenkamps, 1992).

$$Z = \rho \cdot V \text{ [kg / m}^2 \text{ s]} \quad (2.5)$$

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 yüzeyinden diğer ortama geçer. Bir ortamdan diğer ortama geçen sesin enerji kaybı dB olarak;

$$dB_{\text{kayıp}} = 10 \log_{10} [4Z_1 Z_2 / (Z_1 + Z_2)^2] \quad (2.6)$$

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,

$$dB_{\text{kayıp}} = 10 \log_{10} [(Z_1 - Z_2)^2 / (Z_1 + Z_2)^2] \quad (2.7)$$

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

2.1.2.5. Akustik Basınç ve Şiddet

Akustik basınç, bir ses dalgası tarafından malzemeye uygulanan değişken gerilmelerin genliğini ifade etmek için kullanılan terimdir. Akustik basınç, aşağıdaki bağıntı ile verilir:

$$P = Z \cdot a \quad (2.8)$$

Burada; P: Akustik basınç

Z: Akustik empedans

a: Parçacık titreşiminin genliğidir.

“Ses dalgaları tarafından yayılma yönüne dik doğrultudaki birim kesitten geçirilen mekanik enerji miktarına ses dalgalarının şiddeti denir. Şiddet (I); akustik basınç, akustik empedans ve parçacık titreşiminin genliği ile ilişkilidir” (Ekinci vd., 2009).

$$I = P^2 / (2 \cdot Z) \quad (2.9)$$

$$I = P \cdot a / 2 \quad (2.10)$$

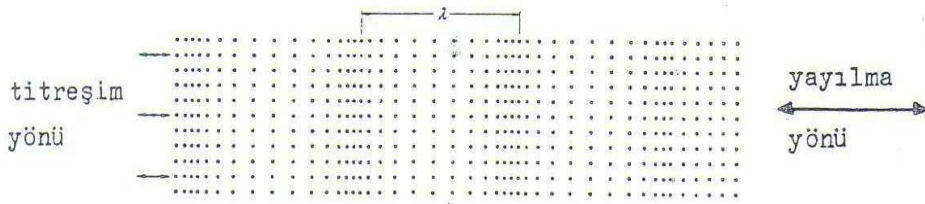
2.1.3. Ultrasonik Dalga Türleri

Ultrasonik dalgalar, ortam parçacıklarının titreşim şekline ve yayılma yönüne göre boyuna, enine, yüzey ve plaka dalgaları olmak üzere dört gruba ayrılır. Her dalga türünün üretilmesi farklı mekanizmalarla olup kullanım amaçları da farklıdır.

2.1.3.1. Boyuna Dalgalar

“Boyuna dalgalara, basınç dalgaları da denir. Yayıldığı ortamın parçacıklarını sıkıştırmaya ve gevşetmeye zorlayarak hareket eder ve yayılma yönü titreşim yönü ile aynı, yani paraleldir. Boyuna dalga, üretimlerinin ve algılanmalarının kolay olmasından dolayı ultrasonik testte en çok kullanılan dalga türüdür. Boyuna dalgalar katı, sıvı ve gaz ortamlarda yayılabilirler” (Ekinci vd., 2009). Şekil-2’ de şematik olarak boyuna dalga ve mesafeye bağlı olarak yer değişimi gösterilmiştir.

Şekil-2: Boyuna Dalga



Boyuna dalgalar sınır yüzeylerindeki empedans farklılığından daha az etkilendiklerinden, kaba taneli yapılar tarafından daha az engellenirler. Enine dalgalarla aynı frekanstaki boyuna dalgaların dalga boyu enine dalgaların dalga boyundan 1.8 kat daha uzun olduğundan, zayıflamaları daha azdır. Bu basınç dalgalarının statik hali değil de yayılma hali incelenirse sıkışma ve gevşeme noktalarının aralarındaki mesafe bozulmadan deneye tabi tutulan malzeme içinde yayıldıkları görülür. Bu, boyuna dalgalarının hızı olup, V_b ile ifade edilir. “Boyuna dalgalarının değeri her malzemeye göre ayrı ve sabittir. Böylece tamamen homojen bir bünyeye sahip olan malzemelerde sesin yayılma hızının sabit olduğu söylenebilir. Çelik, su, hava ve alüminyum için boyuna dalgaların ses hızı şöyledir” (Özdemir, 2006):

Çelik, $V_b = 5900$ m/s

Hava, $V_b = 330$ m/s

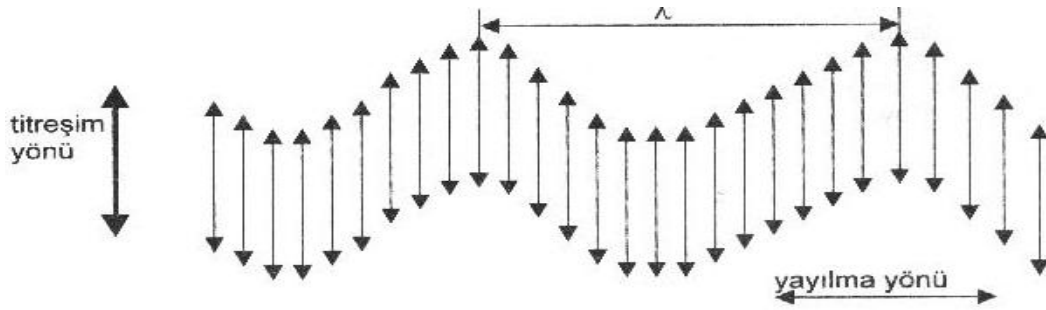
Su, $V_b = 1480$ m/s

Alüminyum, $V_b = 6300$ m/s

2.1.3.2. Enine Dalgalar

“Titreşim yönü yayılma yönüne dik veya çapraz olduğundan, enine dalgalara kesme dalgaları da denir” (Mutlu, 2006; Güzel, 1996). Şekil-3’ te bir enine dalga, titreşim yönü ve yayılma yönü ile gösterilmektedir.

Şekil-3: Enine Dalga



“Enine dalgalar yayıldıkları ortamın parçacıklarını çapraz yönde kaymaya zorlarlar ve bu yüzden sadece katı ortamlarda yayılırlar” (Ekinci vd., 2010). “Sıvı ve gazlarda atom veya moleküller arası mesafe büyük olduğundan, bunlar arasındaki çekme kuvveti, birinin diğerini hareket ettirmesi için yeterli gelmemekte ve dalga hızla zayıflamaktadır. Enine dalga hızı, boyuna dalga hızının yaklaşık yarısıdır” (Beköz, 2006). Enine dalganın bir malzeme içindeki yayılma hızı V_e ile gösterilir. Enine dalganın değeri, homojen ortamlar için malzemeye göre ayrı ayrı olup aynı zamanda sabittir. “Çelik, su, hava ve alüminyum için enine dalgaların ses hızı şöyledir” (Özdemir, 2006):

Çelik, $V_e = 3230$ m/s

Hava, $V_e = 0$ m/s

Su, $V_e = 0$ m/s

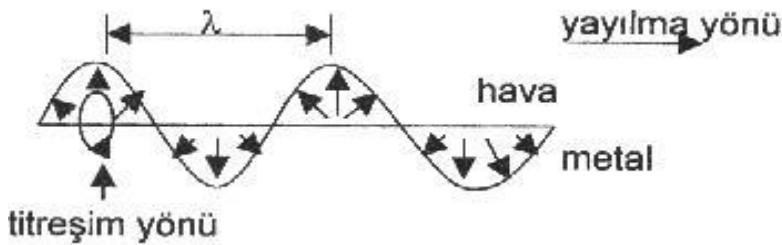
Alüminyum, $V_e = 3130$ m/s

2.1.3.3. Yüzey Dalgaları

Yüzey dalgaları ilk defa Lord Rayleigh tarafından açıklanmıştır, bu yüzden bunlara Rayleigh dalgaları da denir. Bu dalga türü, sadece malzeme yüzeyinde yayılabilmektedir. 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 dalga hızının yaklaşık %90' ıdır ve malzeme yüzeyinden en fazla 1 dalga boyu derinlikte yayılabilirler. Bu derinlikte dalganın enerjisi, yüzeydeki enerjisinin yaklaşık %4' üdür ve genlik, yüzeyden itibaren aşağıya doğru eksponansiyel olarak azalır. Yüzey dalgalarında parçacık titreşimi eliptik bir yörünge takip etmektedir. Şekil-4' teki küçük oklar, parçacık yer değişiminin yönlerini göstermektedir. Elipsin büyük eksen yayılma yönüne dik, küçük eksen ise paraleldir.

Şekil-4: Yüzey Dalgaları



“Yüzey ve 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” (Ekinci vd., 2009). Yayılma hızları (V_y) titreşim modunun elipsoide dönüşümünden dolayı enine dalgalarinkinden biraz daha azdır (Taşan ve Toprak, 2001) ve hızlar arasındaki ilişki aşağıdaki şekilde verilir.

$$V_y \cong 0.92 V_e \quad (2.11)$$

2.1.3.4. Plaka (Lamb) Dalgaları

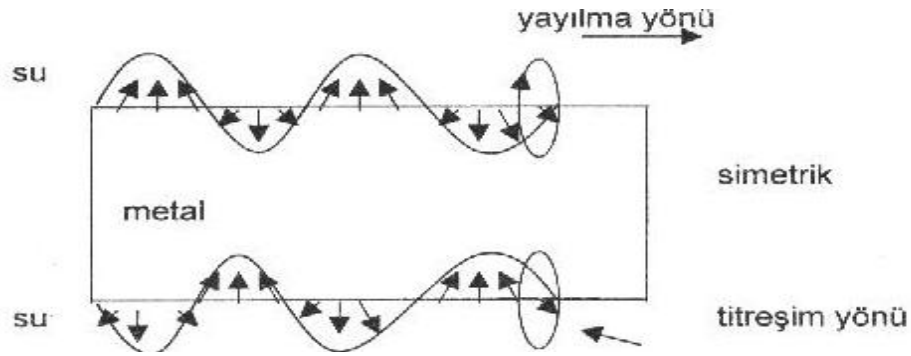
Kalınlığı dalganın üç dalga boyuna eşit veya daha ince bir plakanın içine bir yüzey dalgası gönderilirse cisimde, plaka dalgası denilen farklı bir dalga türü meydana gelir. “Plaka dalgalarının yayılma karakteristiği malzemenin yoğunluğuna, esneklik özelliğine, yapısına, kalınlığına ve nominal frekansa bağlıdır. Titreşim modları karmaşık olup yüzey dalgalarinkine benzerdir. Dalga hızı sabit olmayıp, esas olarak malzeme kalınlığı ile değişmektedir” (Ekinci vd., 2010). Boyuna dalgaları yeterince ince bir plaka içine belli bir kritik açı altında göndererek plaka dalgalarını elde etmek mümkündür. Bu kritik açı α_c aşağıdaki bağıntı ile hesaplanır.

$$\alpha_i = \arcsin V_b/V_p \quad (2.12)$$

burada; V_b : Boyuna dalga hızı
 V_p : Plaka dalga hızı

“Plaka dalgalarının parçacık titreşimi, simetrik ve asimetric 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. Asimetric plaka dalgalarında parçacık titreşimi plakanın ekseni boyunca çapraz yönde ve yüzeylerde eliptiktir. Bu dalga tipi bükülerek yayılır” (Ekinci vd., 2009). Plaka dalgaları Şekil-5’ de gösterilmiştir.

Şekil-5: Plaka Dalgaları



2.1.4. Ultrases Dalgalarının Üretilmesi

“Ultrases frekansı 20 kHz’ den 1 GHz’ e kadar olan dalgalara verilen isimdir. İnsan kulağı 20 kHz’ e kadar olan dalgaları duyabildiği için daha yüksek frekanslı seslere ultrases denir” (Okkay, 2007). “Ultrases üretmek amacıyla kullanılan araçlar, yapı bakımından oldukça farklıdır. Bu amaçla kullanılan araçlara transduser (titreştiriciler) adı verilmektedir. Bunlar, elektrik enerjisini titreşim enerjisine ve aynı zamanda da gelen titreşim enerjilerini elektrik enerjisine çevirebilmektedirler” (Gürpınar, 2007). Yani; ultrases dalga yayınlamak ve almak için kullanılan ultrasonik transduserler hem alıcı hem de gönderici olarak iki yönde de çalışabilir. Ultrases için kullanılan transduserler terslenebilir bir şekilde çalışabilmektedirler. “Hava ya da herhangi bir gaz üzerinden ultrases dalgası gönderebilmek için transduserler diyaframlarla ve onların çeperleri ile kullanılır” (Ertaş, 2007). Ultrases dalgası üretmek için birçok metot bulunmaktadır, yani transduser yapmak amacıyla

değişik yöntemler kullanılmaktadır. Aşağıda başlıca ultrasonik transduserlerden söz edilmiştir.

2.1.4.1. Piezoelektrik Transduserler (Piezoelektrik Olay)

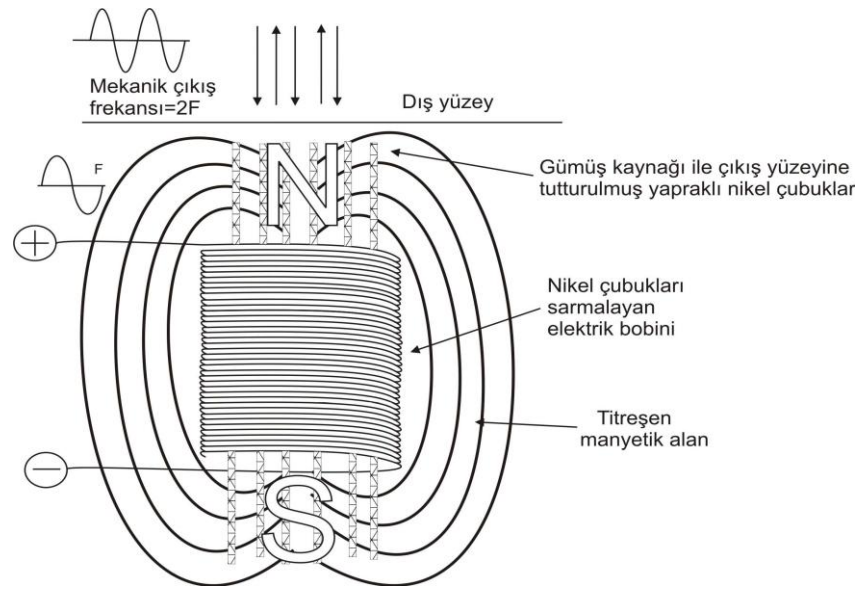
“Piezoelektrik gerçekte basınçla elektriklenme anlamına gelir” (Körpınar, 1985). Piezoelektrik olay, temel olarak kristallerin mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürmesi işlemidir. Bu tür özellikler gösteren malzemelere de piezoelektrik malzemeler denir. Bir piezoelektrik maddenin üzerine mekanik bir yük uygulandığında yüzeylerinde elektrik yükleri oluşur. Buna direkt piezoelektrik olay denir. Piezoelektrik olay 1880 yılında P. Curie ve J. Curie kardeşler tarafından keşfedilmiştir. Piezoelektrik etkiyi görmek için bu işlemin tersi yapılabilir. “Piezoelektrik maddeye bir potansiyel fark uygulandığında, madde mekaniksel şekil değişimine uğrar. Bu olaya ise ters piezoelektrik olay denir” (Onur, 2004). Kuvars, Lityum Sülfat, Baryum Titanat, Kurşun Zirkonat, Kurşun Titanat, Turmalin, Çinko Oksit gibi maddeler piezoelektrik özelliğe sahiptir (Arık, 1989). Ayrıca pek sağlam olmamaları nedeniyle tercih edilmeyen amonyum dihidrojen fosfat, Rachele tuzları gibi yapay kristallerde iyi birer piezoelektrik özellik gösteren malzemelerdir (Aral, 1989). Doğrudan (direkt) piezoelektrik olay ultrasonik dalgaları algılamada, ters piezoelektrik olay ise üretimde kullanılır. Ters piezoelektrik ile 10^9 Hz mertebesinde yüksek frekanslı ultrases dalgaları üretmek mümkündür. “Piezoelektrik maddeye alternatif akım uygulanırsa maddenin şekil değiştirmesi periyodik olacaktır. Bu uzayıp kısalma şeklindeki değişimler, uygulanan alternatif akımın frekansında olacaktır” (Onur, 2004).

2.1.4.2. Manyetostriksiyon Transduserler (Manyetostriksiyon Olayı)

Ultrases hasıl etmek için, manyetostriksiyon olayından da faydalanılır. Ferromanyetik cisimler ve ferritler bu özelliğe sahiptirler. Bu olay ilk defa 1847’ de Joule tarafından keşfedilmiş, aksi olayı 1868’ de Villari bulmuştur. “Bir manyetik alan içerisine sokulan demir, nikel ve kobalt gibi metaller ile permandur gibi bazı alaşımların boylarında değişme olur. Bu değişme yani uzama ve kısalma miktarları maddenin cinsine, manyetik alan şiddetine bağlı olmaktadır. Ferromanyetik maddelerin manyetik alana girdiklerinde boylarının değişmesi olayına

‘manyetostriksiyon olayı’ adı verilmektedir. Bu olayda da ferromanyetik maddelere sıkıştırma ve çekme kuvvetleri uygulandığında maddenin manyetik özellikleri değişmektedir” (Ilıcan, 1995).

Şekil-6: Manyetostriksiyon Prensibine Göre Çalışan Bir Ultrases Vericisi



“Manyetostriksiyon transduserler manyetostriktif çekirdek sargısı içerir. Elektriksel dalga sargıya uygulanır. Sargı indüktansı yüksek olduğu için düşük ultrasonik frekanslarında çalışabilir. Yeterince yüksek bir uyartım akımı, manyetostriktif malzemeyi vibrasyona sokacaktır. Bu vibrasyonda ortama ultrases olarak iletilir” (Sinclair, 2001). “Bu yöntemle elde edilen manyetostriksiyon transduserler ile 100 kHz e kadar frekans elde edilebilir. Bu piezoelektrik transduserlerin frekansından oldukça düşüktür; ancak gücü çok yüksektir” (Ilıcan, 1995).

2.1.4.3. Elektriksiyon Transduserler (Elektriksiyon Olayı)

Bazı malzemeler piezoelektrik malzemelere benzer özellikler gösterirler; fakat deformasyon elektrik potansiyeli ile orantılı olmayıp yaklaşık olarak elektrik alan şiddetinin karesiyle orantılıdır. Bu tür malzemelere ferroelektrik malzemeler denir. Ferroelektrik malzemeler rastgele yönlendirilmiş domainlerden oluşur. Ferroelektrik plakanın yüzeyleri arasında potansiyel farkı uygulandığında domainler elektrik alanına paralel yönelir ve bir deformasyon olur. Ferroelektrik özellik (hem pozitif hem

negatif gerilim altında genişleme) malzemeyi Curie noktasına ısıtma (ferroelektrik özellik kaybolur) ve ön gerilim noktasının altına soğutma ile piezoelektrik özelliğe dönüştürülür. Bundan sonra malzeme piezoelektrik malzeme gibi davranır. Kurşun zirkonat titanat ve kurşun metaniobat başlıca ferroelektrik malzemelerdir. Bu kaynakların piezoelektrik kaynaklardan üstünlüğü bunların elastik izotrop oluşudur. Özel bir eksen boyunca kesmeye lüzum yoktur. Bunlardan konkav kaynaklar yapılarak ultrases enerjisi bir tek noktada toplanabilir. Bu transduserlerin güçlerinin çok büyük olması ve üretilen ultrasesin bir noktada odaklanabilmesi nedeniyle, bir matkap gibi kullanılabilirler (Aral, 1989).

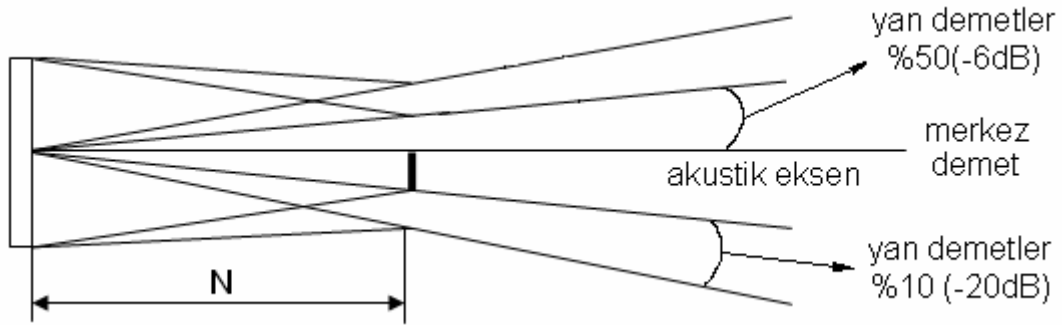
Ultrasonik transduserlerin materyallerinde aşağıdaki özellikler olmalıdır (Berlincourt, 1961).

1. Titreşim modları için piezoelektrik karakteristiklere sahip olmalıdır.
2. Homojen bir yapıya sahip olmalıdır.
3. Arzu edilen şekil ve büyüklükte çalışılmasına elverişli olmalıdır.
4. Sıcaklıkla özelliklerinin değişimi çok küçük olmalıdır.
5. İç direnci mümkün olduğu kadar düşük olmalıdır.
6. Fiziksel ve kimyasal özelliklerini uzun süre korumalıdır.

2.1.5. Ultrasonik Demet ve Özellikleri

Ultrasonik probda üretilen dalgaların madde ortamında yayılmaları bir demet şeklinde olmaktadır. Demetin şekli; transduserin şekline, boyutuna, frekansına ve ortamın ses hızına bağlıdır. Büyük boyutlu transduserler ile yüksek frekansta üretilen ses demeti dar, küçük boyutlu transduser ile düşük frekansta üretilen ses demeti ise geniş olmaktadır. Bir dairesel transduserin ses demeti basitleştirilmiş olarak Şekil-7' de gösterilmiştir. Ses demeti, yakın alan ve uzak alan olmak üzere iki bölgeden oluşmaktadır. "Bu iki alan yalnız geometriler bakımından değil aynı zamanda enerjik bakımından da birbirlerinden önemli ölçüde farklıdır" (Cracknell, 1980; Alp, 1998). Yakın alanı uzak alana birleştiren, demetin dar bölgesine odak denir (Berke ve Hoppenkamps, 1990).

Şekil-7: Ultrasonik Demet

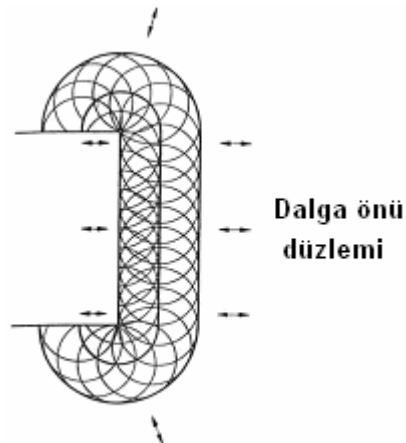


Ultrases demetinin iyi ve sonuç alıcı şekilde yönlendirilmesi için transduser çapı, yayınlanan ultrasesin dalga boyunun birkaç katı olmalıdır. Bunu sağlamak içinde kristalin ya büyüklüğü artırılır ya da dalga boyu azaltılır (Kanevskii, 1964).

2.1.5.1. Yakın Alan

Bir piezoelektrik transduser, her biri küresel dalgalar yayan nokta kaynaklar topluluğu şeklinde düşünülebilir. Bu küresel dalgalar birbiriyle girişim yapar ve sonuçta minimum ve maksimum şiddetlerin olduğu, transduserle bitişik bir bölge meydana gelir. Bu bölgeye yakın alan veya Fresnel bölgesi denir. Yani bu bölgede girişim söz konusudur. Şekil-8' den görüldüğü gibi, nokta kaynakların oluşturduğu dalga önü düzlemseldir.

Şekil-8: Yakın Alanda Dalga Önü Düzlemi



“Yakın alan içerisinde aynı basınçtaki noktaların oluşturduğu çizgilere izobar denir. Ultrasonik demetin merkez eksenini oluşturan akustik eksen üzerindeki ses basıncı

yakın alan içerisinde karmaşık bir değişim göstermektedir. Basınç, yakın alanın ilk yarısında minimumda ve yakın alanın sona erdiği odak noktasında maksimumdur. Şekil-9, akustik eksen üzerindeki basınç değişimini göstermektedir” (Kökdemir, 2007).

Yakın alan uzunluğunu belirleyen formül şu şekilde verilebilir:

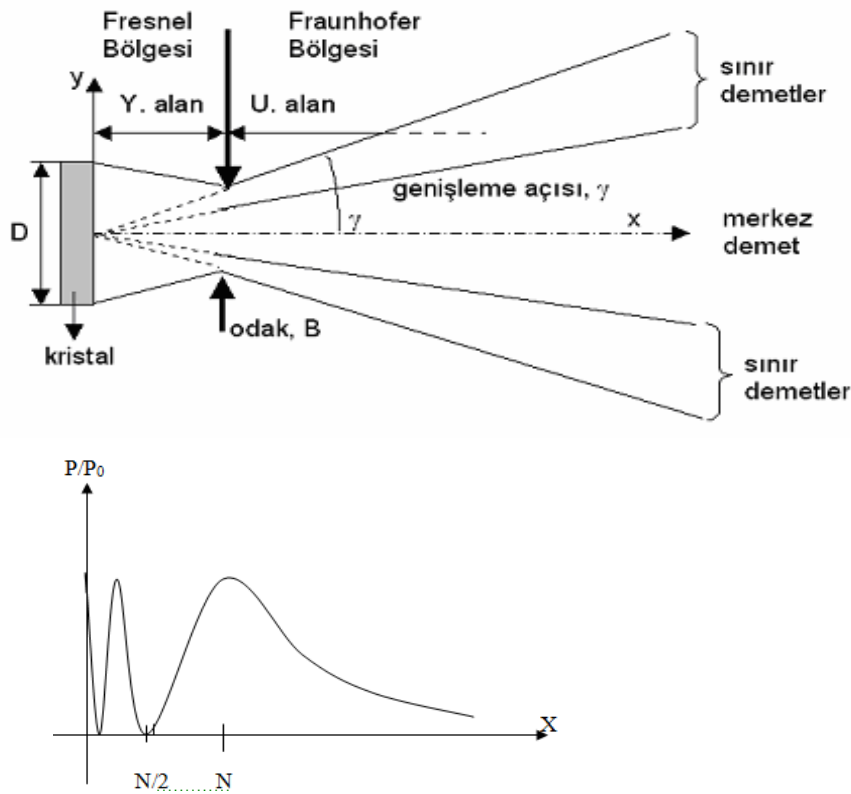
$$N = D^2 \cdot f / 4 \cdot V = D^2 / (4\lambda) \quad (2.13)$$

Burada; D: Kristalin çapı

V: Sesin ortam içerisindeki yayılma hızı

“Bu formülden, bir üreticinin her ortamda farklı demetler vereceği, üreticinin ölçüleri değiştiğinde aynı frekanslarda farklı demetler üreteceği, enine ve boyuna dalgaların ortamdaki yayılma hızları farklı olduğundan farklı demetlerle oluşacağı gibi sonuçlara varılabilir” (Gürpınar, 2007).

Şekil-9: Dairesel Kesitli Bir Transduserin Akustik Ekseni Üzerinde Basınç Değişimi



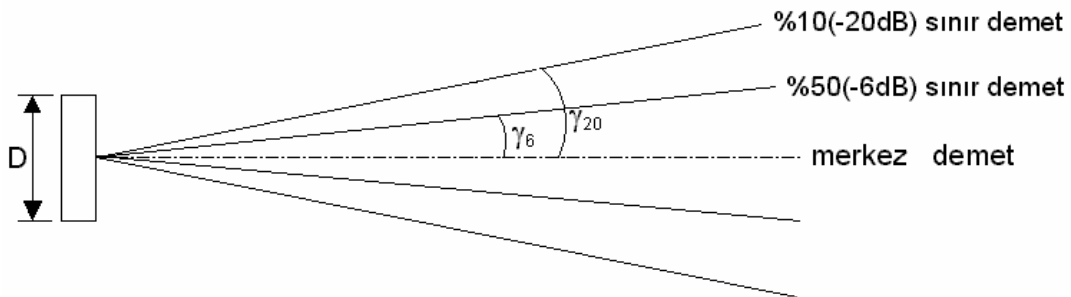
2.1.5.2. Uzak Alan

Yakın alanın sona erdiği odaktan itibaren ses demetinin genişleyerek devam ettiği bölgeye uzak alan veya Fraunhofer bölgesi denir. Uzak alan, ses alan basıncının azalarak sıfıra geldiği yerdir ve bu bölgede yok denecek kadar az girişim olur. Uzak alanda, üç yakın alan uzunluğundaki mesafeden itibaren dalga önü küreseldir; halbuki, yakın alanda dalga önü düzlemseldir. Uzak alanda, bir yakın alan uzunluğu ile üç yakın alan uzunluğu arasındaki bölgeye geçiş bölgesi denir, zira bu aralıkta dalga önü düzlemsel şekilden küresel şekle dönüşür. Uzak alanda bütün kesitlerde ses basıncı akustik eksen üzerinde maksimumdur (Berke ve Hoppenkamps, 1992).

2.1.5.3. Demet Genişlemesi

Ses demeti uzak alanda belli bir açı ile genişleyerek yayılır. Uzak alanda ses basıncı akustik eksen (merkez demet) üzerinde maksimum olup, ilk minimumdan geçen yan demet ile akustik eksenin belirlediği açığa demet genişleme açısı denir. Ses demetini belirleyen sınır demetler genellikle %50 (-6 dB) ve %10 (-20 dB) sınır demetleri olarak adlandırılmaktadır. Şekil-10' da gösterildiği gibi, %50 veya -6 dB sınır demeti, yankı tekniğinde bir nokta yansıtıcının gönderdiği yankı genliğinin akustik eksen üzerinde gönderdiği genliğe göre yarıya indiği demet demektir. %10 veya -20 dB sınır demeti de benzer şekilde, genliğin onda bire indiği demet anlamına gelmektedir (Berke ve Hoppenkamps, 1990).

Şekil-10: Demet Genişlemesi



Demet genişleme açısı aşağıdaki bağıntı ile hesaplanabilmektedir:

$$\sin \gamma_n \cong (k_n) \cdot V / (f \cdot D) = k_n \cdot \lambda / D \quad (2.14)$$

Burada; γ : Demet genişleme açısı

k: Transduser tipine ve genişleme açısına bağlı katsayı

n: İlgili sınır demetini belirleyen alt indis

D: Disk tipi kristaller için çap

“Ses hızının azaldığı ortamlarda demet, boyca uzamakta ve konisel açılım daralmaktadır. Buna karşın ses hızının yüksek olduğu ortamlarda ise demet genişleyerek açılma eğiliminde olmaktadır” (Gürpınar, 2007).

2.1.6. Ultrasonik Testte Kullanılan Prob Tipleri

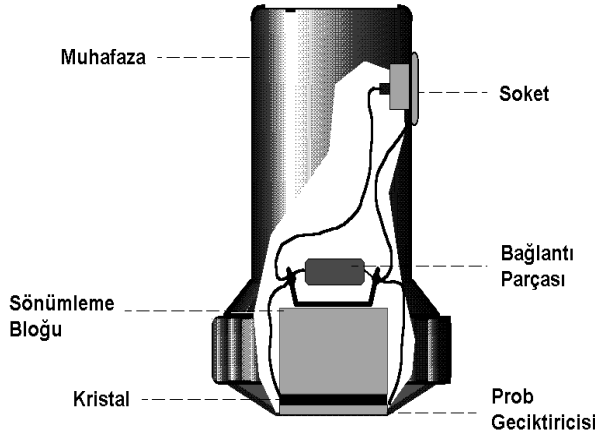
Prob ultrasonik dalgaları, üretmeye ve algılamaya yarayan bir düzendir. Bir ultrasonik aletin en uç elemanı olan prob, kendi içerisinde bazı elemanların birleşmesinden meydana gelmiştir. Bunlar transduser, aşınma tabakası, sönüm bloğu, akustik zırh, elektronik devreler, dış muhafaza ve iç dolgu olarak sayılabilir (Dahmen, 1969; Ginzel, 1998).

- **Transduser:** Ultrasonik enerjiyi üreten ve algılayan eleman olup, alt ve üst yüzeyleri gerilim plakalarıyla kaplanmıştır.
- **Aşınma tabakası:** Transduseri aşınmaya ve dış etkilere karşı koruyan tabaka olup, sert plastik veya seramikten yapılır.
- **Sönüm bloğu:** Kristalin arkasına yerleştirilen ve ses absorplamaya yarayan tabakadır. Ultrasonik darbenin boyu ve kristalin arka yüzeyinde oluşacak gürültü sinyalleri sönüm bloğu ile kontrol altına alınır.
- **Akustik zırh:** Çift kristalli problarda gönderici ve algılayıcı kristallerin girişim yapmasını önlemek amacıyla, ses soğurucu bir maddeden yapılmış ve iki kristal arasına yerleştirilen bir tabakadır.
- **Elektronik devreler:** Kristal ile ultrasonik alet arasındaki bağlantıyı ve probun çalışmasını sağlayan elemandır.
- **Dış muhafaza:** Prob iç elemanlarını taşıyan kap olup, genellikle metalden yapılır.
- **İç dolgu:** Muhafaza kabının içinde bulunan elemanlardan kalan boşlukları doldurmak amacıyla kullanılan ve genellikle reçine türü olan maddelerdir (Arık, 1989).

2.1.6.1. Tek Kristalli Normal Problar

“Normal problar, genellikle boyuna dalga üretirler ve malzeme yüzeyine dik doğrultuda ses demeti gönderirler. Tek transduserli problarda, transduser hem gönderici hem algılayıcı olarak çalışır. Şekil-11’ de normal bir prob ve iç elemanları gösterilmektedir. Transduser, cihazın gönderici (darbe) ve yükseltici devreleri ile bağlantılıdır. Bu nedenle başlangıç darbeleri uzun, dolayısıyla ölü bölgeleri büyüktür” (Ekinici vd., 2009). Döküm ve sac malzemelerin testinde yaygın olarak kullanılırlar. Normal prob tabanına mercek koymak suretiyle ses demetini odaklamak mümkündür. Eğik taban üzerine monte etmek suretiyle de açılı prob olarak kullanılabilirler (Kökdemir, 2007).

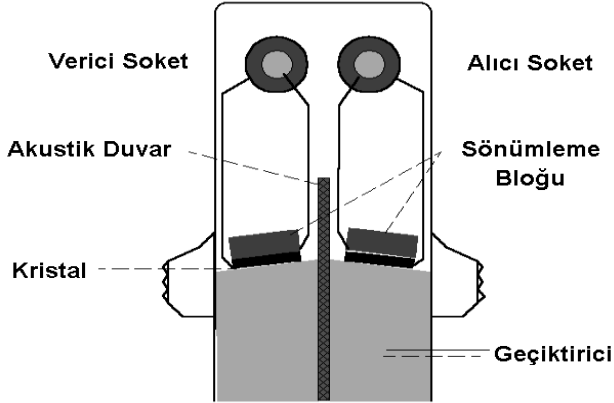
Şekil-11: Tek Kristalli Normal Prob



2.1.6.2. Çift Kristalli Normal Problar

Tek kristalli normal problarda karşılaşılan zorlukları önlemek için çift kristalli normal problar kullanılmaktadır. Şekil-12’ den de görüldüğü gibi bu problar birbirinden akustik bir zırh ile ayrılmış iki ayrı transduser içermektedir. Transduserlerden biri cihazın gönderici devresine (darbe devresine), diğeri de algılama devresine bağlıdır. Böylece, darbe devresi tarafından yükseltici devreye gönderilen başlangıç elektrik darbesi geciktirilmekte ve ölü bölge yok olmaktadır (Berke ve Hoppenkamps, 1992).

Şekil-12: Çift Kristalli Normal Prob

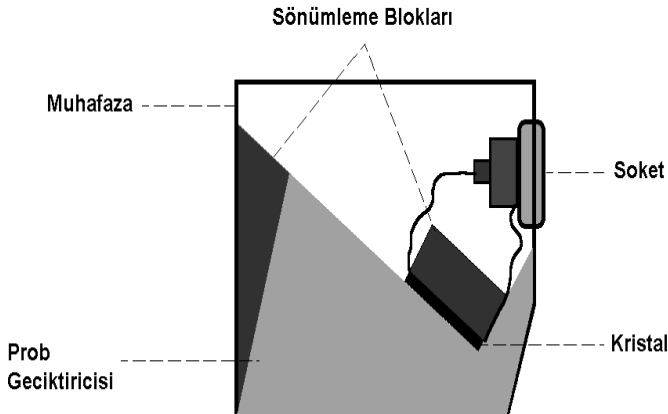


“Çift kristalli probalar yüksek ayırma güçlerinden dolayı yüzeye yakın hataların algılanmasında, cidar kalınlığı ve korozyon ölçümünde kullanılır” (Ekinci vd., 2009).

2.1.6.3. Açılı Problar

Açılı probalar test malzemesi yüzeyine ses dalgalarını belli bir açı altında gönderirler. Şekil-13’ de görüldüğü gibi kristal, eğik bir taban üzerine yerleştirilmiştir.

Şekil-13: Açılı Prob



Açılı prob, test parçası yüzeyine belli bir geliş açısı altında boyuna dalgalar gönderir. Bu boyuna dalgalar malzeme ortamında kırılarak enine dalgalara dönüşür. Ticari olarak üretilen açılı probalar, çelik içinde 35° , 45° , 60° , 70° ve 80° enine dalga yayacak şekilde dizayn edilmişlerdir. “Açılı problemlerin en önemli kullanım alanı kaynak dikişlerinin kontrolüdür” (Arık, 1989).

2.1.7. Ultrasonik Test Yöntemleri

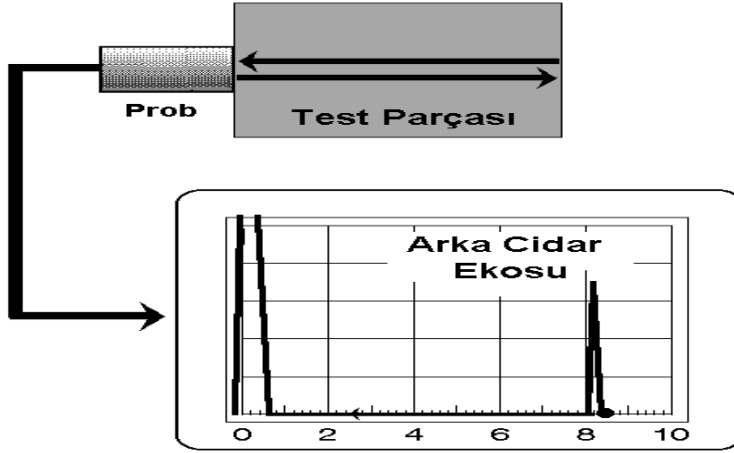
“İki ortamın ara yüzeyine gelen ultrasonik dalgaların bir kısmı geldikleri ortama yansıtılırken, diğer kısmı ikinci ortama geçerek yayılmaya devam eder. Ultrasonik testte yansıyan dalgaların kullanıldığı yöntem darbe-yankı yöntemi, iki yüzey arasında geçiş yapan dalgaların kullanıldığı yöntem de doğrudan iletim (transmisyon) yöntemi denir. Malzemelerin, ultrasonik dalgalarla rezonans haline uyarılarak kontrol edildiği yöntem ise rezonans yöntemi denir” (Kökdemir, 2007).

2.1.7.1. Darbe-Yankı (Puls-Eko) Yöntemi

Malzemelerin ultrasonik testinde en çok kullanılan yöntem olup, hata yansıtıcı olarak etki etmektedir. Prensibi, prob tarafından gönderilen ses dalgalarının malzeme içinde bir süreksizliğe çarptıktan sonra tekrar proba yansması esasına dayanır. Bu yöntemde, tek kristalli veya çift kristalli prob kullanıldığı gibi, iki ayrı prob da kullanılabilir. İki prob kullanıldığında, problar malzemede aynı yüzey üzerine temas ettirilir ve biri gönderici diğeri algılayıcı olarak çalışır. Ultrasonik dalga, genellikle numunenin birbirine paralel olan düz yüzünün herhangi birine yapıştırılan piezoelektrik bir transduser ile oluşturulur (Papadakis, 1968).

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 prensibi Şekil-14’de gösterilmiştir (Berke ve Hoppenkamps, 1992; Güzel, 1996).

Şekil-14: Darbe-Yankı Yönteminin Prensibi



“Ultrasonik darbe-yankı tekniği genellikle ultrasonik hız ve yutulma ölçümlerinin tam olarak alınması, Young modülü değerlendirilmesi, mikroyapı karakterizasyonunun belirlenmesi ve mekanik özelliklerin değerlendirilmesi için kullanılır” (Ataş, 2000).

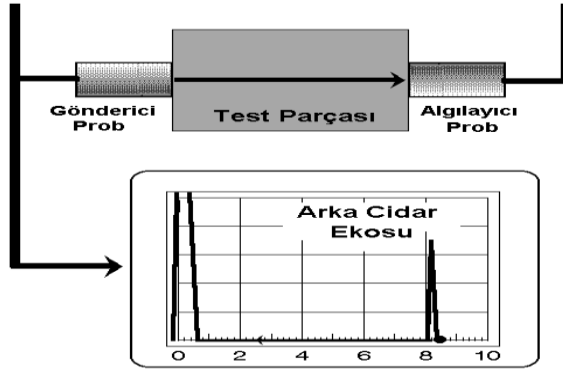
2.1.7.2. Doğrudan İletim (Transmisyon) Yöntemi

Bir ultrases dalgasının test numunesi içerisinde geçiş zamanı, numunenin bir yüzeyine ultrases vericisi bir transduser ve karşı yüzeyine alıcı transduser yerleştirilerek ölçülür. Bu yöntemde, yansıyan ultrasonik ses miktarı değerlendirilmez. Hatalar, parçayı kat eden ultrasesin genliğinin azalması ile belirlenir. Malzemeyi geçen dalga hızının genliği ölçülür. Böylece malzemenin iç yapısı hakkında bilgi edinilir. “Bu yöntem, zayıflamanın yüksek olduğu ve büyük hataların bulunduğu dökümlerin testinde çok kullanılmaktadır. Yöntem, hatanın büyüklüğünü ve derinliğini vermez. Yöntemin en önemli avantajları, ses tek geçiş yaptığı ve geri dönmediği için zayıflama etkisinin yarıya inmesi ve geçiş süresinden dolayı transmisyon sinyalinin diğer yansıtıcı sinyallerden kolayca ayırt edilebilmesidir” (Beköz, 2006).

İhtiyacı olan tetikleme devresi ise öyle olmalı ki; ölçüm, verici transduser gelen dalgayı gönderdiğinde başlasın, dalga alıcı transdusere ulaştığında sona ersin. Test parçasının farklı yerlerinden alınan ölçümler sonucu geçiş zamanları aynı çıkarsa,

test parçası içinde süreksizlik yoktur denir; ama ölçülen zamanlarda farklı bir ölçüm alınır, test maddesi içinde yapı bozukluğu vardır denir (Sarpün, 1998).

Şekil-15: Transmisyon Yönteminin Prensibi



İletim yöntemi sadece yutulma sinyal ölçümlerini içerir (Ataş, 2000). Numune içerisinde süreksizlik yoksa verilen enerjinin yaklaşık olarak çoğu karşı tarafta hissedilir, dolayısıyla kullanılan bir osiloskop varsa, ekranda oluşan atmaların genlikleri eşit olur. Eğer süreksizlik varsa verilen enerjinin bir kısmı absorblanacağı için alıcı transduser enerjinin belli bir kısmını algılamayacağından ekranda oluşan atmaların genliklerinde düzensizlikler oluşur.

2.1.7.3. Rezonans Yöntemi

“Önceleri rezonans yöntemi ile yapılan kalınlık ölçümleri günümüzde yerini başka yöntemlere bırakmıştır. Dışarıdan uygulanan tek bir darbenin etkisiyle serbest olarak titreşen bir yapı, rezonans frekansı ile titreşir ve titreşim sönümleninceye kadar frekans aynı kalır” (Ekinci vd., 2010).

“Rezonansın oluşabilmesi için, test parçasının ön ve arka yüzeylerinden gelen yansımalarda büyük bir kayıp olmaması, yansımadan sonra geldikleri doğrultuda geri dönmeleri ve başka yöne saparak kaybolmamaları gerekir. Yani, test parçası paralel yüzeyli ve pürüzsüz olmalıdır. Ön ve arka yüzeylerden yansıyan dalgalar arkadan gelen yeni dalgalarla farklı fazda iseler birbirlerini zayıflatırlar, aynı fazda iseler birbirlerini kuvvetlendirirler. Kuvvetlendirme durumunda malzeme içinde sönümlenmeyen, sürekli dalgalar oluşur. Bu hal kendisini yüksek genlik ile gösterir. Bu duruma ultrasonik rezonans denir. Bu metodun kullanılması için gerekli olan şart, gönderilen ultrasesin dalga boyunun yarısı veya bunun tam katları, malzemenin

kalınlığına eşit olmalıdır. Rezonans oluştuğunda algılanan darbenin genliğinde yükselme olacaktır. İlk rezonansı sağlayan temel frekans (f_0) ve malzemedeki ses hızı (V) biliniyorsa, malzeme kalınlığı (d) aşağıdaki bağıntı ile hesaplanabilir” (Ekinci vd., 2009).

$$d = V / (2 \cdot f_0) = \lambda / 2 \quad (2.15)$$

2.1.8. Ultrasesin Kullanıldığı Yerler

Ultrases metodun diğer metodlara göre pratik ve avantajlı kullanım alanları mevcuttur. Ultrases metodu ile; numune zarar görmemektedir, zaman kaybı azalmaktadır, maliyet düşmektedir. Numunenin ölçümü alınmadan önce özel işlemlerin yapılması gerekmemektedir.

“Ultrases dalgalarının dalga boyları çok kısa olduğu için dağılmazlar ve böylece ultrases dalgaları birçok alanda kullanılabilirler. Ultrases dalgalarının hızından ve enerjisinden yararlanabilmemiz sonucunda ultrases mikro düzeyden makro düzeylere kadar her alanda kullanılabilmektedir. Bir ortama ultrases dalgaları göndererek o ortam hakkında bilgi sahibi olabiliriz” (Ilıcan, 1995). Bunlar;

Ultrases dalgalarının bir ortamdaki yayılma hızlarını bularak, o ortamın elastikliği hakkında bilgi sahibi olunabilir. Çünkü, ortamın yapısına ve elastik özelliklerine göre ultrasesin ortamdaki yayılma hızı da değişmektedir. Yani maddenin fiziksel özelliklerini araştırmak için uygundur. Bu çalışmadaki deneyler ultrasesin bu tür uygulamasına bir örnektir.

Ultrases dalgalarının gönderildiği ortam içerisindeki hızı biliniyorsa, ortamdaki süreksizliklerin, hataların, boşlukların yeri duyarlı olarak belirlenmektedir. Bir ortamdan diğerine geçecek ses titreşimleri paketçığı, ortamların akustik empedanslarına bağlı olarak, belirli oranlarda iletilir ve yansıtılır. Bir prob aracılığıyla içinde hata olup olmadığı araştırılan parçaya, kısa süreli bir ses darbesi gönderilir. Hata yapısı ve sonuç olarak akustik empedansı farklı olduğu için bu ses darbesi, hata sınırından kısmen yansır ve transduser üzerinde tekrar elektriksel işarete dönüşür. Böylece hatanın büyüklüğü ve yeri saptanabilir (German, 1983a). Bu yöntemle uzaktan kumanda aletleri, görme özürülüler için kılavuzluk cihazları, ultrason aletleri yapılabilir. “Araştırmacılar sonar sisteminden hareketle insan vücuduna ses dalgası göndererek organların iç yapılarının görüntülenmesini

başarmışlardır. ‘Ultrasonografi’ adı ile artık hepimizin bildiği bu tanı yöntemi, ses dalgalarının insan vücudu içindeki seyirleri sırasında çarptıkları farklı yapıların gri skalalı bir TV ekranında görüntüye çevrilmesi esasına dayanmaktadır. Bu inceleme yöntemi ile karaciğer, dalak, böbrek gibi yumuşak organların hastalıkları belirlenebilirken, hamilelikte ana rahmindeki bebeğin gelişimi de kolayca incelenebilmekte, hatta bebeğe ait hastalıklar çok erken dönemlerde tanımlanabilmektedir” (Diren, 1995). “Sürekli ortamlarda ultrasin hızı sabittir ve bu hız biliniyorsa ortamdaki ultrasin gidiş-dönüş süresi ölçülerek mikron mertebesindeki kalınlıklar bile bulunabilir” (Ilıcan, 1995). Ultrasonik cihazlarla kalınlık ölçümünde yapılan hata yaklaşık ± 0.01 mm civarındadır. Darbe-yankı yönteminde transduser üzerine bir darbe vurulur ve arka yüzeyden ilk gelen yankı ile bu darbe arasındaki zaman farkı saptanır. Eğer madde içerisindeki ses hızı biliniyorsa, $yol = hız \times zaman$ formülünden yararlanılarak, malzemenin kalınlığı kolayca bulunabilir (German, 1983b).

Ayrıca ultrasin enerjisinden yararlanarak çok değişik alanlarda uygulamalar yapılabilir. Ultrasin enerjisini odaklayarak böbrek taşları kırılabilir, plastik levhalara kaynak yapılabilir, yüzeyler üzerindeki pislikler temizlenebilir. Makine parçalarının temizlenmesinde ultrasonik banyoların pek çok uygulaması mevcuttur. Seri üretim yapan fabrikalarda, sürekli olarak kirlenen parçalarının kontrol ve kullanım için temizlenmesi gereken uzay araştırma merkezlerinde gittikçe gelişen uygulama alanları bulunmaktadır. Uygulamasının kolay olması hastane, laboratuvar gibi küçük birimlerde de kullanımına imkan vermektedir. “Ultrasin tedaviye yönelik uygulamaları da vardır. Bu konuda ilk akla gelen böbrek taşlarının ultrasin dalgaları ile böbrek içinde olduğu yerde kırılarak (adeta öğütülerek) tozlarının idrar yolu ile dışarı atılması ve hastayı bu yolla sağlığına kavuşturma yöntemidir” (Aygün, 1990).

Ultrasin dalgaları son yıllarda çok büyük önem kazanmıştır. Ultrasin dalgaları sahip oldukları ayırt edici özellikler sayesinde endüstri, sinyalleşme, tıp ve daha birçok alanda kullanılabilir.

Basınçlı hava kaçakları, endüstrideki en pahalı enerji kaynaklarından birinin boşa harcanmasına neden olur. Kaçak noktalarında oluşan türbülans kuvvetli ultrasonik dalgalar yayar. Yayılan bu dalgalar; çevre gürültüsünden farklı olarak

ultrason tarayıcıları ile bulunabilir. Uygulama sadece hava kaçaqları ile sınırlı değildir, basınçlı her türlü gaz kaçağı ultrason uygulamalarıyla tespit edilebilir.

“Rulman, bilye ve makaraları dönüşleri sırasında, bilezikleri ile olan temasları sonucunda ultrasonik sesler çıkarırlar. Bu ultrasonik seslerin takibi sonucunda rulmanların durumları ile ilgili bilgi edinilebilir ve buna göre yağlama yapılır ayrıca takılırken yapılmış olabilecek montaj hataları tespit edilerek ileride daha büyük sorunlara neden olması engellenebilir. Rulmanlarda periyodik olarak yapılan yağlama eksik ya da fazla olacaktır ki; her iki durumun da rulman üzerindeki etkisi olumsuzdur. Yağlama esnasında, doğru miktarda yağlama yapılabilmesi açısından gres tabancası ile ultrasonik sensör birlikte kullanılmalıdır (Şekil-16). Eşzamanlı çalışmalarını sağlamak açısından akustik yağlama adaptörü ile birleştirilir ve bu sayede doğru yağ miktarının ayarlanması sağlanır” (Denli, 2007).

Şekil-16: Akustik Yağlama Adaptörü



2.2. KOMPOZİT MALZEMELER

2.2.1. Kompozit Malzemelerin Tanıtımı

“Kompozit malzeme, tasarımda aranan özellikleri verebilecek daha uygun bir malzeme oluşturmak için makro-seviyede iki ya da daha fazla malzemenin birleştirilmesi sonucu elde edilen yeni malzemedir. Makro yapıdan kasıt malzemenin makroskobik olarak her tarafta eşit olmasıdır” (Şahin, 2000). Kompozitler çok fazlı malzeme sayılırlar. Yapılarında sürekli bir ana faz ile onun içinde dağılmış pekiştirici bir tali (donatı) fazı bulunur.

Tarihte antik çağdan itibaren kompozitler kullanılmıştır. Antik Mısır’ da, Anadolu’ da ve birçok eski medeniyetlerde samanla toprak bir araya getirilerek kerpiç kompozitler, bitki elyafı ile zift karıştırılarak kano yapımında kullanılmıştır. “Kompozitlerin endüstriyel anlamda kullanımı 1899’ da fenolformaldehit ve 1907’ de fenolik plastiğin bulunmasıyla başlamıştır” (Lubin, 1982). “1935’ de cam elyafı, 1936’ da polyester reçine, 1938’ de ise epoksi reçine cam takviyeli plastik kompozitlerin yapımında yaygın olarak kullanılmıştır” (Akdemir, 1992).

Kompozit malzemeler genellikle kendi başlarına elde edilemeyen, bileşenlerinin en iyi özelliklerinin bir malzemede toplanması önemli avantaj meydana getirir. Kompozit malzeme üretilmesiyle aşağıdaki bazı özellikler sağlanabilmektedir. Bunlar genel olarak aşağıdaki şekilde sıralanabilir.

- a) Yüksek dayanım
- b) Yüksek rijitlik
- c) Yüksek yorulma dayanımı
- d) Mükemmel aşınma direnci
- e) Yüksek sıcaklık kapasitesi
- f) İyi korozyon direnci
- g) İyi termal ve ısı iletkenliği
- h) Düşük ağırlık
- i) Çekicilik ve estetik görünüm
- j) İsteğe bağlı olarak ışık geçirgen özellikte üretilebilme vb.

“Bütün bu özellikler aynı zamanda oluşmaz ve herhangi bir uygulama içinde böyle bir gereksinime ihtiyaç yoktur. Özellikleri bilinen bileşenlerden yararlanılarak bir

kompozit malzemenin bazı özellikleri, örneğin; yoğunluk, Young modülleri ve çekme dayanımları vb. hesaplanabilir” (Kara, 2006).

Yukarıda belirtilen bu özellikler için gerekli şartlar, uygun matris ve takviye eleman çifti, üretim tekniği, bileşenlerin mukavemet özellikleri ve diğer faktörler göz önüne alınarak üretim yapılırsa istenilen özelliği elde etmek mümkündür.

Bu avantajların yanında kompozit malzemelerin bazı olumsuz yanları da vardır. Bunlar;

- a) Üretim güçlüğü
- b) Pahalı olması
- c) Maliyetinin yüksek olması ve gerekli yüzey kalitesinin elde edilemeyişi
- d) Diğer malzemeler gibi geri dönüşümünün olmayışı
- e) Kırılma uzamasının az oluşu gibi faktörler sayılabilir.

Kompozit malzemeler “matriks” adı verilen bir ana bileşenle, yüksek mukavemete ve yüksek elastiklik modülüne sahip olan “takviye edici” (elyaf, parçacık, vs.) olarak adlandırılan yapısal bileşenlerden oluşurlar. Bu bileşenler birbiri içinde çözünmezler. Birleşme genellikle fizikseldir. Kompozitin özelliği, bileşenlerinin özelliklerinden daha üstündür. “Yüksek mukavemet ve rijitliğe sahip elyaf, kimyasal dirençli plastik matriks malzemedden üretilen kompozitin mukavemet ve rijitliği elyafa, kimyasal direnci ise plastiğe yakın olur” (Akdemir, 1992). Matriksler, kompozit malzemeler içerisinde takviye elemanları olan elyafları bir arada tutmaya yarar, yani bağlayıcı olarak görev yaparlar. Matriksin amacı; desteklemek, korumak ve gerilmeyi transfer etmektir. Matrikslerin yoğunlukları, rijitlikleri, mukavemetleri elyaflara göre daha düşüktür. Bununla birlikte elyaflarla birleştiklerinde çok büyük mukavemetli ve rijitlik özelliği iyi bir malzeme ortaya çıkar ve aynı zamanda bu malzemenin yoğunluğu da düşük olmaktadır.

2.2.2. Kompozit Üretiminde Kullanılan Malzemeler

2.2.2.1. Matris Malzemeleri

Kompozit yapılarda matrisin üç temel fonksiyonu vardır. Bunlar, elyafları bir arada tutmak, yükü elyaflara dağıtmak ve elyafları çevresel etkilerden korumaktır (Aran, 1990). İdeal bir matris malzemesi, başlangıçta düşük viskoziteli bir yapıda

iken daha sonra elyafları sağlam ve uygun şekilde çevreleyebilecek katı forma kolaylıkla geçebilmelidir.

Kompozit yapılarda yükü taşıyan elyafların fonksiyonlarını yerine getirmeleri açısından matrisin mekanik özelliklerinin rolü çok büyüktür. Örneğin matris malzemesi olmaksızın bir elyaf demeti düşünüldüğünde yük bir ya da birkaç elyaf tarafından taşınacaktır. Matrisin varlığı ise yükün tüm elyaflara eşit dağılımını sağlayacaktır. Kesme yükü altındaki bir gerilmeye dayanımı, elyaflarla matris arasında iyi bir yapışma ve matrisin yüksek kesme mukavemeti özelliklerini gösterir.

Elyaf yönlendirmelerine dik doğrultuda, matrisin mekanik özellikleri ve elyaf ile matris arasındaki bağ kuvvetleri, kompozit yapının mukavemetini belirleyici önemli hususlardır. Matris elyafa göre zayıf ve daha esnektir. Bu özellik kompozit yapıların tasarımında dikkat edilmesi gereken bir husustur. Bununla beraber, matris malzemelerin avantajlı korozyon ve kimyasal direnci, ses yalıtımı, ısı izolasyonu, şeffaflık, elektrik yalıtımı gibi özellikleri de malzeme türüne göre olabilmektedir.

Kompozit malzemelerin üretiminde kullanılan matris malzeme tipleri epoksi, polyester, vinil ester, fenolik vb. reçinelerdir.

2.2.2.1.1. Plastik Matrisler

Plastikler hafif olması ve kolay işlenebilmelerinden dolayı geniş bir uygulama alanına sahiptir. Plastiklere reçine de denilebilmektedir. Düşük elektrik ve ısı iletkenlikleri ile yüksek korozyon dayanımları bu malzemelerin başlıca üstünlükleridir. Fakat bir kısmının termal dayanımları düşüktür ve birçoğunun çevresel etkilere karşı kullanımı tehlikeli olup, düşük mekanik özelliklere sahiptirler. Kompozit malzemelerin %90' ı polimer esaslı matrislerle üretilmektedir. Kompozitlerde plastik esaslı matrisler termoset ve termoplastik matrisler şeklinde iki tür olarak bulunmaktadır.

2.2.2.1.1.1. Termoset Matrisler

“Termoset esaslı, kompozit malzeme matrisleri olarak en çok kullanılanlardır. Termoset plastikler sıvı halde bulunurlar, ısıtılarak ve kimyasal tepkimelerle sertleşir ve sağlamlaşırlar. Termoset polimerlerin polimerizasyon süreci termoplastiklerden farklı olarak geri dönüşü olmayan bir süreçtir. Yüksek sıcaklıklarda dahi

yumuşamazlar. Termoset reçineler kimyasal etkiler altında çözülmez ve olağandışı hava şartlarında dahi uzun ömürlü olmaktadır. Aşağıda en yoğun kullanılan matrisler ve genel özellikleri yer almaktadır” (Kara, 2006);

Polyester; matris malzemesi olarak ucuzluğu nedeniyle birinci sırayı almaktadır. Özellikle denizcilik ve inşaat alanında en çok kullanılan termoset reçinedir. Reçinelerin, kolay kullanım, çok düşük maliyet gibi avantajlarının yanı sıra, sertleşme sırasında yüksek oranda çekme, zehirli Sitiren gazı yayma gibi dezavantajları da vardır. Polyester reçineler iki ana grupta toplanırlar.

a) Doymuş polyesterler

b) Doymamış polyesterler

Doymuş polyester reçineler polietilen teraftalat veya retilen gibi termoplastik özellik gösteren ve enjeksiyon kalıplamada ve elyaf üretiminde kullanılan reçinelerdir. Doymamış polyester reçineler ise, uygun bir katalizör ile ‘cross-linl’ (şebeke yapısı) oluşturan termoset özellikli reçinelerdir. Cam takviyeli plastik üretiminde genellikle doymamış polyester reçine kullanılır ve değişik amaçlar için, değişik özellikte doymamış polyester reçine türleri geliştirilmiştir.

Epoksiler; Geniş kullanım alanına sahiptirler. /Prepregs olarak/ havacılık, spor, ulaşım, askeri ve deniz araçları elemanlarında kullanılırlar. Epoksi reçinelerin, suya dayanım, ıslakken 140 °C, kuruyken 220 °C’ ye kadar ısı dayanımı, sertleşme sırasında düşük oranda çekme gibi özelliklerinin yanında, yüksek maliyet ve cilde aşırı zararlı olması gibi olumsuz özellikleri de vardır. Epoksi reçineler bisfenol A bazlı reçineler, glisidil esterler, glisidil aminler, novalaklar, bromlu reçineler, sikloalifatik ve diğer reçineler olmak üzere altı sınıfa ayrılır (Lubin, 1969; Goodman, 1998).

Vinil ester; Son derece yüksek kimyasal/çevresel dayanım, polyesterden daha yüksek mekanik özelliklerinin yanında, aşırı sitiren içermesi, polyesterden daha pahalı olması ve sertleşme sırasında yüksek oranda çekme gibi olumsuz özellikleri vardır.

Silikon; Yüksek ateş dayanımı, yüksek ısılarda ürün özelliklerini koruyabilme gibi olumlu özelliklerinin yanı sıra, kür işlemi için yüksek ısı gerektirmesi ve maliyetinin yüksek olması gibi olumsuz özellikleride vardır.

Poliamid; yüksek sıcaklıklarda, poliamid reçine değerlerine göre en dayanıklı reçine türüdür. Mekanik özellikleri de oldukça iyidir. Su absorpsiyonunun yüksek olması kullanımda dikkat gerektirmektedir.

Tablo-1: Bazı Termosetlerin Mekanik Özellikleri

| Malzeme | Çekme Dayanımı (MPa) | % Uzama | Young Modülü (GPa) | Yoğunluk (gr/ cm ³) |
|-----------|-------------------------|---------|-----------------------|------------------------------------|
| Polyester | 41-90 | 0-3 | 2,1-4,5 | 1,28 |
| Epoksi | 28-103 | 0-6 | 2,8-3,4 | 1,28 |
| Silikon | 21-28 | 0 | 8,3 | 1,55 |
| Fenolik | 34-62 | 0-2 | 2,8-9 | 1,27 |

Kaynak: Judge, 1996.

2.2.2.1.1.2. Termoplastik Matrisler

“Termoplastik polimerlerinin çeşitlerinin çok fazla olmasına rağmen matris olarak kullanılan polimerler sınırlıdır. Termoplastikler düşük sıcaklıklarda sert halde bulunurlar ısıtıldıklarında yumuşarlar. Termosetlere göre matris olarak kullanımları daha az olmakla birlikte üstün kırılma tokluğu, hammaddenin raf ömrünün uzun olması, geri dönüşüm kapasitesi ve sertleşme süreci için organik çözücülere ihtiyaç duyulmamasından dolayı güvenli çalışma ortamı sağlaması gibi avantajları bulunmaktadır. Bunun yanı sıra şekil verilen termoplastik parça işlem sonrası ısıtılarak yeniden şekillendirilebilir. Oda sıcaklığında katı halde bulunan termoplastik soğutucu içinde bekletilmeden depolanabilir. Termoplastiklerin kompozit malzemelerde matris olarak tercih edilmemelerinin başlıca nedeni üretimdeki zorlukların yanı sıra yüksek maliyetidir. Termoplastikler termosetlere kıyasla hammaddesi daha pahalıdır” (Kara, 2006). En yaygın kullanılan termoplastikler polietilen, polipropilen, selülozlar, polikarbonatlar vb. plastiklerdir.

Polietilen; “polietilen çok ucuz, kimyasal olarak kararlı, kaynak yapılması nispeten kolay, gerilmeye karşı mukavemetli olup düşük sıcaklıklara hassas değildir. Geniş bir sıcaklık aralığında kullanılmasının yanı sıra su buharına karşı mükemmel bir bariyerdir. Buna karşılık gaz, aroma ve yağ geçirgenliği açısından vasat özelliktedir” (Ekrem, 2006).

Polipropilen; polipropilen propilen polimerizasyonu ile üretilen yarı sert, şeffaf, kolay şekillendirilen, pahalı olmayan bir polimerdir. Polipropilenin kimyasal direnci iyidir. Bazların, asitlerin ve tuzların sulu çözeltilerinden etkilenmez, alkollere ve deterjan çözeltilerine karşı dayanıklıdır. UV- ışınları polipropilenden yapılan malzemelerin yüzeyini bozar. Daha çok valiz, bavul, steril sağlık gereçleri, akü kutuları, plastik kaplar, depolama kapları, şeffaf ambalaj, bahçe mobilyası, termos yapımında kullanılır (Saçak, 2005).

2.2.2.1.2. Metal Matrisler

Kompoziti sürekli bir arada tutan ve bu bütünlük içinde lifle birlikte malzemenin özelliklerini belirleyen matris malzemesi olarak metaller, taşıyıcılık açısından, özellikle polimer matris malzemesine kıyasla yüksek dayanıma sahiptirler. Üretimleri zor olup maliyeti yüksek olmasına karşın, metal matris malzemesi kompozitin tokluğunu önemli ölçüde arttırmakta ve yüksek sıcaklık etkisindeki uygulamalara olanak vermektedir. Metallerin matris malzemesi olarak kullanılması, yine metal olan birçok ince liflerin üretimiyle başlamıştır.

Kompozit üretiminde metal matris malzemesi olarak bakır, alüminyum, titan, nikel, gümüş gibi metaller başta gelmektedir. Metal matris içinde en kolay kullanılabilen elyaf ise bor elyafıdır.

2.2.2.1.3. Seramik Matrisler

“Seramikler ise düşük yoğunluklu, çok dayanıklı ve sert olmalarına rağmen aşırı derecede gevrekler. Bunlar genellikle termal ve kimyasal etkilere karşı dirençlidirler. Ancak yüksek ergime sıcaklık dereceleri ve sertlikleri işlenmelerini zorlaştırır ve yalıtıkcandır. Kırılgan oluşları bunları potansiyel olarak güvensiz yapar. Metallerle karşılaştırıldığında, çok gevrek olduklarından plastik olarak akmazlar. Daha yüksek maliyetleri yanında bu malzemelerden yapılan parçaların çok daha dikkatli ve doğru tasarlanma zorunluluğu vardır” (Şahin, 2000).

2.2.2.2. Takviye Malzemeleri

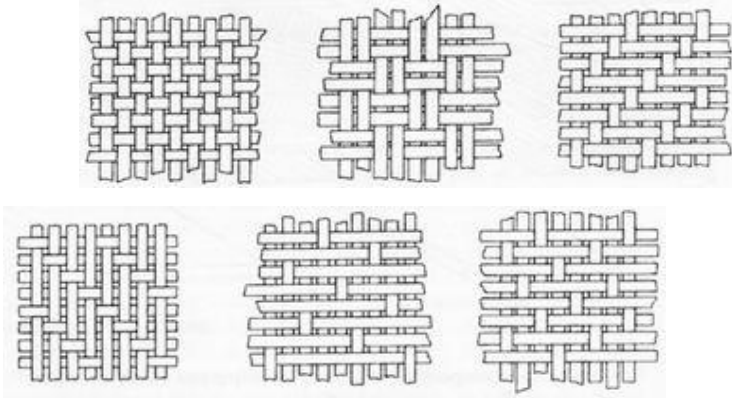
Kompozit malzemelerin en yaygın türü, elyaf takviyeli kompozitlerdir. Elyafın birinci görevi yükü taşıyarak dayanım ve rijitliği artırmaktır. Kompozit

malzemelerde kullanılan elyafların fiziksel biçimleri, oluşturulan yeni malzemenin özellikleri üzerinde çok önemli bir faktördür. Takviyeler temel olarak 3 farklı biçimde bulunmaktadır; parçacıklar, süreksiz ve sürekli elyaflar. Parçacık genelde küresel bir biçimde olmamasına rağmen her yönde yaklaşık olarak eşit boyutlardadır. Çakıl, mikro balonlar ve reçine tozu parçacık takviyelerine örnekler arasında sayılabilir. Elyaflar bir boyutu diğer boyutlarına göre daha fazla olan malzemelerdir. Süreksiz elyaflar (doğranmış elyaflar, öğütülmüş elyaflar veya whiskers-püskül) birkaç milimetreden birkaç santimetreye kadar değişen ölçülerde olabilmektedir. Çoğu lifin çapı birkaç mikrometreyi geçmemektedir. Bu nedenle elyafların parçacık halden lif haline geçişi için çok fazla bir uzunluğa gerek yoktur. Sürekli elyaflar ise tel sarma yöntemi gibi yöntemlerde kesilmeden ip şeklinde kullanılmaktadır. Elyaflar en yüksek mekanik özelliklerini enlerinden daha çok boylarına gösterirler. Bu özellikler kompozit malzemelerin metallere rastlanmayan aşırı anizotropik malzeme özelliği göstermelerine neden olur. Bu nedenle tasarım aşamasında elyafların reçine içindeki yerleşimleri ve geometrilerini göz önünde bulundurmaya çok önemlidir. Uygulamada takviye malzemesi olarak kullanılan elyaflar çoğunlukla kuvvetli kovalent bağlara sahiptirler.

“Matris ile elyaflar arasında kimyasal bağdan ziyade zayıf fiziksel bağlar vardır. Ancak boyları çaplarına oranla daha uzun olan elyafların toplam yüzeyleri büyüktür. Birbirlerine dolanarak kenetlenirler ve böylece oldukça büyük yük aktarabilirler. Sünek bir matris içinde bulunan yüksek mukavemetli elyaflar çatlasa veya kırılrsa dahi kusur mikroskobik düzeyde kalır, yayılmadan sünek ve tok matris tarafından önlenir” (Karadeniz, 1989).

Bazı durumlarda malzemenin dayanımını artırmak, tüm yönlerde eşit mukavemet elde etmek için elyaflar kumaş olarak dokunurlar. Sürekli liflerle hazırlanan dokuma elyaf kumaşlarının farklı amaçlar için geliştirilmiş türleri vardır. Şekil-17’de farklı elyaf dokuma türleri görülmektedir.

Şekil-17: Elyaf Dokuma Türleri



Polimerler matris olarak kullanılmalarının yanısıra kompozitler için elyaf üretilmesinde de kullanılmaktadır. Kompozit malzemeye çok yüksek düzeyde sağlamlık katan ve sertlik kazandıran kevlar (aramid) bir polimer elyafıdır. Hafiflik ve güvenilir konstrüksiyon amaçlanan ürünlerdeki kompozit malzemelerde aramid kullanılır. Malzemelerin anizotropik ve izotropik özellikleri uzun lifli elyaflar kullanıldığında liflerin yönleri değiştirilerek farklı yönlerde farklı mekanik özellikler elde etmek mümkündür. Bu duruma anizotropik özellik denir. Metal gibi bazı malzemeler her yönde aynı mekanik özellikleri gösterirler, bu duruma ise izotropik özellik denir. Kompozit malzemelerde kullanılan başlıca elyaf türleri;

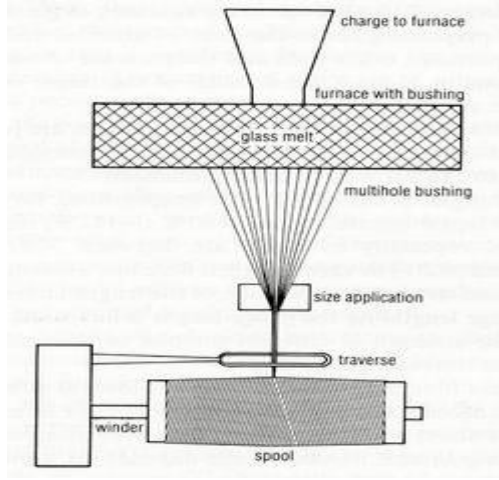
- Cam elyafı,
- Karbon (graphite) elyafı, (PAN- polyacrylonitrile- ve zift kökenli)
- Bor elyafı,
- Aramid (aromatic polyamid) elyafı, (Ticari ismi; Kevlar- DuPont)
- Oksit elyafı,
- Doğal organik elyaflar vb.

2.2.2.2.1. Cam Elyafı

“1600’ lü yılların ortalarında, İngiliz fizikçi Robert HOOKE cam elyaflarla (filament) yaptığı deneyleri açıklamış ve bir sonraki yüzyılda, Fransız fizikçi Rene Antoine Ferchault de Reaumur cam elyafların dokuma yapılabilecek kadar esnek olduğu tahmininde bulunmuştur. Cam dokuması; Libbey cam şirketinin kurucusu

Edward Libbey tarafından 1893 yılında yapılmış ve bu dokumadan yapılan bir elbise o yıl Chiago’ da yapılan Columbian Sergi’ sinde sergilenmiştir” (Reinhart, 1988).

Şekil-18: Cam Elyaf Üretimi



Cam elyafı silika, kolemanit, alüminyum oksit, soda gibi cam üretim maddelerinden üretilmektedir. Cam amorf bir yapıya sahiptir. Bu yapının oluşumu, eriyiğin soğuması sırasında kristaller düzenli bir sıraya girmeden şekillenmesinden oluşur. “Cam elyafı, elyaf takviyeli kompozitler arasında en bilinen ve kullanılanıdır” (Mallick, 1993). Cam elyafı özel olarak tasarlanmış ve dibinde küçük deliklerin bulunduğu özel bir ocaktan eritilmiş camın itilmesiyle üretilir. Elyafın kalınlığı itilme hızıyla değişir. Bu ince lifler soğutulduktan sonra makaralara sarılarak kompozit hammaddesi olarak nakliye edilir. Elyafın işlem sırasında dayanıklılıklarının %50’ sini kaybetmelerine rağmen son derece sağlamdırlar.

Cam elyafı halen aramid ve karbon elyaflarından daha yüksek dayanıklılık özelliğine sahip olmasının yanı sıra fiyatının düşük oluşu, kolay temin edilebilmesi, işleme kolaylığına sahip oluşu, esnek ve düşük kalıp maliyetine sahip olması cam elyafların en çok tercih edilen elyafların başında gelmesine neden olmaktadır.

Elyaf kumaşları genellikle sürekli cam elyafının lifleri ile üretilmektedir. İşlemler sırasında değişik kimyasalların eklenmesi ve bazı özel üretim yöntemleri ile farklı türde cam elyafı üretilmektedir;

A Cam - Pencerelerde ve şişelerde en çok kullanılan cam çeşididir. Kompozitlerde çok fazla kullanılmaz.

C Cam - Yüksek kimyasal direnç gösterir. Depolama tankları gibi yerlerde kullanılır.

E Cam -Takviye elyaflarının üretiminde en çok kullanılan cam türüdür. Düşük maliyet, iyi yalıtım ve düşük su emiş oranı özelliklerine sahiptir. “İçerisinde %2.0 alkali ve kalsiyum alümina-borsilikat bileşimi olan bir cam ailesidir. Elyaf olarak mukavemetli ve yüksek elektrik öz direnci gerektiren genel amaçlı uygulamalarda kullanılmaktadır. Kimyasal dayanımları yüksektir” (Karadeniz, 1989).

S + R Cam - Yüksek maliyetli ve yüksek performanslı bir malzemedir. Yalnız uçak sanayisinde kullanılır. Elyaf içindeki tellerin çapları E Cam’ ın yarısı kadardır, böylelikle elyaf sayısı fazlaşır dolayısıyla birleşme özelliklerinin daha güçlü olması anlamına gelen daha sert yüzey elde edilebilmektedir.

“Yüksek esneklik modüllü M camı, düşük dielektrik ve düşük yoğunluklu D camı ve radyasyona karşı uygulamalar için L camları da üretilmiştir” (Akdemir, 1992).

Cam elyafının kullanım amacına bağlı olarak elyaf sarma biçimleri farklı olabilir. Elyaf çapı ve demetteki lif sayısı farklılaşabilir. Cam elyafı biçimlendirildikten sonra yıpranma dayanımının artması için kimyasallarla bir kaplama işlemi yapılır. Kaplama malzemesi olarak genellikle elyafın kompozit malzemeye uygulanmasından önce kolaylıkla kaldırılabilen ve suyla çözülebilen polimerler kullanılmaktadır.

Cam elyaf takviye ile kullanılan en yaygın reçine türü polyesterdir. Elyaf ile reçinenin birbirine iyi yapışması çok önemlidir. İyi yapışmaktan dolayı birbirinden kayan takviye malzemesi ve matris, kompozit malzemenin sertliğini ve sağlamlık performansını düşürür. Bu durumun engellenmesi için elyaf kimyasallarla kaplanır.

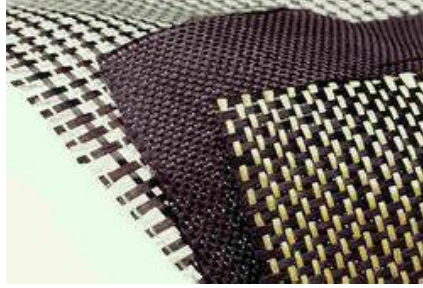
2.2.2.2.2. Karbon Elyafı

Karbon lifi ilk defa karbonun çok iyi bir elektrik iletkeni olduğu bilinmesinden dolayı üretilmiştir. Cam elyafının metale göre sertliğinin çok düşük olmasından dolayı sertliğin 3–5 kat artırılması çok belirgin bir amaçtı. Karbon elyafları çok yüksek ısı işlem uygulandığında elyaflar tam anlamıyla karbonlaşırlar ve bu elyaflara grafit elyafı denir. Günümüzde ise bu fark ortadan kalkmaktadır. Artık

karbon elyafı da grafit elyafı da aynı malzemeyi tanımlamaktadır. Karbon elyafı epoksi matrisler ile birleştirildiğinde olağanüstü dayanıklılık ve sertlik özellikleri gösterir.

Şekil-19' da çeşitli karbon elyaf örnekleri görülmektedir. Karbon elyafı cam elyafına oranla daha güçlü ve hafif olmasına rağmen üretim maliyeti daha fazladır. Hava araçlarının iskeletlerinde ve spor araçlarında metallerin yerine kullanılmaktadır. Karbon elyafından daha güçlü ve aynı zamanda daha pahalı olan ise bor elyafıdır (Becenen, 2008).

Şekil-19: Karbon Elyaf Örnekleri



Karbon fiber üreticileri devamlı bir gelişim içerisinde çalışmalarından dolayı karbon elyaflarının çeşitleri sürekli değişmektedir. Karbon elyafları piyasada iki biçimde bulunmaktadır:

Sürekli elyaf - dokuma, örgü, tel bobin uygulamalarında, tek yönlü bantlarda, ve prepreg' ler de kullanılmaktadır. Bütün reçinelerle kombine edilebilirler.

Kırılmış elyaf - genellikle enjeksiyon kalıplamada ve basınçlı kalıplarda makine parçaları ve kimyasal valf yapımında kullanılırlar. Elde edilen ürünler mükemmel korozyon ve yorgunluk dayanımının yanı sıra yüksek sağlamlık ve sertlik özelliklerine de sahiptirler.

2.2.2.2.3. Bor Elyafı

Bor, periyodik cetvelde oda sıcaklığında katı durumda olan ikinci hafif elementtir. 60' lı yıllarda elyaf olarak üretildiklerinde gelecekları çok parlak görülyordu. Ancak bor elyaftan birkaç yıl sonra üretilmeye başlanan karbon elyaf birçok uygulamada bor elyafın yerini almıştır. Pahalı olmasına rağmen bor elyaf, yüksek dayanımı nedeniyle özellikle metal matris ile bazı uygulamalarda

kullanılmaktadır. Metallerle birleşmeleri diğer elyaflara göre daha kolaydır. Örneğin bor takviyeli alüminyum borular uzay araçlarında konstrüksiyon malzemesi olarak kullanılırlar. Bor lifler kompozit malzemelerde kullanılan en kalın elyaf türü olup karbon liften 20 kat daha kalındır. Burulmaya karşı dayanımlarının yüksek olması nedeniyle çekme yanında basma dayanımları da iyidir (Aran, 1990).

2.2.3. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

“Kompozit malzemeler “matris” adı verilen bir ana bileşenle, yüksek mukavemete ve yüksek esneklik modülüne sahip olan takviye edici (fiber, tanecik, pulcuk vb.) olarak adlandırılan bileşenlerden oluşur. Kompozit malzemeler malzeme kombinasyonuna göre metal-organik, metal-inorganik, organik-organik, seramik-metal olarak sınıflandırılabilir gibi yapısal bileşenler olarak da dört şekilde sınıflandırılabilir” (Armatlı Kayrak, 1999).

1. Elyafli kompozitler
2. Parçacıklı kompozitler
3. Tabakalı kompozitler
4. Karma kompozitler

2.2.3.1. Elyafli Kompozitler

Kompozit malzemeyi meydana getiren elemanlardan biri, değişik malzemelerden meydana gelmiş olan elyaflardır. Takviye malzemesi elyaf halindedir. Elyaf tanımı, makroskobik açıdan homojen, boyu kesitinin en az 100 katı olan esnek malzemeler şeklinde yapılır ve değişik elyaflar kompozit malzemelerde takviye amacıyla kullanılır (Ersoy, 2001). Elyaf takviyeli kompozit malzemelerin özellikleri, fiber/matriks karışım oranlarını değiştirmek ve her bir fazın sahip olduğu nitelikleri düzenlemek suretiyle ayarlanabilir. Özellikleri ve sahip olduğu nitelikleri yönlerine göre değişen malzemelere, anizotropik malzeme denir. Malzemenin anizotropik olmasının en önemli neticelerinden birisi, malzeme davranışlarını izah edebilmek için gerekli olan parametre sayısının artmasıdır. Mesela, izotropik malzemelerin elastik davranışının izah edilebilmesi için yalnızca iki sabit parametre gerekirken, genel anizotropik malzeme için yirmi bir ve ortotropik malzeme için dokuz sabit parametrenin bulunması gerekir. Elyaf takviyeli kompozitler yumuşak ve

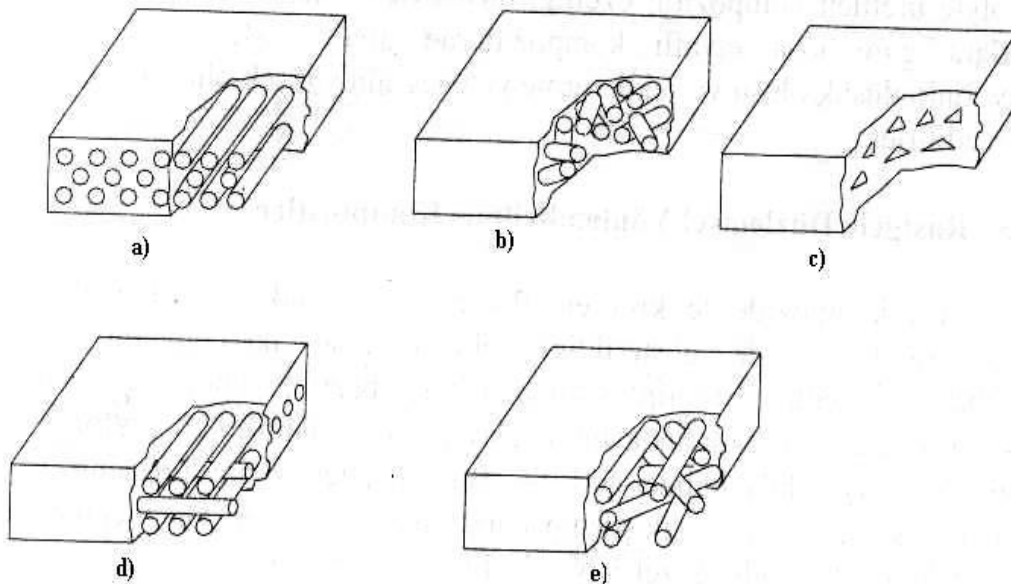
sünek matriks içine sert, dayanıklı, elastikliği yüksek elyaflar ilave edildiğinde çekme dayanımı, yorulma dayanımı, özgül modül ve özgül dayanım özellikleri iyileştirilir. Matris malzemesi kuvveti elyaflara transfer ederek yumuşaklık ve tokluk özelliği sağlarken, elyaf uygulanan yükün çoğunu taşımaktadır (Saçak, 2005).

Genel bir kural olarak kompozitlerin mekanik dayanımı içlerindeki elyaf miktarı arttıkça yükselir, elyaf oranı belli bir değere ulaştıktan sonra azalmaya başlar. Bunun nedeni, elyaf artışına bağlı olarak kompozit içerisindeki matris miktarının azalmasıdır. Matrisin kompozit içerisindeki oranı belli bir değer altına düştüğünde matris işlevini kaybeder ve elyafları bir arada tutamaz (Sakin, 1994).

İnsan yapımı olan bu elyafların her birinin kendine göre değişik özellikleri mevcuttur. Bu özellikler birbirine göre de farklıdır, elyafları meydana getiren malzemelerin kütleli formlarından da farklıdır. Örnek olarak adi bir tabaka cam, düşük bir gerilme karşısında kırılırken, cam elyaf, bunun binlerce katı büyüklükte gerilmeye dayanabilir. Bunun sebebi büyük hacimdeki malzeme içerisinde malzeme hataları elyaftaki malzeme hatalarına göre çok fazla olmasıdır. Matriks malzemedeki dislokasyonlar, elyaflarda çok azdır (Demircioğlu, 2006).

Elyafli kompozitler Şekil-20' de görüldüğü gibi; tek yönlü sürekli elyafli, kırılmış elyafli, ortogonal elyafli, çapraz dizilmiş sürekli elyafli ve rastgele dizilmiş sürekli elyafli olmak üzere beş sınıfa ayrılırlar.

Şekil-20: a) Tek Yönlü Sürekli Elyaflar b) Kırılmış (Kısa) Elyaflar c) Ortogonal Elyaflar d) Çapraz Dizilmiş Sürekli Elyaflar e) Rastgele Dizilmiş Sürekli Elyaflar



kompoziti oluşturan bileşenlerin özelliklerine ve oranlarına bağlıdır. Parçacıklar ve matrisler metal veya metal dışı olabilir. Yük matris ve partikül tarafından birlikte taşınır. Parçacık takviyeli kompozitler bir veya daha fazla malzemenin taneciklerinin başka bir matriks malzeme ile birleştirilmesinden meydana gelir (Kara, 2006).

Metal olmayan matriks içerisinde metal olmayan parçacık sistemine örnek betondur. Betonda, kum partikülleri çimento ile suyun kimyasal reaksiyonu ile birleşerek yeni bir malzeme teşkil edilmiştir. Betonun mukavemeti normal olarak kayaya denktir. Mukavemetinin kayanın mukavemetine denk olması çimentonun tipine, kimyasal reaksiyonunun yavaş veya hızlı olmasına göre değişir (Sahin, 2007).

Metalik matriksler içerisinde metal parçacıklar çözünmemiş haldedir. Kurşun partiküllerin bakır alaşımları içerisinde karışması bu tür kompozitlere bir örnektir.

Birçok metal oda sıcaklığında gevrektiler. Ancak ısıtıldıkları zaman işlenebilirliği artmaktadır. Bunun yanı sıra tungsten, krom, molibden gibi metal parçacıkları matriksler içerisinde karıştırılabilir. Meydana gelen kompozit malzeme sünektir ve yüksek sıcaklıklara dayanabilir.

2.2.3.3. Tabakalı Kompozitler

Tabakalı kompozitler bilinen en eski kompozit malzeme şeklidir. En az iki değişik levha malzemenin tabakalar halinde dizilerek oluşturduğu malzemelere tabakalı kompozit malzemeler denir. Ayrıca; tabakalar halinde bulunması her tabakanın ayrı bir kompozit olmasına izin vermektedir. Tabakalı kompozitlerin tasarım, üretim, standartlaştırma ve kontrolü diğer kompozitlerden daha kolay olmaktadır. Bu kompozitlerde özel gereksinimleri karşılamak amacıyla birden çok tabaka birlikte kullanılabilir. Bunlara sandviç malzeme de denir. Tabakalama işlemiyle kompozit malzemenin mukavemeti, katılığı, aşınma direnci, ısı yalıtım özellikleri iyileşirken çekiciliği de artar.

Tabakalı kompozitlerin üretiminde, genel olarak tabaka niteliğindeki her türlü malzeme kullanılabilir. Burada ilke, birbirlerinin özelliklerini olumlu yönde takviye edecek bir kombinasyonun oluşturulmasıdır.

“Tabakalı kompozit malzemeleri; metal tabakalı kompozit malzemeler, cam tabakalı kompozit malzemeler, polimer esaslı tabakalı kompozit malzemeler, ahşap

tabakalı kompozit malzemeler, tabakalı lifli kompozit malzemeler olarak da beş şekilde sınıflandırılabilir” (Şahin, 2000).

2.2.3.3.1. Metal Tabakalı Kompozit Malzemeler

Bimetaller farklı ısı genleşme özelliğine sahip iki metal şeritten oluşmaktadır. Ortam sıcaklığının değişmesi sonucunda, bimetal oluşturulan metal tabakalar farklı oranlarda boyutsal değişiklik gösterirler. Belirli bir referans sıcaklığındaki şekli ve konumu bilinen bu kompozit malzemenin şekil değiştirme özelliğinden farklı alanlarda yararlanılmaktadır. Örneğin; termometre, termostat, termik şalter ve benzeri elemanlar bimetal malzeme kullanılarak da üretilmektedir. Bimetaller sıcaklığın etkisiyle birbirine birleşik olan bu metallerden daha az genleşme gösteren şeridin yönüne bükülmektedir. Sıcaklığın başlangıç sıcaklığına göre artması ve azalmasıyla deformasyonun yönü değişmektedir.

Metal ve metal olmayan katmanlardan oluşan kompozitlerde üretilmektedir. Bu malzemeye örnek olarak, genelde her iki yüzeyi de boyalı veya farklı bir yüzey işlemiyle korunmuş alüminyum levhaların bir polimer malzemeyle birlikte oluşturdukları kompozit elemanlar gösterilebilir. Bunlar, yüzey kaplamada ve cephe boyası olarak da kullanılmaktadır. Ayrıca su yalıtımında kullanılan metal tabakalı bitüm kompozitleri de yine böyle bir yapıya sahiptir.

2.2.3.3.2. Cam Tabakalı Kompozit Malzemeler

Tabakalı kompozit malzemeler içinde cam tabakalarla üretilen kompozitler önemli bir gurubu oluşturur. Bilindiği gibi cam saydam olmasının yanı sıra, dış ve iç ortam koşullarına çok iyi dayanım gösteren bir malzemedir. Ancak kırılma yapısı, özellikle darbe ve kırılma riski yüksek olan yerlerdeki uygulamalarda sorun yaratmakta ve çeşitli açılardan tehlike yaratabilecek olan bu özelliğin giderilmesi gerekmektedir. Cam tabakalı kompozit malzeme en basit biçimiyle, iki cam tabakası arasına bir PVB (polivinilbütural) tabaka konularak, tabakaların belirli bir sıcaklıkta ve basınç altında yapıştırılmalarıyla elde edilmektedir.

Kırılma sırasında camın dağılmaması veya yabancı cisimlerin geçişine karşı dirençli olması nedeniyle kullanılan tabakalı camlar, şeffaflık ve geçirgenlik özellikleri yönlerinden normal camlardan önemli bir fark taşımamaktadır.

2.2.3.3.3. Polimer Esaslı Tabakalı Kompozit Malzemeler

Çeşitli polimer malzeme katmanlarının bir arada kullanılmasıyla çeşitli kompozit malzemeler üretilmektedir. Cam lifi veya asbest lifi dokumaların silikonlara emdirilmesiyle yüksek sıcaklığa dayanıklı tabakalı kompozitler de elde edilmektedir. Ayrıca cam ve naylon elyaf dokumalar çeşitli reçinelerle tabakalar halinde birleştirilerek, çarpmaya, herhangi bir nesnenin batmasına veya benzer etkilere dirençli, çok hafif kompozitler üretilmektedir. Bu malzemeler çeşitli amaçlı zırh, kalkan ve benzeri elemanların yapımında da kullanılmaktadır.

2.2.3.3.4. Ahşap Tabakalı Kompozit Malzemeler

Ahşap, tabakalı malzeme üretiminde kullanılan en eski malzemelerden biridir. Bilindiği gibi ahşap organik bir malzeme olarak, lifli yapısıyla çeşitli yönlerden gelen mekanik etkilere değişik seviyede direnç göstermekte, genellikle su ve nemden aşırı ölçüde etkilenmektedir. Ayrıca, ahşap malzemeler çoğu kez özel hammaddeler gerektirmedikinden, maliyetleri de düşük olabilmektedir.

2.2.3.3.5. Tabakalı Lifli Kompozit Malzemeler

Tabakalı lifli kompozit malzemelerde, liflerle donatılı kompozit malzeme tabakaları, farklı yönlerde yer alan ve böylelikle çeşitli yönlerde kompozite farklı dayanım özellikleri kazandıran lif donatıyı da içermektedir. Bu tabakalar genelde, lifli kompozit malzeme tabakasının matris malzemesi olan reçineyle veya daha farklı maddeler ve yöntemlerle özel şekillerde bir araya getirilmektedir. Tabakalı liflerle donatılı kompozit malzemeye örnek olarak, deniz tekneleri, çeşitli taşıtların kaporta bölümleri, su tankları, uçakların kanat panelleri ve gövde kısımları gösterilebilir.

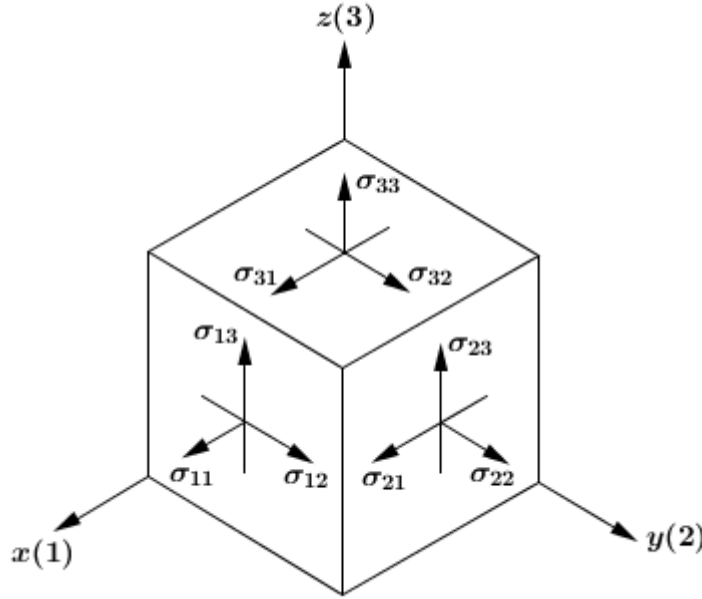
2.2.3.4. Karma (Hibrid) Kompozitler

Birden fazla takviye malzemesi birlikte kullanılır. Bu tip kompozitlere hibrid kompozit denir. Örneğin kevlar tok bir elyaftır ancak basma mukavemeti düşüktür. Grafit ise düşük tokluğa sahip ancak iyi basma mukavemeti olan bir elyaftır. Bu iki elyafın kompozit yapıda bir arada bulunması ile elde edilen hibrid kompozitin tokluğu grafit kompozitten daha iyi aynı zamanda maliyeti daha düşük ve basma mukavemeti de kevlar elyafı kompozitten daha yüksek olmaktadır.

3. KATILARIN ESNEKLİK ÖZELLİKLERİ

Gerilme (σ): Birim alana düşen iç kuvvete gerilme (stress) denir. Cismin belirli bir yüzeyindeki gerilmenin, ‘normal gerilme’ ve ‘kayma gerilmesi’ olmak üzere iki bileşeni vardır. Yüzeye dik olan $\sigma_{x(1)}$, $\sigma_{y(2)}$ ve $\sigma_{z(3)}$ gerilmeleri sırasıyla x, y ve z eksenlerindeki normal gerilmeleri göstermektedir. Yüzeye paralel olan $\sigma_{xy}(\tau_{xy})$, $\sigma_{xz}(\tau_{xz})$; $\sigma_{yx}(\tau_{yx})$, $\sigma_{yz}(\tau_{yz})$ ve $\sigma_{zx}(\tau_{zx})$, $\sigma_{zy}(\tau_{zy})$ gerilmeleri ise sırasıyla yz; xz ve xy düzlemlerindeki kayma gerilmeleri göstermektedir (Tatar, 2011). Şekil-22’ de dik kartezyen koordinat sistemine çizilen üç boyutlu küp üzerinde tüm gerilme bileşenleri gösterilmiştir. Gerilmenin Uluslararası Sistem (SI) de birimi metre kare başına newton (N/m^2) yani pascal (Pa) dır.

Şekil-22: Bir Eleman Üzerinde Gerilmeler



Deformasyon(ϵ): Bir cismin içindeki noktaların izafi olarak yerleri değiştiğinde cisim zorlanmıştır denir. Yani birim yüzeyde meydana gelen şekil değişimine deformasyon (gerinme (strain), zorlanma, şekil değiştirme) denir (Oral, 2011). İki temel geometrik şekil değiştirme mevcuttur. Birincisi başlangıçta düz doğru olan bir uzunluğun belli bir doğrultudaki değişimi olan normal (boylamasına) zorlanma ve diğeri ise verilen bir açının değerindeki değişim olan kayma zorlanmasıdır. Zorlanmış cismin bir parçacığının x(1), y(2) ve z(3) doğrultularındaki yer

değiştirmeleri u , v ve w ile gösterilirse, bu durumda x , y ve z doğrultularındaki ε_{11} , ε_{22} ve ε_{33} normal zorlanmalar ile yz , zx ve xy düzlemlerindeki $\varepsilon_{23}(\gamma_{23})$, $\varepsilon_{31}(\gamma_{31})$ ve $\varepsilon_{12}(\gamma_{12})$ kayma zorlanmaları, küçük Şekil değişimleri için Denklem (3.1) deki Şekilde tanımlanır (Jones, 1998).

$$\begin{aligned} \varepsilon_{11} &= \frac{\partial u}{\partial x} & \varepsilon_{22} &= \frac{\partial v}{\partial y} & \varepsilon_{33} &= \frac{\partial w}{\partial z} \\ \varepsilon_{23} &= \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} & \varepsilon_{31} &= \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} & \varepsilon_{12} &= \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \end{aligned} \quad (3.1)$$

Denklem (3.1) den de görüleceği üzere gerinme boyutsuz olup bir birimi de bulunmaz.

Bu çalışmada; gerilme bileşenlerinin hepsi tek bir σ sembolü ile gösterilmiştir. Normal gerilmeler için σ_{ii} ($i=1, 2, 3$) ve kayma gerilmeleri için σ_{ij} ($i \neq j$; $i, j=1, 2, 3$) yazım Şekli kullanılmıştır. Benzer Şekilde deformasyon (zorlanma) bileşenlerinin hepsi de ε sembolü ile gösterilmiştir ve normal zorlanmalar için ε_{ii} ($i=1, 2, 3$), kayma zorlanmaları içinde ε_{ij} ($i \neq j$; $i, j=1, 2, 3$) yazım Şekli kullanılmıştır.

“Her katı cisim uygulanan kuvvetlerin etkisi altında Şekil değiştirir. Her çeşit gerilmeye karşılık gelen bir zorlanma vardır. Eğer gerilmeler çok büyük değilse, gerilmeler kaldırıldığında zorlanmış cisim başlangıçtaki Şekil ve boyutuna geri döner. Bir cismin zorlanmadan sonra eski haline dönme özelliğine ‘elastikiyet’ denir. Eğer cisim tamamen eski haline geri dönerse bu cisim ‘mkemmek elastik’ olarak adlandırılır. Eğer cisim tamamen eski haline gelmiyorsa, gerilme kaldırıldığında kalan zorlanmaya ‘kalıcı zorlanma’ ve cisim plastik durumdadır denir. Bir cisme kuvvetler tatbik edilir ve bu kuvvetler yavaş yavaş arttırılırsa, deneysel olarak kuvvetlerin belli bir değerine kadar cismin mkemmek elastik olduğu görülür. Bu değere ‘elastik limit’ denir. Elastik limite ulaştıktan sonra malzeme plastik hale geçer ve kalıcı zorlanma oluşur. Elastik deformasyonu esneklik teorisi, plastik deformasyonu plastisite teorisi inceler” (Uyaner, 2008).

3.1. Esneklik Katsayıları

3.1.1. Esneklik (Young) Modülü

Normal gerilmenin normal (boylamasına) zorlanmaya oranına ‘esneklik (elastiklik) modülü’ adı verilir. Esneklik modülü ilk defa Young tarafından takdim edilmiş ve sıklıkla Young modülü olarak söylenmiştir.

Sembolik olarak ifadesi;

$$E_i = \frac{\sigma_{ii}}{\varepsilon_{ii}} \quad (i=1, 2, 3) \quad (3.2)$$

şeklindedir. Esneklik modülünün boyutu kuvvet bölü alan olup SI’ da birimi newton bölü metre kare yani pascal (Pa) dir.

$$1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/ m}^2 \quad (3.3)$$

“Bir malzemenin esneklik modülü ne kadar büyükse rijitliği yani elastik şekil değiştirmeye karşı direnci de o oranda büyüktür. Her malzemeye özgü E değeri herhangi bir ısı veya mekanik işlem yardımıyla değiştirilemez” (Güleç, 1980). Young modülünün değerinin artması, atomlararası 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. “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” (Oral, 2011).

3.1.2. Poisson Oranı

Herhangi bir elastik cisme sadece i- doğrultusunda düzgünce yayılmış σ gerilmesi uygulansın (yani $\sigma_i = \sigma$ diğer bütün gerilmeler sıfır), bu durumda i- doğrultusundaki uzama beraberinde j- doğrultusunda yanıl daralmayı getirir ve j- doğrultusundaki şekil değişiminin (ε_{jj}) negatifinin i- doğrultusundaki şekil

değişimine (ε_{ii}) oranına Poisson oranı (ν_{ij}) denir. Poisson oranı Denklem (3.4) deki gibi gösterilir (Jones, 1998).

$$\nu_{ij} = -\frac{\varepsilon_{jj}}{\varepsilon_{ii}} \quad (i \neq j; i, j=1, 2, 3) \quad (3.4)$$

Denklem (3.4) den görüleceği üzere Poisson oranının bir birimi yoktur.

3.1.3. Kayma (Kesme) Modülü

Hooke kanununa uyan malzemelerde, kayma gerilmesinin kayma zorlanmasına (gerinmesine) oranına kayma (kesme) modülü denir. Kayma modülü G ile gösterilir ve herhangi bir ij düzlemindeki kayma modülü (Güleç, 1980);

$$G_{ij} = \frac{\sigma_{ij}}{\varepsilon_{ij}} \quad (i \neq j; i, j=1, 2, 3) \quad (3.5)$$

şeklinde yazılır. Burulmaya karşı direnci yüksek olan bir katı cisim yüksek bir kayma modülü (G) değeri gösterir. Kayma modülünün boyutu kuvvet bölü alan ve SI' daki birimi pascal (Pa) dır.

3.2. Hooke Kanunu ve Esneklik (Elastik) Sabitleri

“Bir cisme etki eden kuvvet cismin esneklik sınırını aşmayacak büyüklükte ise, cisimde kalıcı bir deformasyona yol açmıyorsa, cisme uygulanan kuvvet oluşan deformasyon ile orantılıdır. Buna Hooke Kanunu adı verilir. Hooke Kanunu aşağıdaki gibi ifade edilir” (İşçi, 1978).

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \cdot \varepsilon_{kl} \quad (i, j, k, l=1, 2, 3) \quad (3.6)$$

Bu denklem, dokuz denklemi ve 81 katsayıyı içerir. Buradaki C_{ijkl} sabitleri esneklik sabitleri olarak bilinir ve dördüncü mertebeden simetrik tensörlerdir. Boyutu birim alan başına kuvvettir ve $\left[\frac{\text{kuvvet}}{\text{uzunluk}^2} \right]$ şeklindedir (Aktaran: Dinçer, 2004).

Denklem (3.6) yı matris şeklinde açık olarak yazalım;

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{32} \\ \sigma_{31} \\ \sigma_{21} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{1111} & C_{1122} & C_{1133} & C_{1123} & C_{1113} & C_{1112} & C_{1132} & C_{1131} & C_{1121} \\ C_{2211} & C_{2222} & C_{2233} & C_{2223} & C_{2213} & C_{2212} & C_{2232} & C_{2231} & C_{2221} \\ C_{3311} & C_{3322} & C_{3333} & C_{3323} & C_{3313} & C_{3312} & C_{3332} & C_{3331} & C_{3321} \\ C_{2311} & C_{2322} & C_{2333} & C_{2323} & C_{2313} & C_{2312} & C_{2332} & C_{2331} & C_{2321} \\ C_{1311} & C_{1322} & C_{1333} & C_{1323} & C_{1313} & C_{1312} & C_{1332} & C_{1331} & C_{1321} \\ C_{1211} & C_{1222} & C_{1233} & C_{1223} & C_{1213} & C_{1212} & C_{1232} & C_{1231} & C_{1221} \\ C_{3211} & C_{3222} & C_{3233} & C_{3223} & C_{3213} & C_{3212} & C_{3232} & C_{3231} & C_{3221} \\ C_{3111} & C_{3122} & C_{3133} & C_{3123} & C_{3113} & C_{3112} & C_{3132} & C_{3131} & C_{3121} \\ C_{2111} & C_{2122} & C_{2133} & C_{2123} & C_{2113} & C_{2112} & C_{2132} & C_{2131} & C_{2121} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{12} \\ \varepsilon_{32} \\ \varepsilon_{31} \\ \varepsilon_{21} \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Cisim dengede olması halinde toplam moment sıfıra eşit olur. Buradan $\sigma_{ij} = \sigma_{ji}$ yazılabilir. Denklem (3.1) de tanımlanan zorlanma tensörlerine bakıldığında bunlarında simetrik olduğu görülür ve $\varepsilon_{kl} = \varepsilon_{lk}$ eşitliği yazılır. Bu iki simetri durumdan dolayı Denklem (3.7) deki rijitlik tensörünün (C_{ijkl}) alttan üç satırı ve sağ taraftan üç sütunu gider ve böylece geriye 36 esneklik sabiti kalır. Böylece Denklem (3.7), Denklem (3.8) e dönüşür.

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{1111} & C_{1122} & C_{1133} & C_{1123} & C_{1113} & C_{1112} \\ C_{2211} & C_{2222} & C_{2233} & C_{2223} & C_{2213} & C_{2212} \\ C_{3311} & C_{3322} & C_{3333} & C_{3323} & C_{3313} & C_{3312} \\ C_{2311} & C_{2322} & C_{2333} & C_{2323} & C_{2313} & C_{2312} \\ C_{1311} & C_{1322} & C_{1333} & C_{1323} & C_{1313} & C_{1312} \\ C_{1211} & C_{1222} & C_{1233} & C_{1223} & C_{1213} & C_{1212} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{12} \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

Voigt notasyonunu kullanarak Denklem (3.8), tensör formundan matris formuna dönüştürülür.

| ij(kl) | I(J) |
|--------|------|
| 11 | 1 |
| 22 | 2 |
| 33 | 3 |
| 23,32 | 4 |
| 13,31 | 5 |
| 12,21 | 6 |

Denklem (3.8) matris formunda daha basit olarak şu şekilde yazılır.

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56} \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

ve Denklem (3.6) bağıntısı;

$$\sigma_i = C_{ij} \cdot \varepsilon_j \quad (i, j=1, 2, \dots, 6) \quad (3.10)$$

şeklinde yazılabilir (Yıldırım, 2007). Bu eşitlikte;

σ_i : Gerilme bileşeni

ε_j : Deformasyon (zorlanma) bileşeni

C_{ij} : Rijitlik matrisi

Enerji esaslarından da yararlanıldığında Denklem (3.9) da görülen C_{ij} matrisinin simetrik olduğu görülür. Sonuç olarak $C_{ij} = C_{ji}$ bağıntısından dolayı, 21 bağımsız elastik sabit kalır.

Anizotropik malzemelerde; yani hiçbir doğrultuda simetri özelliği olmayan malzemelerde gerilme-şekil değiştirme bağıntıları bu 21 sabit ile belirlenir ve bu sabitler deneylerle bulunur. Dolayısıyla bu sabitler belirlendiğinde, keyfi bir doğrultudaki yük deformasyon davranışı belirlenebilir. “Hiçbir simetri düzlemine sahip olmayan bu tür malzemeler ‘triklinik malzeme’ olarak da bilinirler” (Örçen, 2005). Denklem (3.11) de triklinik malzemeler için rijitlik matrisi görülmektedir (Yavuzylmaz, 2007).

$$C_{ij} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{14} & C_{24} & C_{34} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{15} & C_{25} & C_{35} & C_{45} & C_{55} & C_{56} \\ C_{16} & C_{26} & C_{36} & C_{46} & C_{56} & C_{66} \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

3.3. Elastik Simetrinin Temel Halleri

“Bir malzemede genel halde 21 bağımsız elastik sabit olmasına karşın malzemede düzleme ve/veya eksene göre malzeme simetrisi özelliği var ise bağımsız elastik sabitlerin sayısı azalır” (Yıldırım, 2007).

3.3.1. Monoklinik Malzeme

“Malzemede, malzeme özelliklerinin simetrik olduğu bir adet elastik simetri düzlemi varsa bu tür malzemelere ‘monoklinik malzeme’ denir. Monoklinik bir malzemede 13 adet bağımsız elastik sabit bulunmaktadır” (Balcı, 2011). Denklem (3.12) de monoklinik malzemeler için rijitlik matrisi görülmektedir (Örçen, 2005).

$$C_{ij} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & C_{16} \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & C_{26} \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & C_{36} \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & C_{45} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{45} & C_{55} & 0 \\ C_{16} & C_{26} & C_{36} & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

Denklem (3.12) den görüldüğü gibi rijitlik matrisi 20 adet elastik sabit içermektedir, bunların 13’ ü bağımsız elastik sabittir.

3.3.2. Ortotropik Malzeme

Malzemenin; her bir noktasında birbirine dik (ortogonal) üç adet elastik simetri düzlemi mevcut ve bu noktadaki düzlemlerin birbirine paralel olduğu malzemelere ‘ortogonal olarak anizotropik’ veya kısaca ‘ortotropik malzeme’ denir. Yani ortotropik malzemenin birbirine dik üç elastik simetri düzlemi vardır. “Dolayısıyla ortotropik malzemelerde birbirlerine dik doğrultuda üç eksende simetrik malzeme özelliği mevcuttur” (Küçüksucu, 2011).

“Simetri artıkcı rijitlik matrisindeki bağımsız elastik sabit sayısı azalmakta olup, ortotropik bir malzemede 9 adet bağımsız elastik sabit bulunmaktadır” (Tatar, 2011).

“Ortotropik bir malzemenin rijitlik matrisi (C_{ij}) şu şekildedir” (Jones, 1998);

$$C_{ij} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

Ortotropik malzemenin Denklem (3.13) de verilen rijitlik matrisini kullanarak ortotropik bir malzeme için gerilme–deformasyon (gerinme, şekil değiştirme) arasındaki bağıntılar şu şekilde olur;

$$\begin{aligned} \sigma_{11} &= C_{11} \cdot \varepsilon_{11} + C_{12} \cdot \varepsilon_{22} + C_{13} \cdot \varepsilon_{33} \\ \sigma_{22} &= C_{12} \cdot \varepsilon_{11} + C_{22} \cdot \varepsilon_{22} + C_{23} \cdot \varepsilon_{33} \\ \sigma_{33} &= C_{13} \cdot \varepsilon_{11} + C_{23} \cdot \varepsilon_{22} + C_{33} \cdot \varepsilon_{33} \\ \sigma_{23} &= C_{44} \cdot \varepsilon_{23} \\ \sigma_{13} &= C_{55} \cdot \varepsilon_{13} \\ \sigma_{12} &= C_{66} \cdot \varepsilon_{12} \end{aligned} \quad (3.14)$$

Tek yönlü sürekli elyaf takviyeli bir tek kompozit tabaka, kontrplak, çekilmiş polimer filmler ve bazı haddelenmiş metallere ortotropik malzemeye örnek teşkil eder. “(3.14) Denklem sisteminden de görüldüğü gibi ortotropik malzemelerde, anizotropik malzemelerden farklı olarak normal gerilmeler ile kayma deformasyonları (zorlanmaları) ve kayma gerilmeler ile normal deformasyonlar arasında bir etkileşim yoktur” (Örçen, 2005). Yine kayma gerilmelerinin sadece kendi düzlemlerindeki kayma zorlanmaları ile ilgilerinin olduğu, diğer düzlemlerdeki kayma zorlanmaları ile bir münasebetlerinin bulunmadığı görülür. Bu çalışmada kullanılan malzemeler ortotropik karakterde olduğundan bundan sonraki bölümlerde bu tür malzemelerin mekaniksel davranışları incelenecektir.

3.3.3. Enine İzotropik Malzeme

Her noktasından bir asal doğrultu geçen ve bu doğrultuya dik düzlemlerde elastik özelliklerin bütün doğrultularında aynı olduğu malzemelere ‘enine izotropik malzeme’ ya da ‘transtropik malzeme’ denir. “Enine izotropik bir malzemede 5 adet bağımsız elastik sabit bulunmaktadır” (Yıldırım, 2007). İzotropik düzleme dik

doğrultu z eksenini iken x ve y eksenleri bu düzlem içerisinde herhangi bir şekilde olsun, bu durumda enine izotropik bir malzemenin rijitlik matrisi şu şekildedir (Jones, 1998);

$$C_{ij} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{11} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{13} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (C_{11}-C_{12})/2 \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

3.3.4. İzotropik Malzeme

Elastik özellikleri, doğrultudan bağımsız olan malzemelere izotropik malzeme denir. Bir başka tanımla her bir noktasında sonsuz sayıda elastik simetri düzlemi bulunan malzemelerdir. “İzotropik bir malzemede 2 adet bağımsız elastik sabit bulunmaktadır” (Balcı, 2011). Denklem (3.16) da izotropik malzemeler için rijitlik matrisi görülmektedir (Hersat, 2010).

$$C_{ij} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{11} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{12} & C_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & (C_{11}-C_{12})/2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & (C_{11}-C_{12})/2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (C_{11}-C_{12})/2 \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

“İzotropik malzemelerde genellikle elastik sabitler, Lamè sabitleri; λ ve μ ile verilir:

$$C_{11} = \lambda + 2.\mu$$

$$C_{12} = \lambda \quad (3.17)$$

$$(C_{11}-C_{12})/2 = \mu$$

Bu durumda izotropik malzemelerin rijitlik matrisi Denklem (3.18) deki şekli alır” (Hersat, 2010).

$$C_{ij} = \begin{bmatrix} \lambda + 2\mu & \lambda & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda + 2\mu & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda & \lambda + 2\mu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \mu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

Bu simetri sınıfı mümkün olan en yüksek malzeme simetrisine sahiptir. Bu sınıfa giren malzemelere örnek olarak; dökme termosetler ve termoplastik reçineler, dökme metaller, camlar ve parçacık takviyeli polimerler verilebilir.

3.4. Hareket Denklemi ve Çözümleri

“Esnek bir ortamda hareket denklemini bulmak için ortamdaki hacim elamanına etkiyen kuvveti göz önüne almamız gerekir. Üzerine kuvvet etki eden ρ yoğunluğuna sahip bir ortam için Newton’ un ikinci kanununu uygularsak;

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} = \rho \cdot \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} \quad (i, j=1, 2, 3) \quad (3.19)$$

şeklinde yazılır. Burada ρ , cismin yoğunluğu; $u(u_1, u_2, u_3)$ yerdeğiştirme vektörü ve $x(x_1, x_2, x_3)$ ise konum vektörüdür” (İşçi, 1978).

“Denklem (3.19) da Hooke kanunundaki σ_{ij} ifadesi yerine konular ve bazı ara işlemler yapılırsa, düzlem dalga için çözüm” (İşçi ve İlk, 1999);

$$u_i = u_{oi} \cdot \exp[i(w \cdot t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r})] \quad (3.20)$$

olarak bulunur. Burada u_i yerdeğiştirme vektörünün bileşenleri; u_{oi} vektörün maksimum değeri; w , açısal frekans; \mathbf{k} , yayılma veya dalga vektörü [$\mathbf{k} = (2\pi/\lambda) \mathbf{n}$]; \mathbf{r} , yer vektörü; \mathbf{n} , doğrultu kosinüsleri (n_1, n_2, n_3) dir.

3.5. Christoffel Denklemleri

(3.20) denklemi hareket denkleminde yerine yazılırsa,

$$C_{ijkl} \cdot n_j \cdot n_l \cdot u_{ok} = \rho v^2 u_{oi} \quad (3.21)$$

şekline dönüşür.

Burada $L_{ik} = C_{ijkl} \cdot n_j \cdot n_l$ denilirse, bu durumda (3.21) denklemi,

$$(L_{ik} - \rho v^2 \delta_{ik}) u_{ok} = 0 \quad (i, k=1, 2, 3) \quad (3.22)$$

şekline dönüşür. Bu denklemlere Christoffel denklemleri denir ve L_{ik} lar Christoffel sabitleri olarak adlandırılır. Christoffel denklemlerindeki (İşçi ve Palmer, 1977),

$$\delta_{ik} = \begin{cases} 0 & i \neq k \\ 1 & i = k \end{cases} \quad (3.23)$$

ile tanımlıdır.

Christoffel denklemleri açık olarak yazılırsa;

$$\begin{aligned} (L_{11} - \rho v^2) u_{01} + L_{12} u_{02} + L_{13} u_{03} &= 0 \\ L_{21} u_{01} + (L_{22} - \rho v^2) u_{02} + L_{23} u_{03} &= 0 \\ L_{31} u_{01} + L_{32} u_{02} + (L_{33} - \rho v^2) u_{03} &= 0 \end{aligned} \quad (3.24)$$

şeklinde olur. “Bu denklemlerin bir çözümünün olabilmesi için katsayılar determinantının sıfır olması gerekmektedir. Bu determinant ρv^2 ye göre kübik bir denklemdir. Herhangi bir yayılma doğrultusu için üç farklı yayılma hızı vardır. Bu hızlardan her biri Christoffel denklemlerinde yerine konduğunda bir yerdeğiştirme vektörü bulunur. Böylece toplam olarak üç tane birbirine dik yerdeğiştirme vektörü elde edilir. Bu vektörlerden birisi boyuna dalgalara, diğer ikisi ise enine dalgalara karşı gelir. Bazı özel doğrultularda iki enine dalga hızı birbirine eşit olabilir” (İşçi, 1978).

$\vec{u} \times \vec{n} = 0$ ise saf boyuna dalgalar

$\vec{u} \cdot \vec{n} = 0$ ise saf enine dalgalar elde edilir.

3.5.1. Ortotropik Malzemelerde Christoffel Sabitleri ve Hız İfadeleri

Ortotropik malzemede dokuz adet bağımsız esneklik sabit vardır. Ortotropik malzemedeki esneklik sabitleri $C_{11}, C_{22}, C_{33}, C_{44}, C_{55}, C_{66}, C_{12}, C_{13}, C_{23}$ tür. Ortotropik malzemeler için esneklik sabitlerinin matris formu aşağıdaki şekli alır (Jones, 1998):

$$\begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix}$$

Daha önce Christoffel sabitleri bulunmuştur. Şimdi ortotropik bir malzemede Christoffel sabitleri, Voigt notasyonu kullanılarak belirlenirse:

$$L_{11} = C_{1111}n_1n_1 + C_{1112}n_1n_2 + C_{1113}n_1n_3 + C_{1211}n_2n_1 + C_{1212}n_2n_2 + C_{1213}n_2n_3 + C_{1311}n_3n_1 + C_{1312}n_3n_2 + C_{1313}n_3n_3$$

$$L_{11} = C_{11}n_1^2 + C_{16}n_1n_2 + C_{15}n_1n_3 + C_{61}n_2n_1 + C_{66}n_2^2 + C_{65}n_2n_3 + C_{51}n_3n_1 + C_{56}n_3n_2 + C_{55}n_3^2$$

$$L_{11} = C_{11}n_1^2 + C_{66}n_2^2 + C_{55}n_3^2$$

$$L_{22} = C_{2121}n_1n_1 + C_{2122}n_1n_2 + C_{2123}n_1n_3 + C_{2221}n_2n_1 + C_{2222}n_2n_2 + C_{2223}n_2n_3 + C_{2321}n_3n_1 + C_{2322}n_3n_2 + C_{2323}n_3n_3$$

$$L_{22} = C_{66}n_1^2 + C_{62}n_1n_2 + C_{64}n_1n_3 + C_{26}n_2n_1 + C_{22}n_2^2 + C_{24}n_2n_3 + C_{46}n_3n_1 + C_{42}n_3n_2 + C_{44}n_3^2$$

$$L_{22} = C_{66}n_1^2 + C_{22}n_2^2 + C_{44}n_3^2$$

$$L_{33} = C_{3131}n_1n_1 + C_{3132}n_1n_2 + C_{3133}n_1n_3 + C_{3231}n_2n_1 + C_{3232}n_2n_2 + C_{3233}n_2n_3 + C_{3331}n_3n_1 + C_{3332}n_3n_2 + C_{3333}n_3n_3$$

$$L_{33} = C_{55}n_1^2 + C_{54}n_1n_2 + C_{53}n_1n_3 + C_{45}n_2n_1 + C_{44}n_2^2 + C_{43}n_2n_3 + C_{35}n_3n_1 + C_{34}n_3n_2 + C_{33}n_3^2$$

$$L_{33} = C_{55}n_1^2 + C_{44}n_2^2 + C_{33}n_3^2$$

$$L_{12} = C_{1121}n_1n_1 + C_{1122}n_1n_2 + C_{1123}n_1n_3 + C_{1221}n_2n_1 + C_{1222}n_2n_2 + C_{1223}n_2n_3 + C_{1321}n_3n_1 + C_{1322}n_3n_2 + C_{1323}n_3n_3$$

$$L_{12} = C_{16}n_1^2 + C_{12}n_1n_2 + C_{14}n_1n_3 + C_{66}n_2n_1 + C_{62}n_2^2 + C_{64}n_2n_3 + C_{56}n_3n_1 + C_{52}n_3n_2 + C_{54}n_3^2$$

$$L_{12} = (C_{12} + C_{66})n_1n_2$$

$$L_{13} = C_{1131}n_1n_1 + C_{1132}n_1n_2 + C_{1133}n_1n_3 + C_{1231}n_2n_1 + C_{1232}n_2n_2 + C_{1233}n_2n_3 + C_{1331}n_3n_1 + C_{1332}n_3n_2 + C_{1333}n_3n_3$$

$$L_{13} = C_{15}n_1^2 + C_{14}n_1n_2 + C_{13}n_1n_3 + C_{65}n_2n_1 + C_{64}n_2^2 + C_{63}n_2n_3 + C_{55}n_3n_1 + C_{54}n_3n_2 + C_{53}n_3^2$$

$$L_{13} = (C_{13} + C_{55})n_1n_3$$

$$L_{23} = C_{2131}n_1n_1 + C_{2132}n_1n_2 + C_{2133}n_1n_3 + C_{2231}n_2n_1 + C_{2232}n_2n_2 + C_{2233}n_2n_3 + C_{2331}n_3n_1 + C_{2332}n_3n_2 + C_{2333}n_3n_3$$

$$L_{23} = C_{65}n_1^2 + C_{64}n_1n_2 + C_{63}n_1n_3 + C_{25}n_2n_1 + C_{24}n_2^2 + C_{23}n_2n_3 + C_{45}n_3n_1 + C_{44}n_3n_2 + C_{43}n_3^2$$

$$L_{23} = (C_{23} + C_{44})n_2n_3$$

$$L_{12} = L_{21} ; \quad L_{13} = L_{31} ; \quad L_{23} = L_{32} \quad \text{simetrik oldukları görülür.}$$

Ortotropik malzemeler için bulunan Christoffel sabitlerinden yararlanarak yüksek simetri doğrultularında ultrasonik hızlarla esneklik sabitleri arasında bir bağıntı bulmak mümkündür.

A) x-ekseni boyunca yayılma

Bu eksen boyunca yayılma vektörünün doğrultu kosinüsleri:

$$n_1 = 1, \quad n_2 = 0, \quad n_3 = 0$$

Christoffel sabitleri ise;

$$L_{11} = C_{11} \quad L_{12} = 0$$

$$L_{22} = C_{66} \quad L_{13} = 0$$

$$L_{33} = C_{55} \quad L_{23} = 0$$

a.) Boyuna dalgalar için yerdeğiştirme vektörü yayılma doğrultusuna paraleldir:

$$u_{01} = A, \quad u_{02} = 0, \quad u_{03} = 0$$

Bu verileri (3.24) nolu Christoffel denklemlerinde yerine yazarak boyuna dalgalar için denklemlerin çözümü bulunur.

$$(C_{11} - \rho.V^2).A = 0 \quad A \neq 0 \text{ olduğundan}$$

V hız ifadesi V_{11} şeklinde gösterilirse:

$$C_{11} = \rho.V_{11}^2 \quad (3.25)$$

Burada bulunan V_{11} ; x-ekseni boyunca yayılan boyuna dalgaların hızıdır.

b.) y-ekseni boyunca polarize olmuş enine dalgalar için yerdeğiştirme vektörü bileşenleri;

$$u_{01} = 0, \quad u_{02} = A, \quad u_{03} = 0$$

Bu verileri (3.24) nolu Christoffel denklemlerinde yerine yazarak x-ekseni boyunca yayılan y-ekseni boyunca polarize olmuş enine dalgalar için denklemlerin çözümü bulunur.

$$(C_{66} - \rho.V^2).A = 0; \quad A \neq 0 \text{ olduğundan}$$

V hız ifadesi V_{12} şeklinde gösterilirse:

$$C_{66} = \rho.V_{12}^2 \quad (3.26)$$

Burada bulunan V_{12} ; x-ekseni boyunca yayılan y-ekseni boyunca polarize olmuş enine dalga hızıdır.

c.) z-ekseni boyunca polarize olmuş enine dalgalar için yerdeğiştirme vektörü bileşenleri;

$$u_{01} = 0, \quad u_{02} = 0, \quad u_{03} = A$$

Bu verileri (3.24) nolu Christoffel denklemlerinde yerine yazarak x-ekseni boyunca yayılan z-ekseni boyunca polarize olmuş enine dalgalar için denklemlerin çözümü bulunur.

$$(C_{55} - \rho.V^2).A = 0 \quad A \neq 0 \text{ olduğundan}$$

V hız ifadesi V_{13} şeklinde gösterilirse:

$$C_{55} = \rho.V_{13}^2 \quad (3.27)$$

Burada bulunan V_{13} ; x-ekseni boyunca yayılan z-ekseni boyunca polarize olmuş enine dalga hızıdır.

B) y-ekseni boyunca yayılma

Bu eksen boyunca yayılma vektörünün doğrultu kosinüsleri:

$$n_1 = 0, \quad n_2 = 1, \quad n_3 = 0$$

Christoffel sabitleri ise;

$$L_{11} = C_{66} \quad L_{12} = 0$$

$$L_{22} = C_{22} \quad L_{13} = 0$$

$$L_{33} = C_{44} \quad L_{23} = 0$$

a.) Boyuna dalgalar için yerdeğiştirme vektörü yayılma doğrultusuna paraleldir:

$$u_{01} = 0, \quad u_{02} = A, \quad u_{03} = 0$$

Bu verileri (3.24) nolu Christoffel denklemlerinde yerine yazarak boyuna dalgalar için denklemlerin çözümü bulunur.

$$(C_{22} - \rho.V^2).A = 0; \quad A \neq 0 \text{ olduğundan}$$

V hız ifadesi V_{22} şeklinde gösterilirse:

$$C_{22} = \rho.V_{22}^2 \quad (3.28)$$

Burada bulunan V_{22} ; y-ekseni boyunca yayılan boyuna dalgaların hızıdır.

b.) z-ekseni boyunca polarize olmuş enine dalgalar için yerdeğiştirme vektörü bileşenleri;

$$u_{01} = 0, \quad u_{02} = 0, \quad u_{03} = A$$

Bu verileri (3.24) nolu Christoffel denklemlerinde yerine yazarak y-ekseni boyunca yayılan z-ekseni boyunca polarize olmuş enine dalgalar için denklemlerin çözümü bulunur.

$$(C_{44} - \rho.V^2).A = 0; \quad A \neq 0 \text{ olduğundan}$$

V hız ifadesi V_{23} şeklinde gösterilirse:

$$C_{44} = \rho.V_{23}^2 \quad (3.29)$$

Burada bulunan V_{23} ; y-ekseni boyunca yayılan z-ekseni boyunca polarize olmuş enine dalga hızıdır.

c) z-ekseni boyunca yayılma

Bu eksen boyunca yayılma vektörünün doğrultu kosinüsleri:

$$n_1 = 0, \quad n_2 = 0, \quad n_3 = 1$$

Christoffel sabitleri ise;

$$\begin{aligned} L_{11} &= C_{55} & L_{12} &= 0 \\ L_{22} &= C_{44} & L_{13} &= 0 \\ L_{33} &= C_{33} & L_{23} &= 0 \end{aligned}$$

Boyuna dalgalar için yerdeğiştirme vektörü yayılma doğrultusuna paraleldir:

$$u_{01} = 0, \quad u_{02} = 0, \quad u_{03} = A$$

Bu verileri (3.24) nolu Christoffel denklemlerinde yerine yazarak boyuna dalgalar için denklemlerin çözümü bulunur.

$$(C_{33} - \rho.V^2).A = 0; \quad A \neq 0 \text{ olduğundan}$$

V hız ifadesi V_{33} şeklinde gösterilirse:

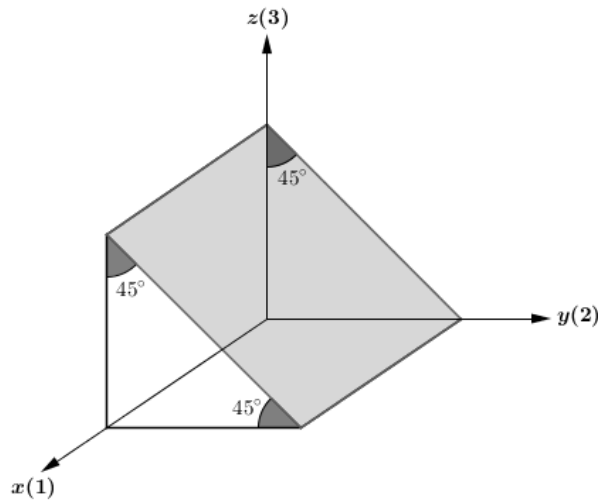
$$C_{33} = \rho.V_{33}^2 \quad (3.30)$$

Burada bulunan V_{33} ; z-ekseni boyunca yayılan boyuna dalgaların hızıdır.

D) Ortotropik malzemenin 45° lik açılarla üç farklı şekilde kesilmesiyle elde edilen düzlemlerde yayılma

a.) Şekil-23' de görüldüğü gibi ortotropik malzemenin y ve z eksenleri ile 45° lik açı yapacak şekilde kesilmesiyle elde edilen düzlemde (z-ekseni ile 45° lik açı yapan bir doğrultu boyunca) yayılma

Şekil-23: y ve z Eksenleri ile 45° Açıyla Kesilen Düzlem



Bu doğrultudaki yayılma için doğrultu kosinüsleri aşağıdaki gibi alınırsa;

$$n_1 = 0, \quad n_2 = \frac{1}{\sqrt{2}}, \quad n_3 = \frac{1}{\sqrt{2}}$$

Christoffel sabitleri ise;

$$L_{11} = \frac{C_{55}}{2} + \frac{C_{66}}{2} \quad L_{12} = 0$$

$$L_{22} = \frac{C_{22}}{2} + \frac{C_{44}}{2} \quad L_{13} = 0$$

$$L_{33} = \frac{C_{33}}{2} + \frac{C_{44}}{2} \quad L_{23} = \frac{C_{23}}{2} + \frac{C_{44}}{2}$$

x-eksenine dik polarize olmuş enine dalgalar için yerdeğiştirme vektörünün bileşenleri;

$$u_{01} = 0, \quad u_{02} = -\frac{A}{\sqrt{2}}, \quad u_{03} = \frac{A}{\sqrt{2}}$$

Bu verileri (3.24) nolu Christoffel denklemlerinde yerine yazarak x-eksenine dik polarize olmuş enine dalgalar için denklemlerin çözümü bulunur.

$$\left(\frac{C_{22}}{2} + \frac{C_{44}}{2} - \rho.V^2 \right) \cdot \left(-\frac{A}{\sqrt{2}} \right) + \left(\frac{C_{23}}{2} + \frac{C_{44}}{2} \right) \cdot \left(\frac{A}{\sqrt{2}} \right) = 0$$

$$\left(\frac{C_{23}}{2} + \frac{C_{44}}{2} \right) \cdot \left(-\frac{A}{\sqrt{2}} \right) + \left(\frac{C_{33}}{2} + \frac{C_{44}}{2} - \rho.V^2 \right) \cdot \left(\frac{A}{\sqrt{2}} \right) = 0$$

Bu denklem sisteminin çözülebilmesi için katsayılar determinantının sıfır olması gerekir.

$$\begin{vmatrix} \left(\frac{C_{22}}{2} + \frac{C_{44}}{2} - \rho.V^2 \right) & \left(\frac{C_{23}}{2} + \frac{C_{44}}{2} \right) \\ \left(\frac{C_{23}}{2} + \frac{C_{44}}{2} \right) & \left(\frac{C_{33}}{2} + \frac{C_{44}}{2} - \rho.V^2 \right) \end{vmatrix} = 0$$

Determinant açılarak sıfıra eşitlenirse;

$$\left(\frac{C_{22}}{2} + \frac{C_{44}}{2} - \rho.V^2 \right) \cdot \left(\frac{C_{33}}{2} + \frac{C_{44}}{2} - \rho.V^2 \right) - \left(\frac{C_{23}}{2} + \frac{C_{44}}{2} \right)^2 = 0$$

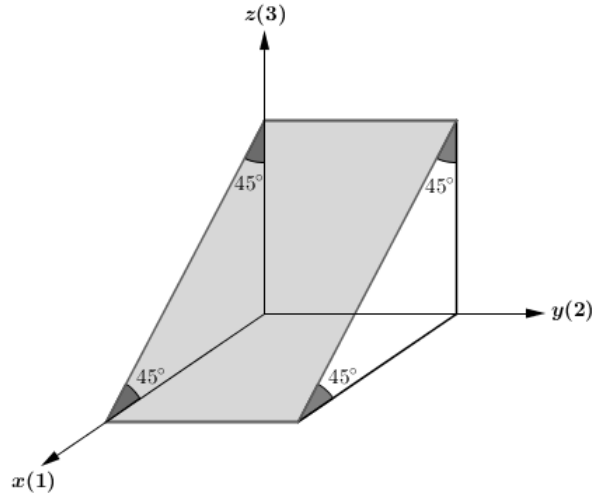
V hız ifadesi V_{s1} şeklinde gösterilir ve buradan C_{23} çekilirse;

$$C_{23} = \sqrt{(C_{22} + C_{44} - 2\rho.V_{s1}^2) \cdot (C_{33} + C_{44} - 2\rho.V_{s1}^2)} - C_{44} \quad (3.31)$$

Burada bulunan V_{s1} ; malzemenin y ve z eksenleri ile 45° lik açı yapacak şekilde kesilmesiyle elde edilen düzlemde yayılan x-eksenine dik polarize olmuş enine dalga hızıdır.

b.) Şekil-24' de görüldüğü gibi ortotropik malzemenin x ve z eksenleri ile 45° lik açı yapacak şekilde kesilmesiyle elde edilen düzlemde (z-ekseni ile 45° lik açı yapan bir doğrultu boyunca) yayılma

Şekil-24: x ve z Eksenleri ile 45° Açıyla Kesilen Düzlem



Bu doğrultudaki yayılma için doğrultu kosinüsleri aşağıdaki gibi alınırsa;

$$n_1 = \frac{1}{\sqrt{2}}, \quad n_2 = 0, \quad n_3 = \frac{1}{\sqrt{2}}$$

Christoffel sabitleri ise;

$$L_{11} = \frac{C_{11}}{2} + \frac{C_{55}}{2} \quad L_{12} = 0$$

$$L_{22} = \frac{C_{44}}{2} + \frac{C_{66}}{2} \quad L_{13} = \frac{C_{13}}{2} + \frac{C_{55}}{2}$$

$$L_{33} = \frac{C_{33}}{2} + \frac{C_{55}}{2} \quad L_{23} = 0$$

y-eksenine dik polarize olmuş enine dalgalar için yerdeğiştirme vektörünün bileşenleri;

$$u_{01} = -\frac{A}{\sqrt{2}}, \quad u_{02} = 0, \quad u_{03} = \frac{A}{\sqrt{2}}$$

Bu verileri (3.24) nolu Christoffel denklemlerinde yerine yazarak y-eksenine dik polarize olmuş enine dalgalar için denklemlerin çözümü bulunur.

$$\left(\frac{C_{11}}{2} + \frac{C_{55}}{2} - \rho.V^2\right) \cdot \left(-\frac{A}{\sqrt{2}}\right) + \left(\frac{C_{13}}{2} + \frac{C_{55}}{2}\right) \cdot \left(\frac{A}{\sqrt{2}}\right) = 0$$

$$\left(\frac{C_{13}}{2} + \frac{C_{55}}{2}\right) \cdot \left(-\frac{A}{\sqrt{2}}\right) + \left(\frac{C_{33}}{2} + \frac{C_{55}}{2} - \rho.V^2\right) \cdot \left(\frac{A}{\sqrt{2}}\right) = 0$$

Bu denklem sisteminin çözülebilmesi için katsayılar determinantının sıfır olması gerekir.

$$\begin{vmatrix} \left(\frac{C_{11}}{2} + \frac{C_{55}}{2} - \rho.V^2\right) & \left(\frac{C_{13}}{2} + \frac{C_{55}}{2}\right) \\ \left(\frac{C_{13}}{2} + \frac{C_{55}}{2}\right) & \left(\frac{C_{33}}{2} + \frac{C_{55}}{2} - \rho.V^2\right) \end{vmatrix} = 0$$

Determinant açılarak sıfıra eşitlenirse;

$$\left(\frac{C_{11}}{2} + \frac{C_{55}}{2} - \rho.V^2\right) \cdot \left(\frac{C_{33}}{2} + \frac{C_{55}}{2} - \rho.V^2\right) - \left(\frac{C_{13}}{2} + \frac{C_{55}}{2}\right)^2 = 0$$

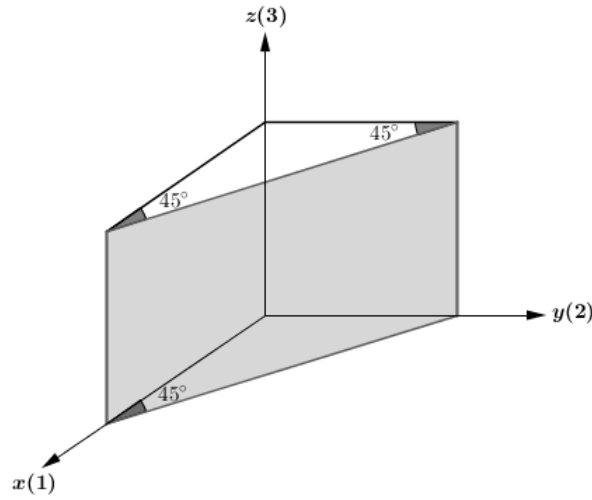
V hız ifadesi V_{s2} şeklinde gösterilir ve buradan C_{13} çekilirse;

$$C_{13} = \sqrt{\left(C_{11} + C_{55} - 2\rho.V_{s2}^2\right) \cdot \left(C_{33} + C_{55} - 2\rho.V_{s2}^2\right)} - C_{55} \quad (3.32)$$

Burada bulunan V_{s2} ; malzemenin x ve z eksenler ile 45^0 lik açı yapacak şekilde kesilmesiyle elde edilen düzlemde yayılan y-eksenine dik polarize olmuş enine dalga hızıdır.

c.) Şekil-25' de görüldüğü gibi ortotropik malzemenin x ve y eksenleri ile 45^0 lik açı yapacak şekilde kesilmesiyle elde edilen düzlemde (x-ekseni ile 45^0 lik açı yapan bir doğrultu boyunca) yayılma

Şekil-25: x ve y Eksenleri ile 45° Açıyla Kesilen Düzlem



Bu doğrultudaki yayılma için doğrultu kosinüsleri aşağıdaki gibi alınırsa;

$$n_1 = \frac{1}{\sqrt{2}}, \quad n_2 = \frac{1}{\sqrt{2}}, \quad n_3 = 0$$

Christoffel sabitleri ise;

$$L_{11} = \frac{C_{11}}{2} + \frac{C_{66}}{2} \quad L_{12} = \frac{C_{12}}{2} + \frac{C_{66}}{2}$$

$$L_{22} = \frac{C_{22}}{2} + \frac{C_{66}}{2} \quad L_{13} = 0$$

$$L_{33} = \frac{C_{44}}{2} + \frac{C_{55}}{2} \quad L_{23} = 0$$

z-eksenine dik polarize olmuş enine dalgalar için yerdeğiştirme vektörünün bileşenleri;

$$u_{01} = \frac{A}{\sqrt{2}}, \quad u_{02} = -\frac{A}{\sqrt{2}}, \quad u_{03} = 0$$

Bu verileri (3.24) nolu Christoffel denklemlerinde yerine yazarak z-eksenine dik polarize olmuş enine dalgalar için denklemlerin çözümü bulunur.

$$\left(\frac{C_{11}}{2} + \frac{C_{66}}{2} - \rho.V^2 \right) \cdot \left(\frac{A}{\sqrt{2}} \right) + \left(\frac{C_{12}}{2} + \frac{C_{66}}{2} \right) \cdot \left(-\frac{A}{\sqrt{2}} \right) = 0$$

$$\left(\frac{C_{12}}{2} + \frac{C_{66}}{2} \right) \cdot \left(\frac{A}{\sqrt{2}} \right) + \left(\frac{C_{22}}{2} + \frac{C_{66}}{2} - \rho.V^2 \right) \cdot \left(-\frac{A}{\sqrt{2}} \right) = 0$$

Bu denklem sisteminin çözülebilmesi için katsayılar determinantının sıfır olması gerekir.

$$\begin{vmatrix} \left(\frac{C_{11}}{2} + \frac{C_{66}}{2} - \rho.V^2 \right) & \left(\frac{C_{12}}{2} + \frac{C_{66}}{2} \right) \\ \left(\frac{C_{12}}{2} + \frac{C_{66}}{2} \right) & \left(\frac{C_{22}}{2} + \frac{C_{66}}{2} - \rho.V^2 \right) \end{vmatrix} = 0$$

Determinant açılarak sıfıra eşitlenirse;

$$\left(\frac{C_{11}}{2} + \frac{C_{66}}{2} - \rho.V^2 \right) \cdot \left(\frac{C_{22}}{2} + \frac{C_{66}}{2} - \rho.V^2 \right) - \left(\frac{C_{12}}{2} + \frac{C_{66}}{2} \right)^2 = 0$$

V hız ifadesi V_{s3} şeklinde gösterilir ve buradan C_{12} çekilirse;

$$C_{12} = \sqrt{\left(C_{11} + C_{66} - 2\rho.V_{s3}^2 \right) \cdot \left(C_{22} + C_{66} - 2\rho.V_{s3}^2 \right)} - C_{66} \quad (3.33)$$

Burada bulunan V_{s3} ; malzemenin x ve y eksenler ile 45^0 lik açı yapacak şekilde kesilmesiyle elde edilen düzlemde yayılan z-eksenine dik polarize olmuş enine dalga hızıdır.

Ortotropik malzemelerde bazı özel doğrultularda ultrases hızı ile esneklik sabitleri arasında Tablo-2' de verilen bağıntılardan ve ultrases hızı ölçümlerinden yararlanarak esneklik sabitleri hesaplanır.

Tablo-2: Ortotropik Malzemelerde Ultrases Hızı ile Esneklik Sabitleri Arasındaki Bağıntılar

| Bağıntı | Açıklama |
|--|---|
| $C_{11} = \rho.V_{11}^2$ | x-ekseni boyunca boyuna dalgalar |
| $C_{66} = \rho.V_{12}^2$ | x-ekseni boyunca enine dalgalar, titreşim y ekseninde |
| $C_{55} = \rho.V_{13}^2$ | x-ekseni boyunca enine dalgalar, titreşim z ekseninde |
| $C_{22} = \rho.V_{22}^2$ | y-ekseni boyunca boyuna dalgalar |
| $C_{44} = \rho.V_{23}^2$ | y-ekseni boyunca enine dalgalar, titreşim z ekseninde |
| $C_{33} = \rho.V_{33}^2$ | z-ekseni boyunca boyuna dalgalar |
| 45 ⁰ lik açılarla kesilmiş olan düzlemlerde yayılan enine dalgalar; | |
| $C_{23} = \sqrt{\left(C_{22} + C_{44} - 2\rho.V_{s1}^2 \right) \cdot \left(C_{33} + C_{44} - 2\rho.V_{s1}^2 \right)} - C_{44}$ | titreşim x-eksenine dik |
| $C_{13} = \sqrt{\left(C_{11} + C_{55} - 2\rho.V_{s2}^2 \right) \cdot \left(C_{33} + C_{55} - 2\rho.V_{s2}^2 \right)} - C_{55}$ | titreşim y-eksenine dik |
| $C_{12} = \sqrt{\left(C_{11} + C_{66} - 2\rho.V_{s3}^2 \right) \cdot \left(C_{22} + C_{66} - 2\rho.V_{s3}^2 \right)} - C_{66}$ | titreşim z-eksenine dik |

Hooke yasasından yola çıkarak ortotropik malzemeler için farklı doğrultularda hız ve esneklik sabitleri arasındaki bağıntılar bulunmuştur. Bu ifadelerde; ρ yoğunluk, V ultrases dalga hızı ve C esneklik sabitini ifade etmektedir.

3.5.2. Ortotropik Malzemelerde Esneklik (Young) Modülleri (E), Poisson Oranları (ν) ve Kayma Modülleri (G)

Dikdörtgenler prizması şeklindeki bir çubuğa eksen boyunca alt-üst yüzeylerine üniform bir kuvvet tatbik edilsin, yan yüzeyler bir kuvvete maruz kalmasın. X eksen cismen eksen boyunca seçilirse, σ_{11} bileşeninden başka gerilim bileşenleri sıfır olur. Bu şartlar altında ortotropik malzemelerin (3.14) deki gerilme-gerinme denklemleri yeniden yazılırsa;

$$\begin{aligned}
 \sigma_{11} &= C_{11} \cdot \varepsilon_{11} + C_{12} \cdot \varepsilon_{22} + C_{13} \cdot \varepsilon_{33} \\
 0 &= C_{12} \cdot \varepsilon_{11} + C_{22} \cdot \varepsilon_{22} + C_{23} \cdot \varepsilon_{33} \\
 0 &= C_{13} \cdot \varepsilon_{11} + C_{23} \cdot \varepsilon_{22} + C_{33} \cdot \varepsilon_{33} \\
 0 &= C_{44} \cdot \varepsilon_{23} \\
 0 &= C_{55} \cdot \varepsilon_{13} \\
 0 &= C_{66} \cdot \varepsilon_{12}
 \end{aligned} \tag{3.34}$$

x-ekseni boyunca Young modülünü (E_1); elastik sabitler cinsinden belirlemek için (3.34) denklem sistemindeki ilk üç denklem ele alınsın. Buradaki ikinci denklem C_{23} ile çarpılıp ve üçüncü denklem de $-C_{22}$ ile çarpılıp sonrada bu iki denklem tarafa toplanırsa;

$$\begin{aligned}
 0 &= (C_{12} \cdot C_{23} - C_{13} \cdot C_{22}) \cdot \varepsilon_{11} + (C_{23}^2 - C_{22} \cdot C_{33}) \cdot \varepsilon_{33} \\
 \varepsilon_{33} &= \frac{C_{12} \cdot C_{23} - C_{13} \cdot C_{22}}{C_{22} \cdot C_{33} - C_{23}^2} \varepsilon_{11}
 \end{aligned} \tag{3.35}$$

denklem (3.35) i, (3.34) denklem sisteminin ikinci denkleminde yerine yazarak

$$\varepsilon_{22} = \frac{C_{13} \cdot C_{23} - C_{12} \cdot C_{33}}{C_{22} \cdot C_{33} - C_{23}^2} \varepsilon_{11} \tag{3.36}$$

bulunur. (3.35) ve (3.36) denklemlerini (3.34) denklem sisteminin birinci denkleminde yerlerine yazarak

$$\sigma_{11} = \frac{C_{11} \cdot C_{22} \cdot C_{33} - C_{11} \cdot C_{23}^2 - C_{22} \cdot C_{13}^2 - C_{33} \cdot C_{12}^2 + 2C_{12} \cdot C_{13} \cdot C_{23}}{C_{22} \cdot C_{33} - C_{23}^2} \varepsilon_{11} \tag{3.37}$$

bulunur.

$$E_1 = \frac{\sigma_{11}}{\varepsilon_{11}} \text{ ve}$$

$$D = C_{11} \cdot C_{22} \cdot C_{33} - C_{11} \cdot C_{23}^2 - C_{22} \cdot C_{13}^2 - C_{33} \cdot C_{12}^2 + 2C_{12} \cdot C_{13} \cdot C_{23} \quad \text{olarak gösterilirse} \quad (3.38)$$

$$E_1 = \frac{D}{C_{22} \cdot C_{33} - C_{23}^2} \quad (3.39)$$

Poisson oranının tanımından hareketle; $\nu_{12} = -\frac{\varepsilon_{22}}{\varepsilon_{11}}$, $\nu_{13} = -\frac{\varepsilon_{33}}{\varepsilon_{11}}$ olarak tanımlanır ve

(3.35) ve (3.36) denklemlerinden yararlanarak;

$$\nu_{12} = \frac{C_{12} \cdot C_{33} - C_{13} \cdot C_{23}}{C_{22} \cdot C_{33} - C_{23}^2} \quad (3.40)$$

$$\nu_{13} = \frac{C_{13} \cdot C_{22} - C_{12} \cdot C_{23}}{C_{22} \cdot C_{33} - C_{23}^2} \quad (3.41)$$

Şimdi de E_2 , ν_{21} ve ν_{23} benzer şekilde belirlensin:

Malzemeye y eksenini boyunca üniform bir kuvvet tatbik edilsin, diğer yüzeyler bir kuvvete maruz kalmayacak. Bu durumda σ_{22} bileşeninden başka gerilim bileşenleri sıfır olur. Bu şartlar altında ortotropik malzemelerin (3.14) deki gerilme-gerinme denklemleri yeniden yazılırsa;

$$\begin{aligned} 0 &= C_{11} \cdot \varepsilon_{11} + C_{12} \cdot \varepsilon_{22} + C_{13} \cdot \varepsilon_{33} \\ \sigma_{22} &= C_{12} \cdot \varepsilon_{11} + C_{22} \cdot \varepsilon_{22} + C_{23} \cdot \varepsilon_{33} \\ 0 &= C_{13} \cdot \varepsilon_{11} + C_{23} \cdot \varepsilon_{22} + C_{33} \cdot \varepsilon_{33} \\ 0 &= C_{44} \cdot \varepsilon_{23} \\ 0 &= C_{55} \cdot \varepsilon_{13} \\ 0 &= C_{66} \cdot \varepsilon_{12} \end{aligned} \quad (3.42)$$

y-eksenini boyunca Young modülünü (E_2); elastik sabitler cinsinden belirlemek için (3.42) denklem sistemindeki ilk üç denklem ele alınsın. Buradaki birinci denklem C_{13} ile çarpılıp ve üçüncü denklem de $-C_{11}$ ile çarpılıp sonrada bu iki denklem tarafına toplanırsa;

$$0 = (C_{12} \cdot C_{13} - C_{11} \cdot C_{23}) \cdot \varepsilon_{22} + (C_{13}^2 - C_{11} \cdot C_{33}) \cdot \varepsilon_{33}$$

$$\varepsilon_{33} = \frac{C_{12} \cdot C_{13} - C_{11} \cdot C_{23}}{C_{11} \cdot C_{33} - C_{13}^2} \varepsilon_{22} \quad (3.43)$$

denklem (3.43) ü, (3.42) denklem sisteminin birinci denkleminde yerine yazarak

$$\varepsilon_{11} = \frac{C_{13} \cdot C_{23} - C_{12} \cdot C_{33}}{C_{11} \cdot C_{33} - C_{13}^2} \varepsilon_{22} \quad (3.44)$$

bulunur. (3.43) ve (3.44) denklemlerini (3.42) denklem sisteminin ikinci denkleminde yerlerine yazarak

$$\sigma_{22} = \frac{C_{11} \cdot C_{22} \cdot C_{33} - C_{11} \cdot C_{23}^2 - C_{22} \cdot C_{13}^2 - C_{33} \cdot C_{12}^2 + 2C_{12} \cdot C_{13} \cdot C_{23}}{C_{11} \cdot C_{33} - C_{13}^2} \varepsilon_{22} \quad (3.45)$$

bulunur.

$$E_2 = \frac{\sigma_{22}}{\varepsilon_{22}} \text{ ve}$$

(3.38) deki D parametresini kullanarak

$$E_2 = \frac{D}{C_{11} \cdot C_{33} - C_{13}^2} \quad (3.46)$$

Poisson oranının tanımından hareketle; $\nu_{21} = -\frac{\varepsilon_{11}}{\varepsilon_{22}}$, $\nu_{23} = -\frac{\varepsilon_{33}}{\varepsilon_{22}}$ olarak tanımlanır ve

(3.43) ve (3.44) denklemlerinden yararlanarak;

$$\nu_{21} = \frac{C_{12} \cdot C_{33} - C_{13} \cdot C_{23}}{C_{11} \cdot C_{33} - C_{13}^2} \quad (3.47)$$

$$\nu_{23} = \frac{C_{11} \cdot C_{23} - C_{12} \cdot C_{13}}{C_{11} \cdot C_{33} - C_{13}^2} \quad (3.48)$$

Şimdi de E_3 , ν_{31} ve ν_{32} benzer şekilde belirlensin:

Malzemeye z-ekseni boyunca üniform bir kuvvet tatbik edilsin; diğer yüzeyler bir kuvvete maruz kalmassın. Bu durumda σ_{33} bileşeninden başka gerilim bileşenleri sıfır olur. Bu şartlar altında ortotropik malzemelerin (3.14) deki gerilme-gerinme denklemleri yeniden yazılırsa;

$$\begin{aligned}
0 &= C_{11} \cdot \varepsilon_{11} + C_{12} \cdot \varepsilon_{22} + C_{13} \cdot \varepsilon_{33} \\
0 &= C_{12} \cdot \varepsilon_{11} + C_{22} \cdot \varepsilon_{22} + C_{23} \cdot \varepsilon_{33} \\
\sigma_{33} &= C_{13} \cdot \varepsilon_{11} + C_{23} \cdot \varepsilon_{22} + C_{33} \cdot \varepsilon_{33} \\
0 &= C_{44} \cdot \varepsilon_{23} \\
0 &= C_{55} \cdot \varepsilon_{13} \\
0 &= C_{66} \cdot \varepsilon_{12}
\end{aligned} \tag{3.49}$$

z-ekseni boyunca Young modülünü (E_3); elastik sabitler cinsinden belirlemek için (3.49) denklem sistemindeki ilk üç denklem ele alınsın. Buradaki birinci denklem C_{12} ile çarpılıp ve ikinci denklem de $-C_{11}$ ile çarpılıp sonrada bu iki denklem taraf tarafa toplanırsa;

$$\begin{aligned}
0 &= (C_{12}^2 - C_{11} \cdot C_{22}) \cdot \varepsilon_{22} + (C_{13} \cdot C_{12} - C_{11} \cdot C_{23}) \cdot \varepsilon_{33} \\
\varepsilon_{22} &= \frac{C_{12} \cdot C_{13} - C_{11} \cdot C_{23}}{C_{11} \cdot C_{22} - C_{12}^2} \varepsilon_{33}
\end{aligned} \tag{3.50}$$

denklem (3.50) yi, (3.49) denklem sisteminin birinci denkleminde yerine yazarak

$$\varepsilon_{11} = \frac{C_{12} \cdot C_{23} - C_{13} \cdot C_{22}}{C_{11} \cdot C_{22} - C_{12}^2} \varepsilon_{33} \tag{3.51}$$

bulunur. (3.50) ve (3.51) denklemlerini (3.49) denklem sisteminin üçüncü denkleminde yerlerine yazarak

$$\sigma_{33} = \frac{C_{11} \cdot C_{22} \cdot C_{33} - C_{11} \cdot C_{23}^2 - C_{22} \cdot C_{13}^2 - C_{33} \cdot C_{12}^2 + 2C_{12} \cdot C_{13} \cdot C_{23}}{C_{11} \cdot C_{22} - C_{12}^2} \varepsilon_{33} \tag{3.52}$$

bulunur.

$$E_3 = \frac{\sigma_{33}}{\varepsilon_{33}} \text{ ve}$$

(3.38) deki D parametresini kullanarak

$$E_3 = \frac{D}{C_{11} \cdot C_{22} - C_{12}^2} \tag{3.53}$$

Poisson oranının tanımından hareketle; $\nu_{31} = -\frac{\varepsilon_{11}}{\varepsilon_{33}}$, $\nu_{32} = -\frac{\varepsilon_{22}}{\varepsilon_{33}}$ olarak tanımlanır ve

(3.50) ve (3.51) denklemlerinden yararlanarak;

$$\nu_{31} = \frac{C_{13} \cdot C_{22} - C_{12} \cdot C_{23}}{C_{11} \cdot C_{22} - C_{12}^2} \tag{3.54}$$

$$v_{32} = \frac{C_{11} \cdot C_{23} - C_{12} \cdot C_{13}}{C_{11} \cdot C_{22} - C_{12}^2} \quad (3.55)$$

$$\text{Kayma modülünün tanımından hareketle; } G_{12} = \frac{\sigma_{12}}{\varepsilon_{12}}, \quad G_{23} = \frac{\sigma_{23}}{\varepsilon_{23}}, \quad G_{13} = \frac{\sigma_{13}}{\varepsilon_{13}}$$

olarak tanımlanır ve (3.14) denklem sisteminin son üç denkleminde yararlanarak;

$$G_{12} = C_{66} \quad (3.56)$$

$$G_{13} = C_{55} \quad (3.57)$$

$$G_{23} = C_{44} \quad (3.58)$$

böylece ortotropik bir malzemenin kayma modülleri de elastik sabitler cinsinden belirlenmiş olur.

Tablo-3: Ortotropik Malzemelerde Esneklik Katsayıları (Mühendislik Sabitleri) ile Esneklik Sabitleri Arasındaki Bağlılıklar

| Esneklik Katsayıları | Bağlılıklar |
|----------------------|---|
| Young Modülleri | $E_1 = \frac{D}{C_{22} \cdot C_{33} - C_{23}^2}, \quad E_2 = \frac{D}{C_{11} \cdot C_{33} - C_{13}^2}, \quad E_3 = \frac{D}{C_{11} \cdot C_{22} - C_{12}^2}$ $D = C_{11} \cdot C_{22} \cdot C_{33} - C_{11} \cdot C_{23}^2 - C_{22} \cdot C_{13}^2 - C_{33} \cdot C_{12}^2 + 2C_{12} \cdot C_{13} \cdot C_{23}$ |
| Poisson Oranları | $v_{12} = \frac{C_{12} \cdot C_{33} - C_{13} \cdot C_{23}}{C_{22} \cdot C_{33} - C_{23}^2}, \quad v_{13} = \frac{C_{13} \cdot C_{22} - C_{12} \cdot C_{23}}{C_{22} \cdot C_{33} - C_{23}^2}, \quad v_{21} = \frac{C_{12} \cdot C_{33} - C_{13} \cdot C_{23}}{C_{11} \cdot C_{33} - C_{13}^2}$ $v_{23} = \frac{C_{11} \cdot C_{23} - C_{12} \cdot C_{13}}{C_{11} \cdot C_{33} - C_{13}^2}, \quad v_{31} = \frac{C_{13} \cdot C_{22} - C_{12} \cdot C_{23}}{C_{11} \cdot C_{22} - C_{12}^2}, \quad v_{32} = \frac{C_{11} \cdot C_{23} - C_{12} \cdot C_{13}}{C_{11} \cdot C_{22} - C_{12}^2}$ |
| Kayma Modülleri | $G_{12} = C_{66}, \quad G_{13} = C_{55}, \quad G_{23} = C_{44}$ |

Tablo-3' den görüldüğü gibi $E_1, E_2, E_3, v_{12}, v_{21}, v_{13}, v_{31}, v_{23}, v_{32}, G_{12}, G_{13}, G_{23}$ değerleri ortotropik bir malzemenin esneklik katsayıları (mühendislik sabitleri) olup, toplam on iki tanedir. Fakat daha önce de belirtildiği gibi rijitlik matrisi (C_{ij}) simetriktir. Benzer bir şekilde rijitlik matrisinin (C_{ij}) tersi olan uyum matrisi de (compliance matrix, S_{ij}) simetriktir.

$$S_{ij} = S_{ji} \quad (3.59)$$

Denklem (3.59) da esneklik katsayıları kullanıldığı takdirde, Denklem (3.60) da verilen eşitlik elde edilir (Jones, 1998).

$$\frac{\nu_{ij}}{E_i} = \frac{\nu_{ji}}{E_j} \quad (i \neq j; i, j=1, 2, 3) \quad (3.60)$$

Dolayısıyla Denklem (3.60) neticesinde ortotropik bir malzemenin sahip olduğu on iki esneklik katsayısının üçü bağımlı hale gelir ve ortotropik bir malzeme için bağımsız esneklik katsayısı (sayısı) dokuz iner.

4. LİTERATÜR İNCELEMESİ

İşçi ve İlk (1999) tarafından yapılan çalışmada, esneklik teorisinin tek kristal sistemlere uygulanmasıyla bulunan esneklik sabitleri ve ultrases hızları arasındaki bağıntılar kullanılarak ses hızının, Young modülünün ve sıkışabilirlik katsayısının, kristal doğrultularına bağlılıkları verilmiştir. Kübik kristallerde bazı özel doğrultularda ultrases hızı ile esneklik sabitleri (C_{ij}) arasındaki bağıntıları, Hooke kanunu ifadesini akustik dalga denkleminde yerine koyarak düzlem dalga için çözdükten sonra Christoffel denklemlerini kullanarak belirlemiştir. Çalışmada, kübik simetriye sahip Nikel (Ni) tek kristali kullanılmıştır. Belirlenen bağıntılar yardımıyla bazı özel doğrultularda Nikel tek kristalinde yapılan ultrases hızı ölçümleri sonucu, kübik kristallerdeki 3 bağımsız esneklik sabiti; C_{11} , C_{12} ve C_{44} hesaplanmıştır. Nümerik hesaplamalarda Mathematica 2.2 paket programı kullanılarak, ultrases hızı ve Young modülü yüzeyle bulunmuş ve sonuçlar grafik olarak çizilmiştir. Hız ölçümlerinden çizilen grafiklerde fiziksel bir özellik olan esneklik, kristal simetri ile aynı simetriyi gösterdiği belirlenmiştir. Young modülü grafiğinden de [111] doğrultusunda en büyük değere sahip olduğu ve Ni gibi kübik kristallerde, atomlar arası bağların bu doğrultuda daha kuvvetli olduğu sonucuna varmışlardır (İşçi ve İlk, 1999).

Marques ve Williams (1986) tarafından yapılan çalışmada, tek yönlü cam elyaf epoksi kompozitlerin rijitlik matrisinin elastik sabitlerini ultrasonik yöntemle belirlemiştir. Kompozit numuneler içine gönderilen dalgalar piezoseramik transduserler tarafından üretilmiştir. Doğrudan iletim yoluyla boyuna ve enine dalgaların hızları ölçülerek tek yönlü cam elyaf epoksi kompozitin elastik sabitleri belirlenmiştir. Hızları hesaplamada geometrik uzunluklardan ve dalgaların bu uzunlukları geçiş sürelerinden yararlanılmışlardır. Çalışmada, enine izotropik ortam modelindeki ultrasonik hızlar ve elastik sabitleri arasındaki bağıntıları kabul etmişlerdir. Hız değerlerini rijitlik matrisinin elastik sabitlerini, elastik modül ve Poisson oranlarını hesaplamada kullanmışlardır ve bulunmuş değerler esnek bir şekilde uyumlu çıkmıştır. Ölçülen hızlar, cam elyaf epoksi malzemenin 0.28 ve 2.0 MHz frekans aralığı için dağıtıcı olmadığını göstermiştir. Tabakalı ortam teorisinin sonuçlarıyla deneysel sonuçların mukayesesi boyuna dalgaların hız değerleri için

kabul edilebilir bir uyum göstermiştir. Enine dalgalar için, deneysel ve teorik değerlerin bazıları arasında yüzdelik farklılık büyük bulunmuştur (Marques ve Williams, 1986).

Spurlock (2006) tarafından yapılan çalışmada, ultrasonik dalga hız ölçümlerinden yararlanarak seramik matrisli kompozitlerde hasar ve elastik sabitlerin belirlenmesi amaçlanmıştır. Kompozitlerin hasar ve elastik sabitlerinin hesabı için MATLAB programları geliştirilmiştir. Programlar, ultrasonik dalga hız ölçümlerinden elde edilen veriden ortotropik simetrik malzemeler için hasar büyüklüğü ve elastik rijitliği değerlendirmek için tasarlanmıştır. Christoffel denklemi sayesinde ultrasonik dalga hızları ile elastik sabitler arasında bağlantı kurulmuştur. Anizotropik ortamın elastik sabitlerini belirlemede yaygın olarak daldırma ultrasonik dalga hız ölçüm metodu kullanılmıştır. Malzemenin gerilmeleri ve gerinmeleri arasında bağlantıyı kuran elastik rijitlik matrisi, C, üç metot kullanılarak elde edilmiştir: Christoffel denkleminin en küçük karelerinin minimizasyonu, Christoffel denkleminin çözümü ve deneysel hızlar arasındaki sapmaların kareleri toplamının minimizasyonu, ve dördüncü mertebeden tansörler için eksen denkleminin rotasyonu. Üç MATLAB programı, tek eksenli gerilmeye maruz kalan ortotropik kompozit bir malzemenin dokuz elastik sabitin tamamının hesaplanabilmesi için yazılmıştır. Her bir programdan hesaplanan elastik sabitler aynı bulunmuştur ve bir ortotropik malzeme için dokuz elastik sabitin programlardan tam olarak belirlenebileceği görülmüştür (Spurlock, 2006).

Matikas ve Karpur (1993), metal matrisli kompozitlerde fiber-matris arayüzey karakterizasyonunu ultrasonik yansıma tekniğiyle incelemişlerdir. Çalışmada homojen izotrop matris içerisine gömülmüş olan silindirik şeklindeki fiberler tarafından yansıtılan bir ultrasonik düzlem dalga modellenmiştir. Modelde fiber ve matrisin özelliklerini, ultrases dalga boyunu, geliş açısını ve fiber-matris arasındaki elastik davranışı karakterize eden “kayma rijitlik katsayısı” adlı bir katsayıyı hesabın içine alarak “geri yansıma” katsayısını hesaplamışlardır. Geliş açısı ve sorgulama frekansı gibi en uygun deneysel parametreler, modeli tarif etmek için kullanılmıştır. Enine dalga geri yansıma katsayısı sorgulanarak kompozitlerde “arayüzey rijitlik” karakterizasyonunun belirleneceği saptanmıştır. Geliştirilen teori ve elde edilen

sonuçların bazısının ise seramik matrisli fiber takviyeli kompozitler için de aynı şekilde uygulanabileceği belirtilmiştir (Matikas ve Karpur, 1993).

Grimberg ve arkadaşları (2010) yaptıkları çalışmada, ultrasonik metotlar kullanarak karbon fiber takviyeli plastiğin mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Karbon fiber takviyeli plastik yapıların iki fazlı doğasında olası bozulmalar sadece fiberin ve matrisin özelliklerine bağlı değil, bundan başka arayüzeylerin ve aratabakaların özelliklerine bağlılığı belirtilmiştir. Düzleme dik doğrultuda ultrasonik muayene metodları kullanılarak yani basınç ve enine dalgaların yayılma hızlarının belirlenmesiyle, E_3 Young modülü ile G_{13} veya G_{23} kayma modüllerini belirlemişlerdir. Hertzian kontakları tarafından oluşturulmuş Lamb dalgaları kullanılarak da fiberler düzlemindeki mekanik özellikler belirlenmiştir. Lamb dalgaların yayılma hızlarının belirlenmesiyle E_1 ve E_2 nin değerleri sırasıyla 45.2 GPa ve 43.5 GPa bulunmuştur. Elde edilen değerler, elektromanyetik testler ve Dinamik Mekanik Analiz (DMA) kullanılarak belirlenen değerlerle mükemmel uyum gösterdiğini belirlemişlerdir. DMA ya da statik testler tarafından belirlenemeyen fakat sadece basınç ve enine dalgaların yayılma hızının ölçülmesiyle belirlenmiş E_3 ün değeri 11.36 GPa bulunmuştur. Bu modülün, malzemenin derin anizotropik karakteristik yapısından dolayı karbon fiberler düzleminde belirlenen modüllerden farklı çıktığını söylemişlerdir. Sonuç olarak bir dizi aşamalı transduser, ekipman ve C-tarama ultrason kullanarak düşük enerji etkisi ve gözeneklilik tarafından oluşturulan delaminasyonu algılamak ve değerlendirmek mümkündür (Grimberg vd., 2010).

Dahmen ve arkadaşları (2008) yaptıkları çalışmada, havadan kaplama (air coupled) ultrasonik hacimsel dalgalar kullanarak zeytin ağacından yapılmış anizotropik tabakaların elastik sabitlerini ölçmüşlerdir. Birçok yapısal uygulamalarda yaygın olarak kullanılmış anizotropik malzemelerin elastik rijitlik matrisinin tamamını bilmenin, ağır yükleme koşulları altındaki malzemelerin mekanik davranışlarını değerlendirmek ve biçimlendirmek için gerekli olduğunu belirtmişlerdir. Ultrasonik teknikler, bu tür malzemelerin elastik sabitlerinin tamamını tahribatsız ölçmek için her halükarda yeterli hale getirilmiştir. Havadan kaplama transduserlerin tabakalarda yeterince verimli Lamb dalgaları ürettiği ve yayılımdan sonra onları algıladığı daha önce ortaya konulmuştur. Zeytin kerestesinin

anizotropik elastik sabitleri, ortotropik bir katı cisim gibi düşünölmüş, ultrasonik hacimsel dalga ve Lamb dalgasının bir kombinasyonu kullanılarak belirlenmiştir. Birçok modun Lamb dalga hızları, havadan kaplama tek taraflı sistem kullanılarak ölçölmüştür. Bu ölçömleri, malzemenin dokuz elastik sabitinden yedisini elde etmek üzere ters algoritmayla bir araya getirmişlerdir. Geriye kalan bilinmeyen iki elastik sabit C_{44} ve C_{23} , ölçölen ultrasonik hacimsel dalga hızını kullanarak bulmuşlardır. Bu çalışmanın sonuçlarına göre zeytin kerestesinin tek yönlü doğası iyileştirilmiştir (Dahmen vd., 2008).

Dinçer (2004), yaptığı çalışmada; hegzagonal kristallerde esneklik teorisi kullanılarak hız, Young modöülü ve sıkışabilirliğin kristal doğrultularına bağlı olarak nasıl değiştii bulunmuştur. Bunun için Newton' un ikinci kanunu ve Hooke kanunundan yararlanarak elde edilen Christoffel denklemleri hegzagonal sistemlerde çözümlenerek, hegzagonal sistemlerdeki yüksek simetri doğrultularında esneklik sabitleri (C_{11} , C_{12} , C_{13} , C_{33} ve C_{44}) ile ultrasonik hızlar arasında bir bağıntı bulunmuştur. Çalışmada örnek olarak daha önceden esneklik sabitleri (C_{ij}) ve yoğunlukları bilinen hegzagonal yapıya sahip Dy, Mg, Zn, Cd ve Grafit kristalleri için, Mathematica 4.0 paket bilgisayar programıyla 5^0 aralıklarla hız, Young modöülü ve sıkışabilirlik ile compliances sabitleri (S_{ij}) hesaplanmıştır. Ayrıca bulunan bağıntılar ve bilinen esneklik sabitleri aracılığıyla Dy, Zn, Mg ve Grafit için ultrasonik ses hızı hesapları yapılarak program yardımıyla ilgili grafikler çizilmiştir. Basal düzlem içindeki her doğrultuda hegzagonal yapıdaki kristallerin hız ve Young modöülü değerlerinin aynı olduğu, doğrultuya bağlı olmadığı görölmüştür (Dinçer, 2004).

Stanciu ve Curtu (2011) yaptıkları bir çalışmada, ultrasonik yöntemler kullanarak cam fiber/epoksi reçine kompozit malzemelerin absorpsiyon katsayısını belirlemeyi amaçlamışlardır. Günümüzde kompozitin farklı sektörlerde birçok kullanımı nedeniyle; kompozit malzemelerin fiziksel, mekanik/dinamik ve akustik özelliklerini bilmenin önemli ve ihtiyaçlara uygun olarak özelliklerin bazılarını geliştirmenin gerekli olduğu belirtilmiştir. Cam fiber/epoksi reçine kompozitlerin ses absorpsiyon katsayısına ilişkin deneysel sonuçlar ortaya koyan bu çalışma, ultrasonik yöntem kullanarak katı ortamda elastik dalga absorpsiyonuna dayandırılmıştır. Kompozit yapılarla uyum içinde dört türde sınıflandırılmış dikdörtgen düzlem tabakalar incelenmiştir. Kullanılan yöntem sayesinde kompozit yapıda bozulma

olmadan tabakaların anizotropisi araştırılmıştır. Akustik zayıflama katsayısının kompozitin yapısından, tabakaların kalınlığından, kompoziti elde etmede kullanılmış basınçtan ve imalat sürecinden doğrudan etkilendiği tespit edilmiştir (Stanciu ve Curtu, 2011).

Adamowski ve arkadaşları (2008), kompozit malzemelerin elastik sabitlerinin iletim yoluyla belirlenmesinde geniş diyaframlı (aperture) bir ultrasonik alıcının kullanımını incelemiştir. Fiber takviyeli kompozitlerde açılı demet hız ölçümünde geniş diyaframlı bir Poliviniliden Flüorür (PVDF) alıcının kullanımıyla, sınırlı boyutta ultrasonik transduserler kullanılırken ortaya çıkan ışın (sinyal, demet) kırınım etkisinin önlenmesi belirtilmiştir. Kırınım etkisi incelendiğinde, 1 MHz lik bir çift transduser kullanılırken alüminyum bir tabakada boyuna hızda %1 den fazla artış görülmüş, geniş diyaframlı alıcı kullanılırken bu etki kaybolmuş ve 10 MHz lik bir çift transduser kullanılırken ise etkinin ihmal edilebileceği belirtilmiştir. Diğer taraftan, 1 MHz den 10 MHz e kadar; akrilik tabakada boyuna hızda %0.7 artış ve 2.115 mm kalınlıklı bir karbon fiber takviyeli plastik tabakada ise %0.8 den fazla artışı belirlemiştir. Hız ölçümlerinde kırınım etkisinin deneysel sonuçları; düşük zayıflamalı bir malzemede, 19 mm çaplı 1 MHz li bir çift transduserde yaklaşık %1 hata görülürken, geniş diyaframlı PVDF alıcılı ölçümlerde ise kırınım etkisinde bir azalma tespit edilmiştir. Geniş diyaframlı PVDF alıcıyla elastik sabit ölçümünün sonuçları, çekme testiyle iyi bir uyum göstermiştir (Adamowski vd., 2008).

Zhu ve arkadaşları (1998), tarafından yapılan bir çalışmada, ultrasonik ve rezonans tekniklerini kullanarak piezoelektrik malzemelerin karakterizasyonunu araştırmışlardır. Piezoelektrik malzemenin kutuplanma derecesi numune geometrisine bağlılığından dolayı rezonans tekniğiyle bazı düşük simetrik sistemlerin fiziksel özelliklerini belirlemenin zor olduğu belirtilmiştir. Ultrasonik metotla, belli simetriye sahip malzemelerin elastik, piezoelektrik ve dielektrik sabitlerin komple takımının bir kısmı, saf modların faz hızlarından direkt olarak ölçülmüştür, ölçülemeyenler ise Christoffel denklemi çözümüyle elde edilmiştir. Bazı sabitlerde ise fazladan bir boyuna titreştirici (vibratör) ölçümlere yardımcı olarak kullanıldığında hesaplamaların kolaylaştığını ve nihai sonuçların doğruluğunun arttığını bulmuşlardır. Temel malzeme sabitinin komple bir seti rezonans tekniği ile yardımcı ultrasonik tekniği kullanımıyla kesin olarak bir PZT-

5H piezoelektrik seramik için tespit edilmiştir. Karma metot kullanarak elde edilen verilerin IEEE rezonans metodu tarafından elde edilen veriyle uyumlu olduğu görülmüştür. Bu metodun 4mm ve 3mm simetri nokta grubu ile piezoelektrik kristallere genişletilebileceği önerilmiştir (Zhu vd., 1998).

Mistou ve arkadaşları (1999) yaptıkları çalışmada, çekme testi ve ultrason ölçümü ile belirlenen cam fiber kompozit malzemelerin elastik özellikleri, karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Tek yönlü cam fiber polyester kompozitin elastik özellikleri yarı statik testler kullanarak ve iki ultrasonik metot; doğrudan temas eden tahribatlı pek çok örnekten birini kullanarak ve daldırma yönteminde yayılma yönü değişen tahribatsız örnekten biri kullanılarak incelenmiştir. Çekme testlerine dayalı yarı statik metot ortotropik sayılan malzemenin bütün elastik sabitlerinin belirlenmesine izin vermemiştir. Numune ile transduserler arasındaki kuplajın seçiminin kompozit malzemeler için çok daha önemli olduğu belirtilmiştir. Elle temasla yapılan tahribatsız bir muayenede, kuplaj sıvısının kalınlığı sabit değilse iletilen enerjide önemli değişiklik olacağı ve böylece mekanik özellikler ve hızlar üzerinde oldukça farklı sonuçlara yol açacağı belirtilmiştir. Ultrasonik dalgalar tarafından tahribatsız değerlendirmenin bir parçası olarak geliştirilen dinamik karakterli metotla, çekme testleri tarafından statik karakterli metot karşılaştırıldığında elde edilen sonuçların doğruluğu ortaya konulmuştur. Sonuçta, kullanılan yöntemlerden elde edilen elastik sabitlerin iyi bir uyum gösterdiği, ultrasonik dalgaların kullanımının güvenilir sonuçlar vereceği belirlenmiştir (Mistou vd., 1999).

Pithioux ve arkadaşları (2002) yaptıkları çalışmada, ultrasonik metotla kortikal kemiğin anizotropik elastik özelliklerini yapay bir ortamda belirlemeyi amaçlamışlardır. Kemiğin mekanik davranışını analiz etmek için elastik özellikleri araştırılmıştır. Ultrasonik metotların temel ilkeleri, biyomedikal mühendisliği alanında değişen izotropik ortam için belirlenmiştir ancak anizotropik ortamda dalga yayılımının karmaşık yapısından dolayı bu tür malzemelere uygulanmasında az bir ilerleme sağlanmıştır. Bir katı cisimde keyfi yönelimler boyunca dalgaların yayılım hızı, malzemenin elastik modülü ile ilişkili olduğundan çalışmada elastik dalgalar teorisi esas alınmıştır. Heterojen yapının analizi için orjinal, pürüzlü bir kemik hazırlanarak numune üzerinde farklı noktalarda hız ölçümleri yapılmıştır. Yani ultrasonik metotla, kompakt kemiklerin radyal (fiber yönüne dik) ve boyuna (fiber

yönünde) yönlerde, boyuna ve enine hız (C_B ve C_E) ölçümleri yapılmıştır. Enine izotropik ya da ortotropik gibi kompakt kemik de hız ölçümü dikkate alınarak Young modülü E ve Poisson oranı ν elde edilmiştir. Sonuçların, diğer metotların sonuçlarıyla uyum içinde olduğu belirlenmiştir (Pithioux vd., 2002).

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 hem de 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 vd., 2002).

5. MATERYAL VE METOT

5.1. Kullanılan Malzemeler

Yapılan çalışmada; İzoreel Kompozit İzole Malzemeler San. ve Tic. Ltd. Şti.' den temin edilen E-cam elyaf takviyeli epoksi kompozit plaka (500×500×12,5mm) ve karbon elyaf takviyeli epoksi kompozit plaka (500×500×12,5mm) kullanılmıştır. Temin edilen her iki malzemedeki elyaf yönelimi $0^0 / 90^0$ olup, ortotropik malzemelerdir. E-cam epoksi kompozit için 50 tabaka ve karbon epoksi kompozit plaka için de 49 adet tabaka kullanılmıştır. Her iki malzeme de matris malzemesi olarak kullanılan epoksi reçine sistemi; iki yapay reçinenin karışımı sonucu elde edilmiştir (Bakalit EPR840' dan 100 birim, Bakalit EPH875' den 80 birim). Epoksi reçine ile takviye malzemesi olarak kullanılan Şişecam Cam Elyaf Sanayii A. Ş. tarafından üretilen E-cam elyaf ve Aksa Karbon Elyaf Sanayii A. Ş. tarafından üretilen karbon 12K elyafının roving olarak özellikleri Tablo-4' de verilmiştir.

Tablo-4: Epoksi Reçine ve Elyafalara Ait Özellikler

| Özellikler | Epoksi reçine | E-cam elyaf | Karbon 12K elyaf |
|---------------------------------|---------------|-------------|------------------|
| Çekme Mukavemeti (MPa) | 70-80 | 2400 | 4200 |
| Esneklik Modülü (GPa) | 3,5 | 73 | 240 |
| Uzama (%) | 3-5 | 4-5 | |
| Yoğunluk (gr/ cm ³) | 1,1 | | |

Prosesin tarifi: Epoksi reçine sistemi için 100-80 oranında karışım yapıldıktan sonra yaklaşık 70^0C ye kadar ısıtılmış. Adetleri belirtilmiş takviye malzemelerine rulo ile reçine uygulanmış ve üst üste istiflenmiştir. İstenilen tabaka sayısı oluştuktan sonra malzeme sıcak pres altına konulmuş ve yaklaşık 0.3 MPa basınç altında sıkıştırılmıştır. Daha sonrada 120^0C ' de 4 saat preste tutularak kürlendirilmiştir.

5.2. 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)

2,25 MHz Enine prob (V154- Panametrics Olympus NDT, ABD)

Mikrometre (Somet, Çekoslovakya)

Elektronik Terazi (Radwag AS220/C/2, Polonya)

Yoğunluk kiti (Radwag 220, Polonya)

Sıcaklık kontrollü su banyosu

Enine dalgalar için kuplaj sıvısı (SWC, Olympus NDT, ABD)

Boyuna dalgalar için kuplaj sıvısı (BQ, Olympus NDT, ABD)

Deneylerde bu malzemeler kullanılmıştır.

5.3. Malzemelerin Analizi

5.3.1. Yoğunluk Tayini

Malzemelerin yoğunluk ölçümleri Necmettin Erbakan Üniversitesi A. K. Eğitim Fakültesi Fizik Eğitimi Anabilim Dalı Ultrases ve Uygulamaları laboratuvarına ait Şekil-26' da görülen Radwag Analitik Terazi ve Yoğunluk kiti kullanılarak oda sıcaklığında yapılmıştır. Yoğunlukların ölçülmesi Archimedes prensibine göre yapılmış bu nedenle daldırma sıvısı olarak destile su kullanılmıştır. Yoğunluk ölçümü için öncelikle E-cam/epoksi ve karbon/epoksi kompozitlerden 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-26: Radwag Analitik Terazi ve Yoğunluk Kiti



5.3.2. Ultrasonik Hız Ölçümü

Her iki malzemeye ait ultrasonik hız ölçümleri Necmettin Erbakan Üniversitesi Ahmet Keleşoğlu Eğitim Fakültesi Fizik Eğitimi Anabilim Dalı Ultrases ve Uygulamaları laboratuvarında yapılmıştır. “Malzemenin iç yapısından etkilenecek malzeme içerisinde ilerleyen ultrases dalgasının saçılması tanecik boyutu ile ilişkilendirilebilmektedir” (Hirsekor, 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” (Oral, 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 hesaplanmasına da 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” (Oral, 2011).

Öncelikle her iki numunede de 0,25-20 MHz aralığındaki frekanslara sahip problar aracılığıyla ardışık arka cidar yankı pikleri gözlemlendi. Bu gözlemler sonucunda; E-cam elyaf takviyeli epoksi kompozit ve karbon elyaf takviyeli epoksi kompozitin enine ultrases dalga hızlarının ölçülmesinde 2,25 MHz’ lik frekans ile ölçümün en iyi pikleri verdiği ve boyuna ultrases dalga hızlarının ölçülmesinde de 5 MHz’ lik frekans ile ölçümün en iyi pikleri verdiği tespit edildi. Bu nedenle her iki malzemede enine ultrases dalga hızlarının ölçülmesinde 2,25 MHz’ lik enine prob (V154- Panametrics Olympus NDT, ABD) ve boyuna ultrases dalga hızlarının ölçülmesinde de 5 MHz’ lik boyuna prob (V109- Panametrics Olympus NDT, ABD) kullanılmıştır (Şekil-27).

Şekil-27: Hız Ölçümlerinde Kullanılan Problar

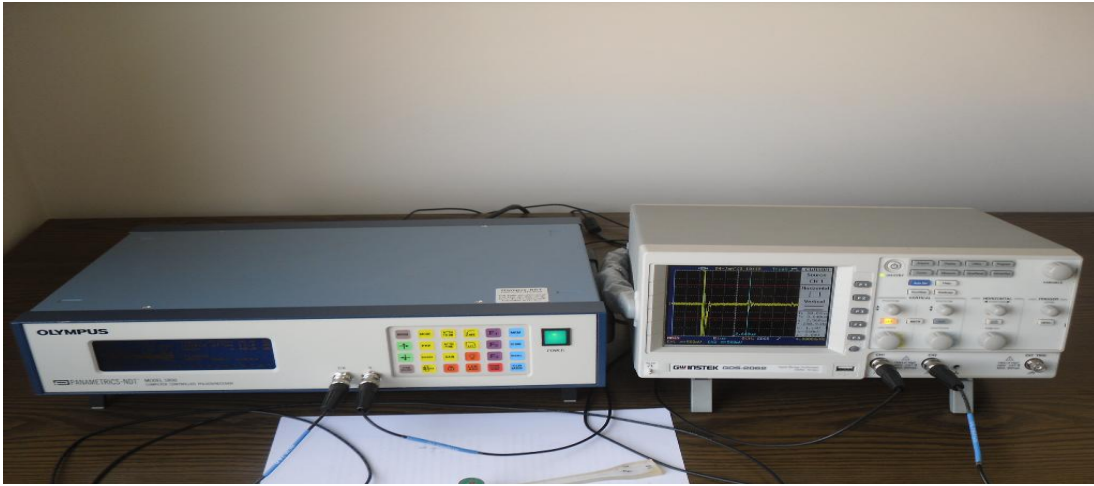


Hız ölçümlerinin tamamında darbe-yankı yöntemi kullanılmıştır. “Darbe-yankı yöntemi en çok kullanılan yöntem olup, prensibi prob tarafından gönderilen ses dalgalarının malzeme içinde bir süreksizliğe çarptıktan sonra tekrar proba yansımaları ve algılanması esasına dayanır” (Mutlu, 2006). Bu çalışmada doğrudan temas tekniği ile ultrasonik hız ölçümü yapılmıştır. Bu tip testte, prob malzeme ile doğrudan temas halindedir. Ultrasesin probtan malzemeye geçişini kolaylaştırmak için malzeme ile prob arasına bir sıvı (gliserin, gres yağı, gaz yağı, duvar kağıdı macunu, ılık ağda, bal ve özel jeller) sürülür. Bu kullanılan sıvılara kuplaj sıvısı denmektedir. Bunların probtan malzemeye ultrases enerjisini geçirme oranları en fazla %10-15’ dir. En iyi

kuplaj sıvısı %15 civarında ultrases enerjisi geçirim oranına sahip olan gliserindir. Kullanılan bu sıvıların malzemeye ve problara zarar vermemesi gerekir (Hellier, 2001).

Malzemelerde boyuna ve enine ultrases dalgalarının hızı için öncelikle aşağıda Şekil-28’ de görülen düzenek kurulmuştur.

Şekil-28: 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) ile 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) μ s 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-29, a-b).

Şekil-29: Hız Ölçümlerinde Kullanılan Kuplaj Sıvıları a) Boyuna Ultrases Dalga Hızlarının Ölçülmesinde Kullanılan Kuplaj Sıvısı, b) Enine Ultrases Dalga Hızlarının Ölçülmesinde Kullanılan Kuplaj Sıvısı ve Sürme Aparatı



(a)



(b)

Bütün malzemelerin kalınlıkları Şekil-30’ da görülen 0,01 mm hassaslıktaki mikrometre (Somet, Çekoslovakya) yardımıyla 10’ ar kez ölçülmüş ve ortalama kalınlıkları (d) tespit edilmiştir.

Şekil-30: Numunelerin Kalınlık Ölçümlerinde Kullanılan Mikrometre



Malzemelerin kalınlıkları, boyuna ve enine dalgaların malzemelerden geçiş süreleri tespit edildikten sonra aşağıdaki Denklem 5.1’ de yerine konularak ultrasonik boyuna dalga hızları, enine dalga hızları m/s biriminden ortalama %0,04 hassaslıkla hesaplanmıştır.

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

Katı bir cismin esneklik sabitleri, ultrasonik dalgaların hızları ve cismin yoğunluğu ölçülerek elde edilebilir. “Bu esneklik sabitleri bağlanma kuvvetleri ile ilişkilidir; atomlararası bağlanma enerjisinin gerinmeye göre ikinci türevini karakterize eder ve cisim ile ilgili birçok fiziksel nicelikle (mekanik dayanıklılık, ısıl genişleme, öz ısı, Debye sıcaklığı, faz geçişleri vb.) bağlantılıdır” (Oral, 2011).

Her iki malzemenin yoğunluğu, her üç doğrultudaki boyuna ve enine ultrases dalga hızları ile üç farklı 45^0 lik açı ile kesimden ölçülen enine ultrases dalga hızları belirlendikten sonra Tablo-2 yardımıyla ortotropik malzemenin dokuz bağımsız elastik (esneklik) sabiti belirlenmiştir. Daha sonra da Tablo-3 yardımıyla, daha önce belirlenen elastik sabitler kullanılarak üç adet Young modülü (E_1 , E_2 , E_3); altı adet Poisson oranı (ν_{12} , ν_{13} , ν_{21} , ν_{23} , ν_{31} , ν_{32}) ve üç adet de Kayma modülü (G_{12} , G_{13} , G_{23}) hesaplanmıştır.

6. DENEYSEL BULGULAR

Bu bölümde; incelenen malzemelerin yoğunlukları, her üç doğrultuda ölçülen boyuna ve enine ultrases dalga hızları ile üç farklı 45^0 lik açıyla kesimden ölçülen enine ultrases dalga hızları ve hesaplanan esneklik katsayılarına (mühendislik sabitlerine) ilişkin bulgular, tablolar ve grafikler şeklinde tek tek verilerek incelenmiştir.

E-cam elyaf takviyeli epoksi kompozit ile karbon elyaf takviyeli epoksi kompozit malzemelerin ölçülen yoğunluk (ρ) değerleri, kg/ m^3 cinsinden Tablo-5' de verilmiştir.

Tablo-5: Kompozit Malzemelerin Yoğunluk (ρ) Değerleri

| Kompozitler | ρ (kg/ m^3) |
|--------------------|--|
| E-cam/epoksi | 1802,87 |
| Karbon/epoksi | 1506,07 |

Tablo-5' den görüldüğü gibi yoğunluğu 1100 (kg/m^3) olan epoksi matris içerisine E-cam elyaf takviye edilince $1802,87$ (kg/m^3), karbon elyaf eklenince ise $1506,07$ (kg/m^3) değerlerine ulaşılmıştır.

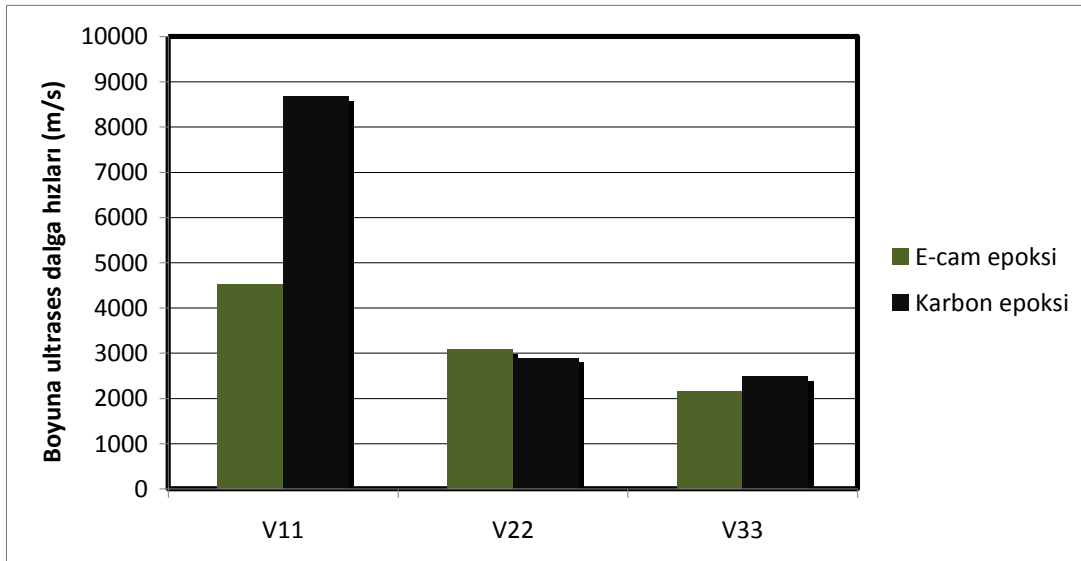
6.1. Ultrases Hız Deney Sonuçları

Her iki malzeme için ultrasonik darbe-yankı yöntemi ile ölçülen x(1), y(2) ve z(3) doğrultularındaki boyuna ultrases dalga hızlarıyla (V_{11} , V_{22} , V_{33}) enine ultrases dalga hızları (V_{12} , V_{13} , V_{23}) ve üç farklı 45^0 lik açıyla kesimden ölçülen enine ultrases dalga hızları (V_{s1} , V_{s2} , V_{s3}), m/s cinsinden Tablo-6' da verilmiştir.

Tablo-6: E-cam/Epoksi Kompozit ve Karbon/Epoksi Kompozit Malzemelerin Farklı Yüzeylerinden Ölçülen Ultrases Dalgası Hız Değerleri

| Hızlar (m/ s) | E-cam/epoksi | Karbon/epoksi |
|---------------|--------------|---------------|
| V_{11} | 4519,97 | 8674,29 |
| V_{22} | 3098,32 | 2898,22 |
| V_{33} | 2165,20 | 2490,40 |
| V_{12} | 1812,30 | 1693,53 |
| V_{13} | 1460,44 | 1662,00 |
| V_{23} | 1271,99 | 1299,24 |
| V_{s1} | 1426,44 | 1411,19 |
| V_{s2} | 1647,94 | 2046,70 |
| V_{s3} | 2253,27 | 2182,67 |

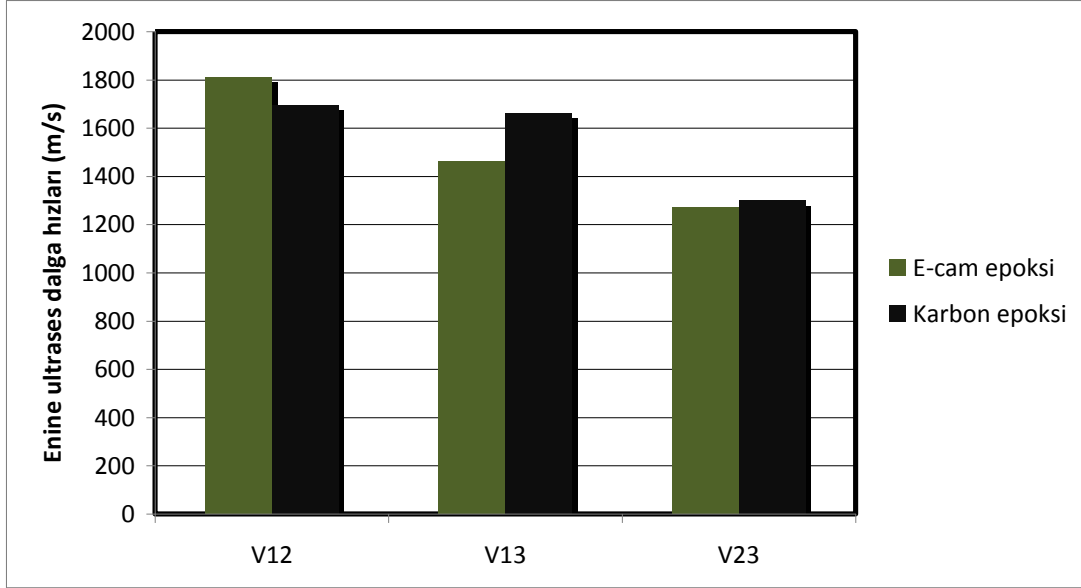
Şekil-31: E-cam/Epoksi Kompozit ve Karbon/Epoksi Kompozit Malzemelerin x, y, z Doğrultularında Boyuna Ultrases Dalga Hızları Grafiği



Tablo-6 ve Şekil-31' den görüldüğü gibi, E-cam/epoksi kompozit malzemenin x doğrultusundaki boyuna ultrases dalga hızı 4519,97 m/s iken y doğrultusunda 3098,32 m/s' ye ve z doğrultusunda ise 2165,20 m/s' ye düşmüştür. Karbon/epoksi kompozit için ise; x doğrultusundaki boyuna ultrases dalga hızı 8674,29 m/s iken y

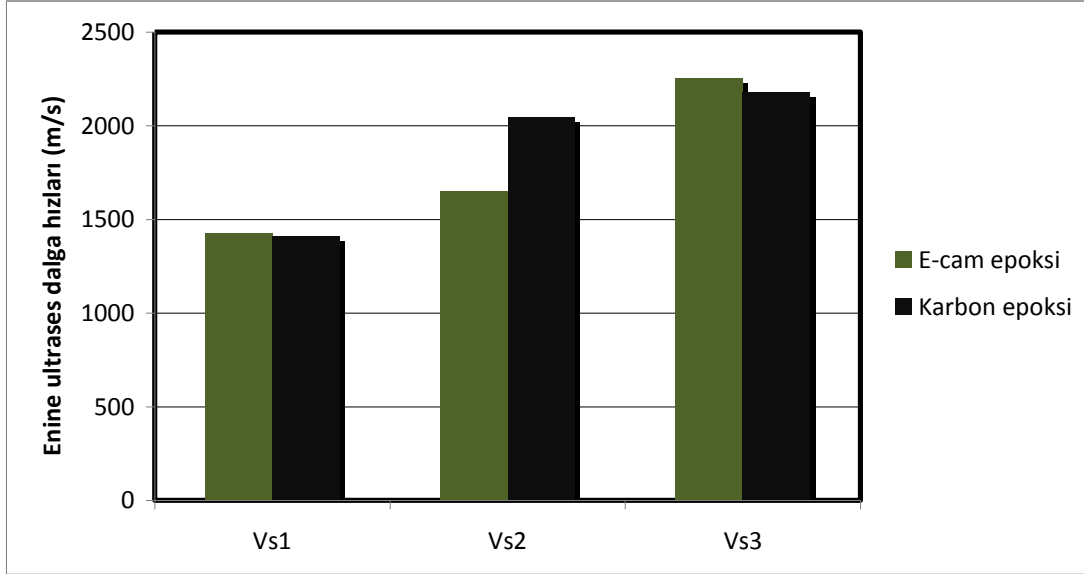
doğrultusunda 2898,22 m/s' ye ve z doğrultusunda ise 2490,40 m/s' ye düşmüştür. Bu ölçüm sonuçlarına göre, her iki kompozit malzemede de boyuna ultrasnes dalga hızı en büyük x doğrultusunda en küçük ise z doğrultusunda ölçülmüştür.

Şekil-32: E-cam/Epoksi Kompozit ve Karbon/Epoksi Kompozit Malzemelerin x, y, z Doğrultularında Enine Ultrasnes Dalga Hızları Grafiği



Tablo-6 ve Şekil-32' den görüldüğü gibi, E-cam/epoksi kompozit malzemede x doğrultusunda yayılan enine ultrasnes dalgası y doğrultusunda polarize olunca hızı 1812,30 m/s iken z doğrultusunda polarize olunca 1460,44 m/s' ye ve y doğrultusunda yayılan z doğrultusunda polarize olan enine ultrasnes dalga hızı ise 1271,99 m/s' ye düşmüştür. Karbon/epoksi kompozit için ise; x doğrultusunda yayılan enine ultrasnes dalgası y doğrultusunda polarize olunca hızı 1693,53 m/s iken z doğrultusunda polarize olunca 1662,00 m/s' ye ve y doğrultusunda yayılan z doğrultusunda polarize olan enine ultrasnes dalga hızı ise 1299,24 m/s' ye düşmüştür. Bu ölçüm sonuçlarına göre, her iki kompozit malzemede de enine ultrasnes dalga hızı en büyük x doğrultusunda yayılırken y doğrultusunda polarize olunca, en küçük ise y doğrultusunda yayılırken z doğrultusunda polarize olunca ölçülmüştür.

Şekil-33: E-cam/Epoksi Kompozit ve Karbon/Epoksi Kompozit Malzemelerin 45° Açıyla Kesilen Düzlemlerinde Yayılan Enine Ultrases Dalga Hızları Grafiği



Tablo-6 ve Şekil-33' den görüldüğü gibi, E-cam/epoksi kompozit malzemenin y ve z eksenleri ile 45° lik açı yapacak şekilde kesilmesiyle elde edilen düzlemde yayılan x-eksenine dik polarize olmuş enine ultrases dalga hızı 1426,44 m/s iken x ve z eksenleri ile 45° lik açı yapacak şekilde kesilmesiyle elde edilen düzlemde yayılan y-eksenine dik polarize olmuş enine ultrases dalga hızı 1647,94 m/s' ye ve x ve y eksenleri ile 45° lik açı yapacak şekilde kesilmesiyle elde edilen düzlemde yayılan z-eksenine dik polarize olmuş enine ultrases dalga hızı ise 2253,27 m/s' ye yükselmiştir. Karbon/epoksi kompozit için ise; y ve z eksenleri ile 45° lik açı yapacak şekilde kesilmesiyle elde edilen düzlemde yayılan x-eksenine dik polarize olmuş enine ultrases dalga hızı 1411,19 m/s iken x ve z eksenleri ile 45° lik açı yapacak şekilde kesilmesiyle elde edilen düzlemde yayılan y-eksenine dik polarize olmuş enine ultrases dalga hızı 2046,70 m/s' ye ve x ve y eksenleri ile 45° lik açı yapacak şekilde kesilmesiyle elde edilen düzlemde yayılan z-eksenine dik polarize olmuş enine ultrases dalga hızı ise 2182,67 m/s' ye yükselmiştir.

6.2. Esneklik Katsayılarının Hesaplanması

Bazı özel doğrultularda her iki malzeme için yapılan ultrases hız ölçüm sonuçları kullanılarak ortotropik malzemelerdeki 9 bağımsız esneklik sabit; C_{11} , C_{22} ,

C_{33} , C_{44} , C_{55} , C_{66} , C_{12} , C_{13} ve C_{23} belirlenebilir. Bunun için ortotropik malzemelerde ultrases hızı ile esneklik sabitleri arasındaki bağıntıların verildiği Tablo-2' de, malzemelerin yoğunluklarının verildiği Tablo-5' den ve ultrases dalga hızı ölçümlerinin verildiği Tablo-6' dan yararlanarak esneklik sabitleri hesaplanmıştır. Her iki malzeme için hesaplanan esneklik sabitleri Tablo-7' de verilmiştir.

Tablo-7: E-cam/Epoksi Kompozit ve Karbon/Epoksi Kompozit için Hesaplanan Esneklik Sabiti (C_{ij}) Değerleri (GPa)

| Esneklik sabitleri | E-cam/epoksi kompozit | Karbon/epoksi kompozit |
|--------------------|-----------------------|------------------------|
| C_{11} | 36,83 | 113,32 |
| C_{22} | 17,31 | 12,65 |
| C_{33} | 8,45 | 9,34 |
| C_{44} | 2,92 | 2,54 |
| C_{55} | 3,85 | 4,16 |
| C_{66} | 5,92 | 4,32 |
| C_{23} | 4,29 | 4,81 |
| C_{13} | 4,95 | 5,46 |
| C_{12} | 5,05 | 12,13 |

Malzemelerin Young modüllerini hesaplayabilmek için gerekli olan Denklem (3.38) deki D parametresi, her iki malzeme için ayrı ayrı hesaplanmıştır. Hesaplanan D parametreleri Tablo-8' de verilmiştir.

Tablo-8: E-cam/Epoksi Kompozit ve Karbon/Epoksi Kompozit için Hesaplanan D Parametresi Değerleri

| Kompozitler | D parametresi $[(N/m^2)^3]$ |
|---------------|-----------------------------|
| E-cam/epoksi | $4,28 \cdot 10^{30}$ |
| Karbon/epoksi | $9,65 \cdot 10^{30}$ |

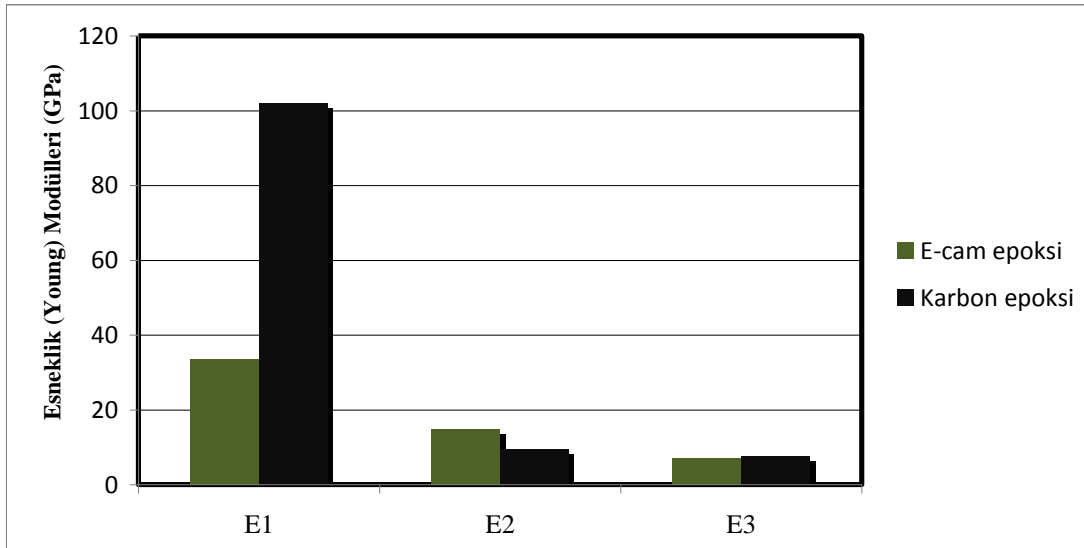
Malzemelerin x(1), y(2), z(3) doğrultularındaki esneklik (Young) modülleri; ortotropik malzemelerde esneklik katsayıları ile esneklik sabitleri arasındaki bağıntıların verildiği Tablo-3' deki E_1 , E_2 ve E_3 denklemlerinde, Tablo-7' de

verilen esneklik sabitleri ve Tablo-8’ de verilen D parametresi değerleri kullanılarak hesaplanmıştır. Hesaplamalar ve sonuçlar Tablo-9’ da verilmiştir.

Tablo-9: E-cam/Epoksi Kompozit ve Karbon/Epoksi Kompozit için x (1), y (2) ve z (3) Eksenlerinde Young Modülü (E_1 , E_2 , E_3) Değerleri

| Kompozitler | E_1 (GPa) | E_2 (GPa) | E_3 (GPa) |
|---------------|-------------|-------------|-------------|
| E-cam/epoksi | 33,51 | 14,94 | 7,00 |
| Karbon/epoksi | 101,59 | 9,38 | 7,50 |

Şekil-34: E-cam/Epoksi Kompozit ve Karbon/Epoksi Kompozit Malzemelerin x, y, z Doğrultularındaki Young Modülleri Grafiği



Tablo-9 ve Şekil-34’ den görüldüğü gibi, E-cam/epoksi kompozit malzemenin Young modülleri x (1) doğrultusunda 33,51 GPa iken y (2) doğrultusunda 14,94 GPa’ a ve z (3) doğrultusunda ise 7,00 GPa’ a düşmüştür. Karbon/epoksi kompozitin Young modülleri ise; x (1) doğrultusunda 101,59 GPa iken y (2) doğrultusunda 9,38 GPa’ a ve z (3) doğrultusunda ise 7,50 GPa’ a düşmüştür. Bu bulgulara göre, her iki kompozit malzemedeki Young modülü değeri en büyük x doğrultusunda, en küçük ise z doğrultusunda elde edilmiştir.

Tek eksenli çekme deneyinde yanal şekil değiştirme değerinin negatifinin, eksenel şekil değiştirmenin değerine oranı olan Poisson oranı ortotropik malzemeler için altı tanedir; ν_{12} , ν_{13} , ν_{21} , ν_{23} , ν_{31} , ν_{32} . Araştırmada kullanılan malzemelerin

Poisson oranları Tablo-3' deki ν_{12} , ν_{13} , ν_{21} , ν_{23} , ν_{31} , ν_{32} denklemlerinde, Tablo-7' de verilen esneklik sabitleri kullanılarak hesaplanmıştır. Hesaplanan Poisson oranları Tablo-10' da verilmiştir.

Tablo-10: E-cam/Epoksi Kompozit ve Karbon/Epoksi Kompozitin Poisson Oranları (ν_{12} , ν_{13} , ν_{21} , ν_{23} , ν_{31} , ν_{32}) Değerleri

| Kompozitler | ν_{12} | ν_{13} | ν_{21} | ν_{23} | ν_{31} | ν_{32} |
|--------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| E-cam/epoksi | 0,17 | 0,50 | 0,07 | 0,46 | 0,11 | 0,22 |
| Karbon/epoksi | 0,92 | 0,11 | 0,08 | 0,47 | 0,01 | 0,37 |

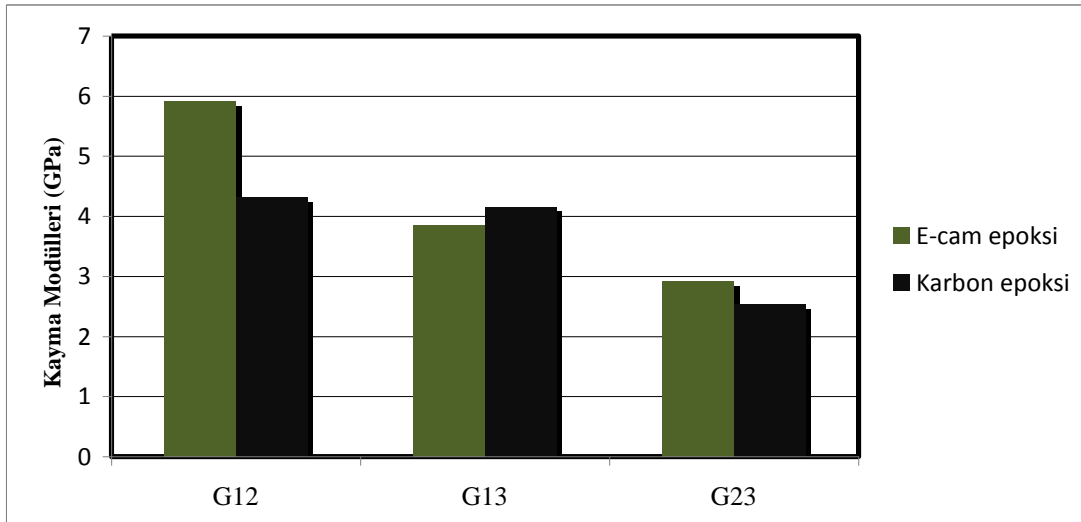
Tablo-10' dan görüleceği üzere her iki kompozitin birer Poisson oranının 0,5' den küçük olmadığı, diğer bütün değerlerin ise 0 ile 0,5 arasında olduğu görülmektedir.

Kayma gerilmesinin kayma gerinmesine oranı olan kayma modülü ortotropik malzemeler için üç tanedir; G_{12} , G_{13} , G_{23} . Ortotropik malzemelerimizin kayma modülleri Tablo-3' deki G_{12} , G_{13} , G_{23} denklemlerinde, Tablo-7' de verilen esneklik sabitleri kullanılarak hesaplanmıştır. Hesaplanan kayma modülleri Tablo-11' de verilmiştir.

Tablo-11: E-cam/Epoksi Kompozit ve Karbon/Epoksi Kompozit için xy, xz ve yz Düzlemlerinde Kayma Modülü (G_{12} , G_{13} , G_{23}) Değerleri

| Kompozitler | G_{12} (GPa) | G_{13} (GPa) | G_{23} (GPa) |
|--------------------|----------------|----------------|----------------|
| E-cam/epoksi | 5,92 | 3,85 | 2,92 |
| Karbon/epoksi | 4,32 | 4,16 | 2,54 |

Şekil-35: E-cam/Epoksi Kompozit ve Karbon/Epoksi Kompozit Malzemelerin xy, xz, yz Düzlemlerindeki Kayma Modülleri Grafiği



Tablo-11 ve Şekil-35’ den görüldüğü gibi, E-cam/epoksi kompozit malzemenin kayma modülleri xy düzleminde 5,92 GPa iken xz düzleminde 3,85 GPa’ a ve yz düzleminde ise 2,92 GPa’ a düşmüştür. Karbon/epoksi kompozitin kayma modülleri ise; xy düzleminde 4,32 GPa iken xz düzleminde 4,16 GPa’ a ve yz düzleminde ise 2,54 GPa’ a düşmüştür. Buna göre, her iki kompozit malzemede de kayma modülü değeri en büyük xy düzleminde, en küçük ise yz düzleminde elde edilmiştir.

6.3. Yakma Deneyi

“Bu deney metodu; elyaf takviyeli plastiklerde elyafı etkilemeyen fakat matrisi çözebilen bir çözücü ile matrisin uzaklaştırılmasıdır. Bu tür kompozitlerde en pratik yöntem reçinenin 600 °C civarında fırın içerisinde yakılarak uzaklaştırılmasıdır. Düşük sıcaklıklarda plastik matrisin yakılması cam ya da karbon elyafıta herhangi bir fiziksel değişime yol açmamaktadır. Bu deney yakma deneyi (Burn-off) olarak adlandırılmaktadır” (Akdemir, 1992).

Daha çok elyaf takviyeli kompozitlerin elyaf/reçine oranını belirlemek için yapılan yakma deneyi bu çalışmada ise kullanılan malzemelerdeki elyaf yönelimini gözlemek amacıyla yapılmıştır. Bunun için E-cam/epoksi ve karbon/epoksiden oluşan kompozit malzemeler bir ısıtıcıda (600 °C elektrik ısıtmalı bir fırında) epoksi tamamen buharlaşınca kadar yakılmıştır. Yakma sonucunda geriye kalan elyaflar bir cımbız yardımıyla en üst tabakadan başlayarak sırayla alındığında E-cam/epoksi

kompozit malzemede y(2) doğrultusundaki yani $[90^0]$ de bulunan elyafın 4-5 katının x(1) doğrultusunda, $[0^0]$ olduğu g6r6lm6şt6r. Karbon/epoksi kompozit malzemesinde ise $[90^0]$ lı tabakada, $[0^0]$ lı tabakaya kıyasla yok denecek kadar az elyafın olduğu g6r6lm6şt6r. Her iki kompozit malzemede de 6ç6nc6 boyut olan z(3) doğrultusunda elyafın hiç takviye edilmediği belirlenmişt6r.

7. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada E-cam/epoksi ve karbon/epoksiden oluşan ortotropik kompozit malzemelerin Young modülleri, Poisson oranları ve kayma modülleri ultrasonik teknikle incelenmiştir. 5 MHz' lik boyuna prob ve 2,25 MHz' lik enine prob kullanılarak ultrasonik darbe-yankı yöntemiyle bazı özel doğrultularda ultrases hız ölçümleri yapılmıştır. Christoffel denklemleri aracılığıyla yüksek simetri doğrultularında ultrasonik hızlarla esneklik sabitleri arasında kurulan bağıntılarda, ultrases hız ölçümleri kullanılarak dokuz bağımsız esneklik sabit hesaplanmıştır. Buradan da ortotropik malzemelerin esneklik özellikleri belirlenmiştir yani elyaf takviyesinin kompozit malzemenin mekanik özelliklerine olan etkisi ultrasonik yöntemle araştırılmıştır.

Elyaf takviyeli polimer matrisli kompozit malzemelerin üretimi ve endüstriyel uygulamalarda kullanımı son yıllarda hızlı bir şekilde artmıştır. En kritik mühendislik tasarımlarında dayanımı, hafifliği, korozyon direnci, aşınma direnci gibi üstün özellikleri sebebiyle diğer malzemelerin yerini almıştır. Özellikle havacılık sanayinde, otomotiv, denizcilik, taşımacılık ve inşaat sektörü ile askeri alanda karbon elyaf ya da cam elyaf takviyeli plastik kompozit malzemeler metallere oranla mukavemet/ağırlık oranlarının büyük olması, korozyona uğramamaları nedeniyle oldukça geniş bir kullanım alanına sahiptir. Bu nedenlerden dolayı kompozit malzemelerin yapısal olarak tasarlanabilmesi ve analizlerinin yapılabilmesi için mekanik özelliklerinin bilinmesine ihtiyaç vardır.

Mekanik testlerle esneklik katsayıların hesaplanması oldukça zordur ve kompleks çalışmalar gerektirmektedir. Ayrıca mekanik testlerin pahalı ve karmaşık test aletleri gerektirmesi, testlerin uzun süre alması ve en önemlisi de hesaplanmak istenen esneklik katsayılarına göre her bir panelinden yöneltmelerin olması gibi birçok olumsuzluğu bulunmaktadır. Ancak tahribatsız muayene metodu olan ultrasonik metotla, esneklik katsayılarının belirlenmesi için sadece numunenin ultrases hızlarının ölçülmesi ve yoğunluk değerinin bilinmesi yeterlidir. Böylece malzemenin esneklik katsayıları kolayca hesaplanabilmektedir. Ayrıca ultrases yönteminde deney süresi kısa olduğu için de en pratik yöntemdir ve gerekli görülmesi durumunda işlemin istenildiği kadar tekrarlanabilme imkanı da vardır.

Elyaf takviyeli kompozit malzemelere ait yoğunluk, ultrases hızı, esneklik katsayıları ve yakma deneyine ait bulgular bir önceki bölümde verilmiştir. Yapılan analizlerden elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir.

Boyuna ultrases dalga hız değerleri Tablo-6 ve Şekil-31' de verilmiştir. Bu verilere göre, her iki malzemedede de boyuna ultrases dalga hızları en yüksek değerini x(1) doğrultusunda aldığı, daha sonra y(2) doğrultusunda ve en düşük hız değerini de z(3) doğrultusunda aldığı görülmektedir. Yakma deneyi sonucunda gözlemlenen elyaf yöneliminin, her iki malzemedede de yönelimin en fazla x(1) doğrultusunda, daha sonra y(2) doğrultusunda olduğu ve z(3) doğrultusunda ise elyafın hiç takviye edilmediği görülmüştü. Bu iki sonuç kıyaslandığında x, y ve z doğrultularındaki boyuna ultrases dalga hızı ile aynı doğrultularda takviye edilen elyaf miktarı arasında doğru orantının olduğu görülür. Ayrıca karbon/epoksi kompozit malzemedede y(2) doğrultusunda yok denecek kadar az elyafın olduğu belirtilmişti. Bu durum V_{22} hızının 2898,22 m/s, V_{33} hızının ise 2490,40 m/s olarak az bir farklılıkla ölçülmesinden de görülmektedir. Bu ise kullanılan ultrases yönteminin ne kadar hassas olduğunu göstermektedir.

Tablo-6 ve Şekil-32' deki x, y ve z doğrultularında yayılan enine ultrases dalga hızları incelendiğinde her iki malzemedede de en fazla hız V_{12} de, daha sonra V_{13} te ve en düşük hız olarak da V_{23} ten ölçülmüştür. Aynı doğrultuda yayılan V_{12} ile V_{13} enine ultrases dalga hızları kıyaslandığında titreşim yönü 3 doğrultusu olan enine ultrases dalga hızının düşük çıkmasının z(3) doğrultusunda hiç elyaf takviyesi olmamasından ve aynı doğrultuda titreşen V_{13} ile V_{23} kıyaslandığında ise yayılma yönü 2 doğrultusu olan enine ultrases dalga hızının düşük çıkmasının ise y(2) doğrultusundaki elyafın x(1) doğrultusundaki elyaf miktarına kıyasla az olmasından kaynaklandığı söylenebilir.

Tablo-6 ve Şekil-33' de görüleceği üzere malzemelerin 45^0 açıyla kesilen düzlemlerinde yayılan enine ultrases dalga hızları incelendiğinde her iki malzemedede de en fazla hız V_{s3} de, daha sonra V_{s2} de ve en düşük hız olarak da V_{s1} den ölçülmüştür. Şekil-25, Şekil-24 ve Şekil-23' e bakıldığında V_{s3} ultrases hız ölçümünün kompozit malzemenin x-y eksenleri ile 45^0 lik açıyla kesilmesiyle elde edilen düzlemden yapıldığı, V_{s2} ultrases hız ölçümünün kompozit malzemenin x-z eksenleri ile 45^0 lik açıyla kesilmesiyle elde edilen düzlemden yapıldığı ve V_{s1}

ultrases hız ölçümünün ise kompozit malzemenin y-z eksenleri ile 45^0 lik açıyla kesilmesiyle elde edilen düzlemden yapıldığı görülür. Buradan da en fazla elyaf yöneliminin V_{s3} ultrases hızının ölçüldüğü düzlemde, daha sonra V_{s2} ultrases hızının ölçüldüğü düzlemde ve en az elyaf yöneliminin ise V_{s1} ultrases hızının ölçüldüğü düzlemde olduğu söylenebilir. Burada da elyaf yönelimiyle enine ultrases hızlarının arttığı söylenebilir.

Sonuç olarak; ister boyuna ister de enine ultrases dalga hızı olsun elyaf yöneliminin olduğu doğrultudan ölçülen ultrases hızının büyük olduğu, elyaf yöneliminin az ya da hiç olmadığı doğrultulardan ölçülen ultrases hızının ise elyaf yönelim miktarıyla ilişkili olarak düştüğü söylenebilir.

Tablo-3' de ortotropik malzemelere ait Young modüllerinin verildiği E_1 , E_2 ve E_3 denklemlerinden Young modüllerinin, ölçüm yapılan boyuna ve enine ultrases dalga hızlarının hepsine bağlı olduğu görülmektedir. Fakat ölçülen boyuna ultrases hız değerlerinin, ölçüldüğü doğrultudaki Young modülü değerinde daha fazla etkin (baskın) olduğu söylenebilir. Yani V_{11} , V_{22} ve V_{33} boyuna ultrases hız değerleri sırasıyla E_1 , E_2 ve E_3 Young modülleriyle diğer ultrases hızlarına nazaran daha fazla ilişkili olduğu söylenebilir. E-cam/epoksi ve karbon/epoksi kompozit malzemelerin Young modüllerinin verildiği Tablo-9 ve Şekil-34 ile boyuna ultrases hız değerlerinin verildiği Tablo-6 ve Şekil-31' e bakıldığında da bu anlatılan durum deneysel olarak elde edilen verilerden de açıkça görülmektedir. Yani ölçülen boyuna ultrases hız değerinin büyük olduğu doğrultuda Young modülü (E) değeri büyük, küçük olduğu doğrultuda ise Young modülü küçüktür. Ayrıca x, y ve z doğrultularındaki boyuna ultrases dalga hızı ile aynı doğrultularda takviye edilen elyaf miktarı arasında doğru orantının olduğunu belirtilmişti. Buradan hareketle her iki malzemedeki de elyaf takviyesinin fazla olduğu doğrultuda, $[0^0]$ Young modülü (E_1) büyük, elyaf takviyesinin az olduğu doğrultudaki $[90^0]$ Young modülü (E_2) küçük ve elyaf takviyesi olmayan 3. doğrultuda ise Young modülü (E_3) en küçük değerdedir. Yani elyaf doğrultusunda Young modülü büyük değer alırken, elyaf düzlemine dik yönde ise küçük değer almıştır ve bunun sonucunda elyaf yönelimine göre Young modülünün değiştiği sonucu çıkarılabilir.

Ortotropik kompozit malzemeler, elyaf yönelimlerine bağlı olarak farklı yönlerde farklı davranış özellikleri gösterebilmektedir. Young modülünün en büyük

değere sahip olduğu doğrultuda, cisim gerilim ve basınca daha fazla dayanmaktadır yani rijitliği ve mukavemeti yüksektir. Küçük olduğu doğrultuda ise maddenin deformasyonu daha kolaydır. Atom seviyesinde ise Young modülü arttığında atomlar arası bağ da kuvvetlenir, Young modülü azaldığında ise atomlar arası bağlar da zayıflar. Yani katı cisimlerin esneklik özelliklerinin incelenmesi ile atomlar ve moleküller arasındaki bağlayıcı kuvvetler hakkında bilgi elde edilebilir.

Tablo-4' den görüleceği üzere her iki kompozit malzemenin matris kısmını oluşturan epoksi reçinenin esneklik (Young) modülü 3,5 GPa iken Young modülü 73 GPa olan E-cam elyaf takviye edilince oluşan E-cam/epoksi kompozitin en büyük Young modülü değeri 33,51 GPa olarak ölçülmüştür. Young modülü 240 GPa olan karbon elyaf takviye edilince ise oluşan karbon/epoksi kompozitin en büyük Young modülü değeri 101,59 GPa olarak ölçülmüştür. Sonuçta Tablo-4 ve Tablo-9' dan görüleceği üzere her iki kompozit malzemenin hesaplanan Young modülü değerleri, malzemeyi oluşturan reçine (matris) ile elyafın Young modülü değerleri arasında çıkmıştır ve zayıf mukavemete sahip reçineye elyaf takviye edilerek mukavemetin artırıldığı görülmüştür.

Karbon/epoksi ve E-cam/epoksi malzemelerin her üç doğrultuda elde edilen Young modülleri birbirleriyle oranlayarak kıyaslandığında; 1, 2 ve 3 doğrultuları için sırasıyla 3,03; 0,63 ve 1,07 bulunmuştur. 2. doğrultudaki oranın 1' den küçük çıkmasının nedeni olarak 2 doğrultusunda karbon/epoksi kompozitte yok denecek kadar az elyafın takviye edilmesinden kaynaklandığı söylenebilir. Young modülü değerlerinin 3 doğrultusunda yaklaşık eşit olduğu fakat 1 doğrultusunda ise üç katı olduğu görülmektedir. Young modülü oranlarının üç katı şeklinde çıkması, karbon elyaf takviyeli kompozitin E-cam elyaf takviyeli kompozite göre daha sağlam ve daha hafif olduğunu ortaya koymaktadır (Tablo-5).

Tablo-12: Bazı Metallerin ve Alaşımların Young Modülü Değerleri

| Malzeme | Young modülü (GPa) |
|-------------------------------------|--------------------|
| Alüminyum alaşımları | 10,5 (72,4) |
| Bakır | 16,0 (110) |
| Çelik (alaşımsız ve düşük alaşımlı) | 29,0 (200) |
| Paslanmaz çelik (18-8) | 28,0 (193) |
| Titanyum | 17,0 (117) |
| Tungsten | 58,0 (400) |

Kaynak: Smith, 2001: 250.

Tablo-12’ de yaygın olarak kullanılan bazı metallerin Young modülü değerleri verilmiştir. Bu verilerle araştırmada kullanılan malzemelerin en büyük Young modülü değerleri kıyaslandığında E-cam/epoksi kompozit malzemenin alüminyum alaşımlarına yakın olduğu, karbon/epoksi kompozit malzemenin ise bakır, titanyum ve bazı çelik alaşımlarına yakın değerde olduğu görülmektedir. Bu sonuç kompozit malzemelerin mukavemetlerinin ne derece yüksek olduğunu göstermektedir. Ayrıca kompozitlerin yoğunluklarının da düşük olması bu tür malzemelerin yüksek mukavemet ve düşük ağırlık gerektiren uygulamalar için avantajlı olduğunu göstermektedir.

Marques ve Williams (1986) çalışmalarında, ultrasonik doğrudan iletim yöntemiyle boyuna ve enine ultrases dalga hızlarını ölçerek tek yönlü cam elyaf epoksi kompozitin elastik modüllerini ve Poisson oranlarını hesaplamışlardır. Elyaf doğrultusunda Young modülünü (E_z) 37,759 GPa, elyaf düzlemine dik doğrultuda ise Young modülünü (E_x) 8,785 GPa olarak bulmuşlardır (Marques ve Williams, 1986). Yapılan bu çalışmada da E-cam/epoksi kompozitte elyaf doğrultusunda Young modülü (E_1) 33,51 GPa, elyaf düzlemine dik doğrultuda ise (E_3) 7,00 GPa olarak bulunmuştur. Hacimce %62 karbon lifi içeren karbon lifli epoksi kompozit malzemenin Young modülünün lif doğrultusunda $[0^0]$ 145 GPa, lif düzlemine dik doğrultuda ise $[90^0]$ 9,4 GPa olduğu belirtilmiştir (Smith, 2001: 734). Bu çalışmada ise karbon epoksi kompozitte elyaf doğrultusunda Young modülü (E_1) 101,59 GPa, elyaf düzlemine dik doğrultuda ise (E_3) 7,50 GPa olarak bulunmuştur. Kompozit malzemeye takviye edilen elyafın miktarı ve yönelimiyle Young modülü değerinin değiştiği bilinsede bu sonuçlar laboratuvar deney sonuçlarımıza benzerdir. Araştırmaların sonucundan da görüldüğü gibi elyaf doğrultusunda Young modülü büyük değer alırken, elyaf düzlemine dik doğrultuda ise küçük değer almıştır.

Lempriere (1968), ortotropik malzemelerin Poisson oranları üzerine yaptığı çalışmada, Denklem 7.1 ve Denklem 7.2’ de verilen sınırlamaları sağlamaları gerektiğini belirtmiştir (Lempriere, 1968).

$$(1 - \nu_{12} \cdot \nu_{21}) > 0, \quad (1 - \nu_{13} \cdot \nu_{31}) > 0, \quad (1 - \nu_{23} \cdot \nu_{32}) > 0 \quad (7.1)$$

$$1 - \nu_{12} \cdot \nu_{21} - \nu_{23} \cdot \nu_{32} - \nu_{31} \cdot \nu_{13} - 2 \cdot \nu_{21} \cdot \nu_{32} \cdot \nu_{13} > 0 \quad (7.2)$$

İzotrop malzemelere dayalı olarak Poisson oranlarına getirilen bu sınırlamaları, bu çalışmada ultrases yöntemiyle elde edilen Tablo-10' daki Poisson oranı değerlerinin sağladığı görülmüştür. Lempriere' nin çalışması izotrop malzemelere dayalı olduğu için bu çalışmadaki 0,5' ten küçük olmayan (E-cam/epoksi deki 0,5 ve karbon/epoksi deki 0,92) Poisson oranı değerlerini makul bir değer olsalar bile kabul etmez. Öztürk ve Erdoğan (1997) çalışmalarında, ortotropik malzemelerde Poisson oranının 0,5' ten büyük olabileceğini belirtmişlerdir (Öztürk ve Erdoğan, 1997).

Kayma gerilmesinin kayma zorlanmasına oranı olarak tanımlanan kayma modülü ortotropik malzemelerde hangi düzlemde ölçülüyor ise, o düzlemde ölçülen enine ultrases dalga hız değerinin karesinin malzemenin yoğunluğu ile çarpımına eşit olduğu Tablo-2 ve Tablo-3' den görülmektedir. Tablo-11 ve Şekil-35' de verilen kayma modülü değerleri Tablo-6 ve Şekil-32' de verilen enine ultrases dalga hızlarıyla da kıyaslanarak incelendiği takdirde de bu durum görülür. Bundan dolayı enine ultrases dalga hızlarını incelerken yapılan yorumların benzeri kayma modülleri içinde yapılabilir. Yani G_{12} ile G_{13} kayma modülleri kıyaslandığında, G_{13} ' ün küçük çıkmasının 3 doğrultusunda hiç elyaf takviyesi olmamasından ve G_{13} ile G_{23} kıyaslandığında ise G_{23} ' ün küçük çıkmasının 2 doğrultusundaki elyafın 1 doğrultusundaki elyaf miktarına kıyasla az olmasından kaynaklandığı söylenebilir.

Bu çalışmada ortotropik malzemelerin mekanik özellikleri, ultrasonik darbe-yankı tekniği ile ölçülen ultrases hız değerleri kullanılarak belirlenmiştir. Ultrasonik yöntemin ülkemiz sanayinde başarılı ve yaygın bir şekilde uygulanması için yetişen ve yetişmiş teknik elemanlara detaylı olarak öğretilmesinde fayda vardır. Çünkü bu metot bu alanda belli bir yeterliliğe ulaşmış kişilerce yapılmaktadır. Metotta kullanılan malzemelerin boşluklu, çatlaklı gibi yapı kusurlarının olması ultrases hızlarını gerçek değerinden uzaklaştırmaktadır. Bu da sonuçlara yansımaktadır. Mekanik özellikleri belirlenecek malzemelerin imalat sürecinde yapı kusurlarının oluşmamasına dikkat edilmeli ve muayene işleminde yüzeyin pürüzlülüğüne göre temas sıvısı seçilerek, proba uygulanan baskı kuvvetinde fark minimum olmalıdır.

Ultrasonik yöntemle belirlenen esneklik özellikleri, çekme ve kayma testleri yapılarak elde edilen sonuçlarla kıyaslanabilir. Farklı simetriye sahip kompozit malzemelerde ya da kristallerde esneklik özelliklerini belirlemek için buna benzer

alışmalar yapılabilir. Benzer alışmalar, farklı oranda elyaf takviyeli kompozitlere uygulanarak yeni çalışmaların yapılması önerilebilir.

KAYNAKÇA

- Abi, E. (2007). Yapı Seramiklerinde Ultrases Geçim Hızı ile Malzeme Parametreleri İlişkisinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyonkarahisar.
- Adamowski, J. C., Andrade, M. A. B., Perez, N. and Buiocchi, F. (2008). A large aperture ultrasonic receiver for through transmission determination of elastic constants of composite materials. International Ultrasonics Symposium Proceedings. 02-05 November. New York: IEEE Press, 1524-1527.
- Afifi, H. A., Al-Ackad, M. M. and Imamura, T. (2002). Polymethyl methacrylate, polystyrene and polyvinyl chloride: determination of elastic constants by water immersion ultrasonic sing-around method. Kautschuk Gummi Kunststoffe, 55 (6), 307-310.
- Akdemir, A. (1992). Yüzey Çatlaklı Cam Takviyeli Plastiklerde Gerilmeli Korozyon, Doktora Tezi, SELÇUK ÜNİVERSİTESİ Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Alp, İ. (1998). Yüksek Frekanslı Ses Dalgalarının Cevher Zenginleştirmede Kullanılabilirliğinin Araştırılması, Doktora Tezi, OSMANGAZİ ÜNİVERSİTESİ Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Aral, E. (1989). Ultrases ders notları. Anadolu üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Aran, A. (1990). Elyaf Takviyeli Karma Malzemeler. İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi Makina Fakültesi.
- Arık, H. (1989). Ultrasonik Muayene Metodunun Dökme Demirler Üzerine Uygulanabilirliğini Etkileyen Faktörlerin Tayini, Yüksek Lisans Tezi, GAZİ ÜNİVERSİTESİ Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Armatlı Kayrak, M. (1999). Havacılık Kompozitleri ve Mukavemet Maliyet Analizleri. Eskişehir: Anadolu Üniversitesi Yayınları.
- Ataş, E. (2000). TM Al-SiC Kompozitlerin Mikroyapı Özelliklerinin Ultrasonik Tekniklerle Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, ORTA DOĞU TEKNİK ÜNİVERSİTESİ Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Aygün, E. (Kasım 1990). Ultrason ve Tıpta Kullanımı. TÜBİTAK Bilim ve Teknik Dergisi, 276, 37-39.
- Balcı, M. (2011). Ters Titreşim Problemi Yöntemi ile Tabakalı Kompozit Plakların Fiziksel Özelliklerinin Tahmin Edilmesi, Doktora Tezi, ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.

- Becenen, N. (2008). Traktör Kaportalarında Kullanılan Plastik Matrisli Kompozit Malzemelerin Yapısal Özelliklerinin İyileştirilmesi Üzerine Bir Araştırma, Doktora Tezi, NAMIK KEMAL ÜNİVERSİTESİ Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekirdağ.
- Beköz, N. (2006). Ultrasonik Yöntemde Kaynak Hatalarının Optimum Test Parametrelerinin Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Berke, M. and Hoppenkamps, U. (1990). Testing Materials Ultrasonically (3rd Edition). Krautkrämer Training System.
- Berke, M. and Hoppenkamps, U. (1992). Practical Training with Digital Ultrasonic Instruments (3rd Edition). Krautkrämer Training System.
- Berlincourt, D. A. (1961). TP-221: Power capacities of piezoelectric ceramics in sonar type acoustic transducers. Cleveland Ohio: Electronic Research Division, Clevite Corporation.
- Cansu, Ç. (2008). Ultrases ile Ağaçların Bazı Fiziksel Özelliklerinin Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, OSMANGAZİ ÜNİVERSİTESİ Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Cracknell, A. P. (1980). Ultrasonics. London: Wykeham Publishing.
- Dahmen, K. (1969). Ultrasonik Malzeme Muayenesinin Esasları. (Çevirenler: Selahattin Anık ve Taylan Bedizel). Manisa: Oerlikon Kaynak Elektrodları ve Sanayi A.Ş.
- Dahmen, S., Ketata, H., Ben Ghazlen, M. H. and Hosten, B. (2008). Elastic constants measurement in anisotropic Olivier wood plates using air-coupled ultrasonic bulk waves. 5th African Conference on Non Destructive Testing, March 12-14, Hammamet, Tunisia: CD-ROM.
- Demircioğlu, G. (2006). Kısa Cam Elyaf Takviyeli Epoksi Kompozit Malzemelerde Elyaf Boyutunun Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, GAZİ ÜNİVERSİTESİ Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Deniz, A. (2005). Alümina Seramiklerinde Tanecik Boyutunun Ultrases ile Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon.
- Deniz, A. (2012). Çeliklerde Tane Boyutunun Ultrasonik Yöntemle İncelenmesi, Doktora Tezi, AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyonkarahisar.

- Denli, H. B. (2007). Kestirimci Bakım ve Uygulamalarının İyileştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, MERSİN ÜNİVERSİTESİ Fen Bilimleri Enstitüsü, Mersin.
- Dinçer, N. (2004). Hegzagonal Kristallerin Esneklik Özellikleri Üzerine Araştırma, Yüksek Lisans Tezi, DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Diren, B. (Haziran 1995). Tıbbi Görüntüleme Yöntemleri. TÜBİTAK Bilim ve Teknik Dergisi, 331, 26-29.
- Ekinci, Ş., Sarıçam, S. ve Yıldırım, A. (2009). Ultrasonik Test Seviye 1. İstanbul: Türkiye Atom Enerjisi Kurumu, Çekmece Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezi, Uygulama Bölümü Endüstri Birimi.
- Ekinci, Ş., Sarıçam, S. ve Yıldırım, A. (2010). Ultrasonik Test Seviye 2. İstanbul: Türkiye Atom Enerjisi Kurumu, Çekmece Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezi, Uygulama Bölümü Endüstri Birimi.
- Ekrem, M. (2006). Cam Kumaş Takviyeli Termoplastik Kompozitlerin Mekanik Özellikleri ve Kırılma Davranışları, Yüksek Lisans Tezi, SELÇUK ÜNİVERSİTESİ Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Erkan, Ö. (2009). Camelyaf Takviyeli Polimer Kompozitlerin Parmak Frezelenmesinde Yüzey Kalitesinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, KARABÜK ÜNİVERSİTESİ Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.
- Ersoy, H. Y. (2001). Kompozit Malzeme. İstanbul: Literatür Yayıncılık.
- Ertaş, E. (2007). Geçiş Zamanı Esaslı Ultrasonik Akış Ölçer, Yüksek Lisans Tezi, GAZİ ÜNİVERSİTESİ Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- German, İ. (Eylül 1983a). Ultrasonik Hata Bulucular. TÜBİTAK Bilim ve Teknik Dergisi, 190, 42-43.
- German, İ. (Kasım 1983b). Ultrasonik Kalınlık Ölçer. TÜBİTAK Bilim ve Teknik Dergisi, 192, 44-45.
- Ginzler, E. (1998). Weld Inspection of Ultrasonic Inspection 2 - Training for Nondestructive Testing. Ontario: Materials Research Institute.
- Goodman, S. H. (1998). Handbook of Thermoset Plastics (2nd Edition). New Jersey: Noyes Publications.
- Graff, K. F. (1977). Ultrasonics: historical aspects. Ultrasonics Symposium, 1977. 26-28 October. New York: IEEE Press, 1-10.

- Grimberg, R., Savin, A., Steigmann, R., Bruma, A., Barsanescu, P. D. and Salavastru, D. P. (2010). Determination of CFRP's mechanical properties using ultrasound methods. 5th International Workshop NDT in Progress, 2009 October 12-14, Prague: CD-ROM.
- Güleç, Ş. (1980). Malzeme Ders Notları. İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi Makina Fakültesi.
- Gürpınar, G. (2007). Ses Ötesi Dalgaların Cevher Zenginleştirmede Kullanılabilirliğinin Araştırılması, Doktora Tezi, OSMANGAZİ ÜNİVERSİTESİ Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Güzel, H. (1996). Transduser Tasarımı ve Sıvı Gıdalarda Ultrasonik Hız Ölçümleri, Doktora Tezi, SELÇUK ÜNİVERSİTESİ Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Güzel, H. (2005). Uygulamalı Fizik Dersi, Ders Notları. Konya: Selçuk Üniversitesi Eğitim Fakültesi Fizik Anabilim Dalı.
- Hellier, C. (2001). Handbook of Nondestructive Evaluation. New York: McGraw-Hill.
- Hersat, S. B. (2010). Volkanik Kayaçların Elastik Özelliklerinin Ultrases Yöntemiyle Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon.
- Hirsekorner, S. (1982). The scattering of ultrasonic waves by polycrystals. The Journal of the Acoustical Society of America, 72 (3), 1021-1031.
- Ilıcan, S. (1995). Ultrases ile Betonun Bazı Fiziksel Özelliklerinin Tayini, Yüksek Lisans Tezi, OSMANGAZİ ÜNİVERSİTESİ Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- İşçi, C. and Palmer, S. B. (1977). Elastic Constants of Single Crystal Tb-50% Ho from 4.2-300 K. Philosophical Magazine, 35 (6), 1577-1584.
- İşçi, C. (1978). Hekzagonal Kristallerin Esneklik Özellikleri. EGE ÜNİVERSİTESİ Fen Fakültesi Dergisi, Seri-A, 2 (3), 279-299.
- İşçi, C. ve İlk, E. M. (1999). Tek Kristal Sistemlerde Esneklik Özelliklerin İncelenmesi. DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ Fen ve Mühendislik Dergisi, 1 (3), 81-88.
- Jones, R. M. (1998). Mechanics of Composite Materials (2nd Edition). Philadelphia: Taylor & Francis, Inc.
- Judge, J. F. (1996). The Coming Revolution. Airline Management and Marketing.

- Kanevskii, I. N. (1964). Focusing of ultrasonic cylindrical waves in an absorbing medium. *Akusticheskij Zhurnal*, 10 (3), 309-312.
- Kara, M. (2006). Düşük Hızlı Darbeye Maruz Tabakalı Kompozitlerin Dinamik Cevabı, Yüksek Lisans Tezi, SELÇUK ÜNİVERSİTESİ Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Karadeniz, E. (1989). Elyaf Takviyeli Plastik Kompozitlerin Mukavemeti, Yüksek Lisans Tezi, MARMARA ÜNİVERSİTESİ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Kökdemir, E. (2007). Alaşımız Yapı Çeliği Levhalarında Kaynak Dikişlerinin Ultrasonik Muayenesi, Yüksek Lisans Tezi, MARMARA ÜNİVERSİTESİ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Körpınar, M. A. (1985). Diagnostik ve Terapik Dozda Ultrases Işınlamasının Çeşitli Dokular Üzerine Etkisinin Ultrastrüktürel Olarak İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ Sağlık Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Küçüksucu, A. (2011). Ortotropik Derecelendirilmiş Malzemelerin Temas Mekanizmasının Analizi, Doktora Tezi, SELÇUK ÜNİVERSİTESİ Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Lempriere, B. M. (1968). Poisson's ratio in orthotropic materials. *The American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal*, 6 (11), 2226-2227.
- Lubin, G. (1969). *Handbook of Fiberglass and Advanced Plastics Composites*. New York: Van Nostrand Reinhold Company.
- Lubin, G. (1982). *Handbook of Composites (2nd Edition)*. New York: Van Nostrand Reinhold Company.
- Mallick, P. K. (1993). *Fiber Reinforced Composites Materials, Manufacturing, and Design (Second Edition)*. New York: Marcel Dekker Incorporated.
- Marques, E. R. C. and Williams, J. H. (1986). Ultrasonic determination of the elastic constants of the stiffness matrix for unidirectional fiberglass epoxy composites. *Massachusetts Institute of Technology Cambridge Dept of Mechanical Engineering*, ADA302918.
- Matikas, T. E. and Karpur, P. (1993). Ultrasonic reflectivity technique for the characterization of fiber-matrix interface in metal matrix composites. *Journal of Applied Physics*, 74 (1), 228-236.
- Mısırlıoğlu, K. M. (1996). CTP Malzemelerde Cam Elyaf Takviyenin Mekanik Özelliklere Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, SAKARYA ÜNİVERSİTESİ Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.

- Mistou, S., Karama, M., Guerjouma, R. E., Ducret, D., Faye, J. P. and Lorrain, B. (1999). Comparative study on the determination of the elastic properties of composite materials by tensile tests and ultrasound measurement. International Committee on Composite Materials-12, July 05-09, Paris: CD-ROM.
- Mutlu, İ. (2006). Paslanmaz ve Takım Çeliklerinde Tane Boyutunun Ultrasonik Dalgaların Saçılmasına Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Okkay, H. (2007). Selülozik Atıkların Ultrasonik Ön İşlenmesi ve Mikrodalga Reaktörde Hidrolizi, Yüksek Lisans Tezi, GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze.
- Onur, A. (2004). Bazı Cevher ve Atıkların Cevher Hazırlama ve Flotasyonunda Ultrasonik Dalgaların Kullanılabilirliğinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Oral, İ. (2011). Çeşitli Polifonksiyonel Gruplu Modifiye Polistirenler ile Epoksi Reçinelerin Sentezi ve Bunlardaki Ultrases Hızlarının Ölçülmesi, Doktora Tezi, SELÇUK ÜNİVERSİTESİ Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Öktem, H. F. (2002). Ultrasonik Tahribatsız Muayene Tekniğinin Sonlu Elemanlar Yöntemi ile İncelenmesi, Doktora Tezi, DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Örçen, G. (2005). Çelik Takviyeli Termoplastik Kompozit Levhalarda Elastik ve Elasto-Plastik Gerilme Analizi, Yüksek Lisans Tezi, FIRAT ÜNİVERSİTESİ Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Özdemir, T. (2006). Bor Karbür Esaslı Seramik Metal Kompozitlerinin Ultrases Dalga Hız Metodu ile Ortalama Tanecik Boyutlarının Tayini, Yüksek Lisans Tezi, AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon.
- Özkan, V. (2008). Bazı Karbürlü Metal-Matriks Seramiklerin Tanecik Boyutlarının Sinterleme Sıcaklığıyla Değişiminin Ultrases ile İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyonkarahisar.
- Öztürk, M. and Erdoğan, F. (1997). Mode I crack problem in an inhomogeneous orthotropic medium. International Journal of Engineering Science, 35 (9), 869-883.
- Papadakis, E. P. (1968). Ultrasonic attenuation caused by scattering in polycrystalline media, (Edited by: Warren Perry Mason). Physical Acoustics: Principles and Methods. New York: Academic Press, 269-328.

- Pithioux, M., Lasaygues, P. and Chabrand, P. (2002). An alternative ultrasonic method for measuring the elastic properties of cortical bone. *Journal of Biomechanics*, 35 (7), 961-968.
- Reinhart, T. J. (1988). *Engineered materials handbook 1. Composites (2nd Edition)*. Metals Park Ohio: ASM International.
- Saçak, M. (2005). *Polimer Teknolojisi*. Ankara: Gazi kitabevi.
- Sahın, M. (2007). *Betonla Uyumlu Polipropilen Elyaf Takviyeli Kompozitlerin Üretimi ve Özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, MARMARA ÜNİVERSİTESİ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul*.
- Sakin, R. (1994). *Düzlemsel Rasgele Dağılımlı Keçe Elyafı ile Takviyeli Kompozit Malzemede Kırılma Tokluğunun Elyaf Hacmi, Elyaf Yönlenmesi ve Deformasyon Hızı ile Değişiminin Saptanması, Yüksek Lisans Tezi, BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir*.
- Sarpün, İ. H. (1998). *Ultrases ile Mermer Blokların İç Yapısının ve Bazı Fiziksel Özelliklerinin Tayini, Yüksek Lisans Tezi, OSMANGAZİ ÜNİVERSİTESİ Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir*.
- Sarpün, İ. H. (2004). *Ultrases Yöntemi ile Çeşitli Mermerlerin Ortalama Tanecik Boyutlarının Tayini, Doktora Tezi, OSMANGAZİ ÜNİVERSİTESİ Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir*.
- Sevim, Ö. (2008). *Tungsten Karbür Esaslı Seramik Metal Kompozitlerin Ultrases Dalga Hız Metodu ile Ortalama Tanecik Boyutlarının Tayini, Yüksek Lisans Tezi, AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyonkarahisar*.
- Sinclair, I. R. (2001). *Sensors and Transducers (Third edition)*. Oxford (UK): Butterworth-Heinemann.
- Skolnick, M. L. (Nisan 1983). *Ultrason ve Tıp. TÜBİTAK Bilim ve Teknik Dergisi*, 185, 18-19.
- Smith, W. F. (2001). *Malzeme Bilimi ve Mühendisliği. (Çeviren: Nihat G. Kınikoğlu)*. İstanbul: Literatür Yayıncılık.
- Spurlock, C. M. (2006). *Determination of Elastic Constants and Damage in Ceramic Matrix Composites Using Ultrasonic Wave Speed Measurements, Master of Science, The Graduate Faculty of AUBURN UNIVERSITY, Alabama*.
- Stanciu, M. D. and Curtu, I. (2011). *Determination of absorption coefficient of fibre glass/epoxy resin composite materials through ultrasonic techniques. Annals of the University of Petroşani Mechanical Engineering*, 13, 151-158.

- Şahin, Y. (2000). Kompozit Malzemeye Giriş. Ankara: Gazi Kitabevi.
- Taşan, İ. ve Toprak, Z. (2001). Tahribatsız Muayene Yöntemleri, Bitirme Tezi, İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, İstanbul.
- Tatar, A. (2011). Tabakalı Ortotropik Silindirik Bir Kabuk ile Dikdörtgen Bir Plakanın Birlikte Titreşim Analizi, Yüksek Lisans Tezi, İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Uyaner, M. (2008). Anizotropik Cisimlerin Elastisite Teorisi Dersi, Ders Notları. Konya: Selçuk Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü.
- Yavuzylmaz, Ö. (2007). Eksenel Yük Altındaki Ortasında Delik Bulunan Kompozit Levhada Değişik Sıcaklıklarda Oluşan Gerilmelerin Deneysel ve Sonlu Elemanlar Analizi ile İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, GAZİ ÜNİVERSİTESİ Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Yıldırım, M. (2007). Bazı Ortotropik Plakların Sonlu Farklar Yöntemi ile Çözümü, Yüksek Lisans Tezi, İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Zhu, S., Jiang, B. and Cao, W. (1998). Characterization of piezoelectric materials using ultrasonic and resonant techniques. Medical Imaging 1998: Ultrasonic Transducer Engineering. 25-26 February. Bellingham, Washington: Society of Photo-optical Instrumentation Engineers, 154-162.



T.C.

NECMETTİN ERBAKAN ÜNİVERSİTESİ

Eğitim Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü,
ÖZGEÇMİŞ

| | | | |
|----------------|---------------|-------|--|
| Adı Soyadı: | Hüseyin İŞLER | İmza: | |
| Doğum Yeri: | Ereğli | | |
| Doğum Tarihi: | 21.05.1985 | | |
| Medeni Durumu: | Evli | | |

Öğrenim Durumu

| Derece | Okulun Adı | Program | Yer | Yıl |
|--|---|-------------------|---------|------|
| İlköğretim | Ayrancı İlkokulu | | Karaman | 1996 |
| Ortaöğretim | Bifa Ortaokulu | | Karaman | 1999 |
| Lise | Y. Dil Ağırlıklı Lise | Fen Bilimleri | Karaman | 2003 |
| Lisans | Selçuk Üniversitesi | Fizik Eğitimi ABD | Konya | 2008 |
| Yüksek Lisans | Necmettin Erbakan Ü. | Fizik Eğitimi BD | Konya | 2015 |
| Becerileri: | | | | |
| İlgi Alanları: | Sinema, Matematik, Tarih | | | |
| İş Deneyimi: | Karaman M Tipi Kapalı Açık CİK, İnfaz ve Koruma Memuru | | | |
| Aldığı Ödüller: | Selçuk Üniversitesi Onur Belgesi | | | |
| Hakkında bilgi almak için önerebileceğim şahıslar: | Doç. Dr. Hatice GÜZEL Prof. Dr. Mesut UYANER Yrd. Doç. Dr. İmran ORAL | | | |
| Tel: | 05067357459 | | | |
| Adres: | Karaman M Tipi Kapalı-Açık Ceza İnfaz Kurumu, KARAMAN | | | |