

Ultrasonik yöntemle ve mekanik deneylerle belirlenen malzeme sabitlerinin karşılaştırılması

Hatice Güzel ^{a,1}, Ersin Bozkurt ^{b,2,*}

^a Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi, Eğitim Fakültesi, Fen Bilgisi Eğitimi ABD, Karaman

^b Necmettin Erbakan Üniversitesi, Ahmet Keleşoğlu Eğitim Fakültesi, Fizik Eğitimi ABD, Konya

MAKALE BİLGİSİ

Makale Geçmişi

Geliş 10 Şubat 2022

Revizyon 21 Mart 2022

Kabul 28 Mart 2022

Anahtar Kelimeler

Kompozit malzemeler

Poisson oranı

Young modülü

Ultrasonik yöntem

Çekme testi

ÖZ

Bu araştırma, E-cam/epoksi ve Karbon/epoksiden oluşan ortotropik kompozit malzemelerde ultrasonik yöntem ve çekme testi deneyi ile ölçülen Young modülleri ve Poisson oranlarının karşılaştırılması amacıyla yapılmıştır. E-cam/epoksi ve Karbon/epoksi kompozit malzemelerin bilgileri bir firmaya verilmiş, kompozit malzemeler bu firmaya standartlara uygun olarak üretilmiştir. Ultrasonik hız ölçümleri için 5800PR ultrasonik pulse generator-receiver device ve GW Instek GDS-2062 model 60 MHz dijital oscilloscope kullanılmıştır. Çekme testi deneyi için Instron 3520 cihazı kullanılmıştır. Ultrasonik yöntemle ve çekme testi deneyi ile elde edilen sonuçlara göre en yakın oran %92 ile Karbon/epoksi kompozit malzemenin E2 Young modülü değeri olmuştur. Yine bir diğer en yakın oran %88 ile E-cam/epoksi kompozitin E1 Young modülü değeri olmuştur. E-cam/epoksi kompozitin Poisson değeri ise %72 oranında benzer bulunmuştur. Çekme testi yöntemi tahribatlı bir yöntem, ultrasonik yöntem ise tahribatsız bir yöntemdir. Araştırmada bu iki yöntem ile elde edilen Young modülü ve Poisson oranı değerleri birbiriyle uyumaktadır. Çekme testi yöntemi ultrasonik yöntemle göre daha zor ve titizlik gerektiren çalışmalar içermektedir. Çekme testi deneyi sonunda plakalar oldukça zarar görebilmektedir. Bu sonuçlar göz önüne alındığında ultrasonik yöntemin tahribatlı yöntem olan çekme testi deneyine göre daha avantajlı ve ucuz bir yöntem olduğu söylenebilir.

Research Article

Comparison of material constants determined by ultrasonic method and mechanical experiments

ARTICLE INFO

Article History

Received 10 February 2022

Revised 21 March 2022

Accepted 28 March 2022

Keywords

Composite materials

Poisson ratio

Young's modulus

Ultrasonic method

Tensile test

ABSTRACT

This research was carried out to compare Young's modulus and Poisson's ratios measured by ultrasonic method and tensile test experiment in orthotropic composite materials consisting of E-glass/epoxy and Carbon/epoxy. Information about E-glass/epoxy and Carbon/epoxy composite materials has been given to a company. We got the company produced the composite materials in accordance with standards. 5800PR ultrasonic pulse generator-receiver device and GW Instek GDS-2062 model 60 MHz digital oscilloscope were used for ultrasonic velocity measurements. Instron 3520 device was used for the tensile test. According to the results obtained by ultrasonic method and tensile test, the closest ratio was E2 Young's modulus of Carbon/epoxy composite material with 92%. Yet another closest ratio was the E1 Young's modulus value of the E-glass/epoxy composite with 88%. The Poisson value of the E-glass/epoxy composite was found to be similar at a rate of 72%. The tensile test method is a destructive method, while the ultrasonic method is a non-destructive method. In the study, Young's modulus and Poisson's ratio values obtained with these two methods agree with each other. The tensile test method involves more difficult and meticulous work than the ultrasonic method. At the end of the tensile test, the plates can be quite damaged. Considering these results, it can be said that the ultrasonic method is a more advantageous and cheaper method than the tensile test, which is the destructive method.

1. Giriş

Malzemelerin yapı ve özelliklerinin incelenmesine malzeme muayenesi denmektedir. Tahribatsız ve tahribatlı muayene olmak üzere iki yöntemi vardır. Tahribatlı yöntemlerle malzemelerin kalite kontrolünün yapılması

malzemelere çok zarar vermektedir. Çekme testi deneyi malzemelerin kalite kontrolünün yapıldığı mekanik ve tahribatlı deneylerden biridir. Malzemelerin esneklik sabitlerinin hesaplanması ve mekanik özelliklerinin belirlenmesinde çekme testinden yararlanılır. Mühendislik hesaplamalarında çekme testiyle bulunan sonuçlar

* Sorumlu Yazar

E-posta adresleri: ebozkurt@erbakan.edu.tr (E. Bozkurt), haticeguzel95@gmail.com (H. Güzel)

¹ ORCID: 0000-0001-5678-4447

² ORCID: 0000-0001-9079-6847

kullanılmakta fakat malzemeler bu işlem sırasında çok zarar görmektedir.

Mekanik testlerde malzemeler zarar görmeye birlikte işlemler uzun zaman almakta, yöntem her malzemede kullanılamamakta ve ekonomik olmamaktadır. Bu nedenle tahribatlı muayene yöntemleri zorunlu şartlar dışında artık çok tercih edilmemektedir. Tahribatlı testlerin oluşturduğu riskleri ortadan kaldırmak amacıyla teknolojiye "Tahribatsız Muayene" denilen bir ölçme yöntemi geliştirilmiştir. Malzemeyi tahrip etmeden ve üretim akışını engellemeden en ekonomik şekilde kalite kontrolü tahribatsız malzeme muayene yöntemleri ile yapılmaktadır. "Tahribatsız Muayene (TM)", bir malzemeye zarar vermeden, o malzemenin özellikleri hakkında bilgi veren malzeme muayene yöntemlerini tanımlamak için kullanılmaktadır. TM' de temel prensip, test edilen bir malzeme parçasındaki hataların ortaya çıkarılmasıdır. Malzemelerin imalatı esnasında veya belli bir süre kullanıldıktan sonra malzemelerde oluşan çatlak, içyapılarında oluşan boşluk ve hataların tespiti tahribatsız muayene yöntemi ile yapılmaktadır (Tuncel, 1987). Bu işlemlerde, malzemelerden herhangi bir örnek almaya gerek yoktur. Testler doğrudan incelenecek malzeme üzerinde yapılır. Bu şekilde parçaların % 100 muayenesi yapılabilmektedir. Hızlı olmaları, kısa sürede sonuç alınabilmesi, tüm verilerin ve sonuçların bilgi-işlem sistemlerinde korunabilmesi tahribatsız yöntemlerin tercih edilmesine neden olmaktadır (Oral, 2011).

Tahribatsız muayene yöntemlerinden en çok kullanılan yöntem "Ultrasonik Test" yöntemidir. "Ultrasonik Test" yöntemi, mekanik parametrelerin ve mikro yapının belirlenmesinde kullanılan tahribatsız muayene yöntemlerinden biridir. Aynı zamanda malzeme kalınlıklarının ölçülmesi, yüzey düzgünlüğü ve çatlak kontrolü de ultrasonik yöntemle yapılabilmektedir. Test yapılan malzemeye zarar vermemesi ultrasonik yöntemin en önemli özelliğidir. Bu özelliğinden dolayı özellikle tıp alanında kullanımı oldukça yaygındır (Deniz, 2005). Ultrasonik dalgalar ve mekanik titreşimler malzemenin esneklik sınırının altında olduğundan malzemeye zarar vermeden işlemler yapılabilmektedir. Bu özelliğinden dolayı ultrasonik muayene yöntemi pek çok alanda kullanılmaktadır (Lee ve Suen, 1990). Ultrasonik muayene, 20000 Hz. frekans üzerinde ses dalgaları ile yapılan bir yöntemidir. Bir başka ifadeyle ultrasonik muayene yöntemi, ultrasesin malzeme içinden geçerken malzeme parçacıkları ile etkileşerek sönümlenmesi, saçılması ve yansımaları olaylarına dayanmaktadır (Abi, 2007). Bu yöntemde, piezoelektrik kristal tarafından üretilen ultrases dalgalarının malzeme içinde yayılması ile malzeme hakkında bilgiler elde edilir. Ultrases, prob ile oluşturulan, yayıldığı ortama göre boyuna, enine veya bu ikisinin bileşimi (Yüzey, Lamb, Stoneley ve Sezawa dalgaları) şeklinde olan ve sadece maddesel ortamlarda yayılabilen, dalgalardır. Ultrases dalgaları insan kulağı tarafından algılanamaz fakat bazı hayvanlar ve elektronik cihazlar ile algılanabilir. Ultrases dalgaları 20 kHz ile 1GHz aralığında frekansa sahip mekanik dalgalardır (Okkay, 2007; Oral, 2011).

Ultrases dalgalarının malzeme içinde zayıflamasından, hareket hızlarından, ara yüzeylerden veya hatalardan yansımalarından (darbe-yankı) yöntemi ile veya ultrases dalgalarının karşı yüzeye geçiş şekline (transmisyon) yöntemi ile malzemeler hakkında bilgiler elde edilebilir. Yansıyan veya geçiş yapan ultrases dalga enerjisinden malzemelerdeki hatalar veya malzeme özellikleri hakkında bilgiler elde edilebilir. Yansıyan ultrases enerjisi miktarı, yansıtıcının yüzey yapısına ve malzemenin metalurjik yapısına bağlıdır. Metal - gaz ara yüzeylerinde hemen hemen

tam yansıma, metal - sıvı veya metal - katı ara yüzeylerinde ise kısmi yansıma oluşmaktadır. Ultrasonik yöntemin en önemli bileşeni olan ultrases, malzeme yapısının ve kalitesinin belirlenmesi, kimyasal reaksiyonların hızlandırılması, sert maddelerin işlenip delinmesi, metallerin ince toz haline getirilmesi, meşrubat sanayisinde, biranın yabancı mayalardan arıtılması, sütün sterilize edilmesi gibi birbirinden farklı birçok alanda kullanılmaktadır (Güzel, 1996).

1.1. Ultrasonik test yöntemleri

Ultrasonik dalgalar iki ortamı ayıran yüzeye geldiklerinde gelen ultrasonik dalgaların bir kısmı geldikleri ortama yansıtılırken, diğer kısmı ikinci ortama geçerek yayılmaya devam eder. Ultrasonik testte yansıyan dalgaların kullanıldığı yöntem darbe-yankı (Puls-Eko) yöntemi, iki yüzey arasında geçiş yapan ultrases dalgalarının kullanıldığı yöntem de doğrudan iletim (transmisyon) yöntemi denir (Kökdemir, 2007).

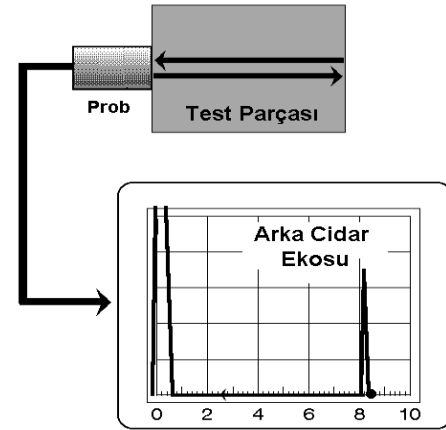
1.2. Darbe-Yankı yöntemi

Darbe-Yankı yöntemi malzemelerin ultrasonik muayenelerinde en tercih edilen ve kullanılan yöntemdir. Prob tarafından gönderilen ultrases dalgaları malzeme içinde hatalara ve süreksizliğe çarptıktan sonra tekrar proba yansır sistem bu şekilde çalışır.

Bu yöntemde, tek kristalli veya çift kristalli prob kullanıldığı gibi, iki ayrı prob da kullanılabilir. İki prob kullanıldığında, probun malzemeye aynı yüzey üzerine temas ettirilir. Bir prob ultrasesi gönderirken diğer prob ultrasesi algılar. Ultrases dalgası piezoelektrik bir transduser (prob) ile oluşturulur. Transduser malzemenin birbirine paralel olan düz yüzünün herhangi birine temas ettirilir (Güzel, 1996).

Cihaz ekranı malzemenin test edilen konumdaki kalınlığını kapsayacak şekilde tek veya çift kristalli probun kullanıldığında kalibrasyon yapılmalıdır. Hatanın olması ve konumu, arka cidar yankısından önce algılanan yankının varlığı ve konumu belirlenir. Bu yöntemde ultrasesin malzeme içinde aldığı mesafe (veya zaman) ve yankı genliği ölçülen büyüklüklerdir (Berke ve Hoppenkamps, 1992).

Darbe-yankı yönteminin çalışma prensibi Şekil 1' de gösterilmiştir



Şekil 1. Darbe-Yankı yönteminde kullanılan sistem.

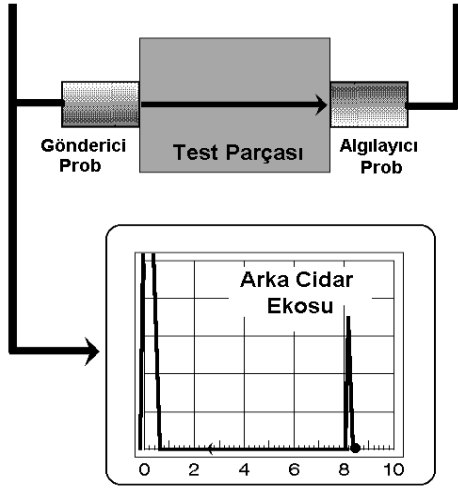
Ultrasonik darbe-yankı yöntemi genellikle ultrasonik hız ve absorpsiyon ölçümlerinin yapılması ile esneklik (Young)

modülünü bulmak, mikroyapı karakterizasyonunu ve mekanik özelliklerini bulmak için kullanılır (Ataş, 2000).

1.3. Doğrudan iletim yöntemi

Bir ultrases dalgasının test malzemesi içerisinde geçiş zamanı, malzemenin bir yüzeyine ultrases vericisi bir transduser ve karşı yüzeyine alıcı transduser yerleştirilerek ölçülür. Bu yöntemde, yansıyan ultrases dalgası dikkate alınmaz. Hatalar, test edilecek malzeme parçasını geçen ultrases genliğinin azalması ile belirlenir. Malzemeyi geçen ultrases dalga demetinin genliği ölçülerek, malzemenin iç yapısı hakkında bilgi edinilir. Bu yöntem, hataların büyük bulunduğu dökümlerin testinde çok kullanılmaktadır. Yöntem, hatanın büyüklüğünü ve derinliğini vermez. Yöntemin en önemli avantajı, ultrases tek geçiş yaptığından ve geriye yansımadağından zayıflama etkisinin yarıya inmesidir. Ultrasesin geçiş süresi nedeniyle iletim (transmisyon) sinyali diğer yansıtıcı sinyallerden kolayca ayırt edilebilmektedir (Beköz, 2006).

Doğrudan iletim yönteminde kullanılan sistem Şekil 2'de gösterilmektedir.



Şekil 2. İletim yönteminde kullanılan sistem.

Doğrudan iletim yöntemi sadece absorpsiyon sinyal ölçümlerini içerir (Ataş, 2000). Malzeme içerisinde süreksizlik veya hata yoksa gönderilen ultrases dalgasının çoğu karşı tarafa iletilir. Bu durumda osiloskop ekranında oluşan atmaların genlikleri eşit olur. Fakat malzeme içinde süreksizlik varsa verilen ultrases dalgasının bir kısmı absorblanacağı için alıcı transduser ultra ses dalgasının belli oranını algılamayacağı için ekranda oluşan atmaların genliklerinde düzensizlikler oluşur.

Ultrases dalgalarının bir ortamdaki yayılma hızları bulunarak, o ortamın esnekliği hakkında bilgi edinilebilir. Ortamın yapısına ve esneklik özelliklerine göre ultrasesin ortamdaki yayılma hızı da değişmektedir.

1.4. Malzemelerin mekanik özellikleri

Malzemelerin mekanik özellikleri oldukça önemlidir. Malzemeler kullandıkları yapı ve alanlarda maruz kaldıkları etkilere karşı dirençli olmalı her türlü yüke dayanabilmelidir. Bu da kullanılan malzemelerin mekanik özelliklerine bağlıdır (Yılmaz ve Altıntaş, 1997).

Esneklik Katsayıları: Malzemelerin esneklik özellikleri gerilme (zor, stress) ve gerinme (zorlanma, strain) kavramlarıyla tanımlanır.

Zor, gerilme (σ): Birim alana düşen iç kuvvete gerilme (zor, stress) denir. Cismin belirli bir yüzeyindeki gerilmenin, 'normal gerilme' ve 'kayma gerilmesi' olmak üzere iki bileşeni vardır.

x, y ve z eksenleri üzerindeki yüzeye dik normal gerilmeler $\sigma_{x(1)}$, $\sigma_{y(2)}$ ve $\sigma_{z(3)}$ ile gösterilmektedir yz; xz ve xy düzlemler üzerindeki yüzeye paralel kayma gerilmeleri ise $\sigma_{xy}(\tau_{xy})$, $\sigma_{xz}(\tau_{xz})$; $\sigma_{yx}(\tau_{yx})$, $\sigma_{yz}(\tau_{yz})$ ve $\sigma_{zx}(\tau_{zx})$, $\sigma_{zy}(\tau_{zy})$ ile gösterilmektedir (Tatar, 2011). Gerilmenin birimi (SI) sisteminde (N/ m²) yani Pascal (Pa) dır.

Zorlanma, gerinim (ϵ): Malzemenin birim yüzeyinde meydana gelen şekil değişikliğine zorlanma denir ve ϵ ile gösterilir.

Malzemelere uygulanan gerilim sonucunda malzemelerin akışkan özellik göstermesi ile boyutlarında değişme olmasına zorlanma denir.

$$\text{Esneklik} = \frac{\text{Zor}}{\text{Zorlanma}} \quad (1)$$

Young Modülü: Malzemelerdeki gerilmenin gerinime (zorlanmaya) oranına Young modülü (esneklik modülü) denir ve eşitlik (2) ile gösterilir.

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

Esneklik modülü ne kadar büyükse malzemenin rijitliği (elastik şekil değiştirmeye karşı direnci) de o oranda büyük olur. E değeri bir ısıl veya mekanik işlem yoluyla değiştirilemez Young modülünün değerinin büyük olması atomlararası bağların kuvvetli olduğunu gösterir. Aynı zamanda gerilim ve basınca karşı daha fazla dayanıklı olur. Bu sabitin küçük olduğu doğrultularda, malzemenin elastik deformasyonu daha çabuk gelişir (Güleç, 1980).

Poisson Oranı: Poisson oranı (ν_{ij}); bir esnek cisme i-

doğrultusunda σ gerilmesi uygulanmış olsun ($\sigma_i = \sigma$ diğer bütün gerilmeler sıfır), i-doğrultusundaki uzama ile birlikte j-doğrultusunda yanıl daralma meydana gelir. Poisson oranı j-doğrultusunda meydana gelen şekil değişiminin (ϵ_{jj}) negatifinin i-doğrultusunda meydana

gelen şekil değişimine (ϵ_{ii}) oranına denir (Jones, 1998). Poisson oranı eşitlik (3) ile gösterilir.

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

Kayma (Kesme) Modülü: Malzemelerin atom düzlemlerinin birbiri üstünde kaymasıyla oluşan hareket karşı gösterdiği direncin ölçüsüne kayma modülü denir.

Kayma gerilmesinin kayma gerinmesine (zorlanmasına) oranına kayma (kesme) modülü denir. Kayma modülü G ile gösterilir. ij düzlemindeki kayma modülü G eşitlik (4) ile gösterilir.

$$G_{ij} = \frac{\sigma_{ij}}{\epsilon_{ij}} \quad (i \neq j; i, j=1, 2, 3) \quad (4)$$

Katı cisimlerin burulmaya karşı direnci yüksek ise (G) kayma modülü değerleri de yüksek olur (Güleç, 1980).

1.5. Hooke kanunu ve esneklik katsayıları

Bir cisme esneklik sınırını aşmayacak büyüklükte ve cisimde kalıcı deformasyon oluşturmayacak bir kuvvet etki ettiğinde bu kuvvet ile oluşan deformasyon orantılı olur. Buna Hooke Kanunu denir. Hooke Kanunu eşitlik (5) gösterilir (İşçi, 1978).

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \cdot \epsilon_{kl} \quad (i, j, k, l=1, 2, 3) \quad (5)$$

Ortotropik malzemelerin yoğunlukları, esneklik katsayıları, ultrasonik dalga hızları ve mekanik özellikleri arasındaki bağıntılar eşitlik (6) ve eşitlik (7) ile gösterilir (Mistou ve diğ., 1999):

$$\begin{aligned} C_{11} &= \rho \cdot V_{11}^2, & C_{44} &= \rho \cdot V_{23}^2 \\ C_{22} &= \rho \cdot V_{22}^2, & C_{55} &= \rho \cdot V_{13}^2 \\ C_{33} &= \rho \cdot V_{33}^2, & C_{66} &= \rho \cdot V_{12}^2 \end{aligned} \quad (6)$$

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

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

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

$$D = C_{11} \cdot C_{22} \cdot C_{33} - C_{11} \cdot C_{23}^2 - C_{22} \cdot C_{13}^2 - C_{33} \cdot C_{12}^2 + 2 \cdot C_{12} \cdot C_{13} \cdot C_{23}$$

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

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

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

$$G_{23} = C_{44}, \quad G_{13} = C_{55}, \quad G_{12} = C_{66}$$

$$v_{23} = \frac{-E_2(C_{12} \cdot C_{13} - C_{23} \cdot C_{11})}{D}, \quad (7)$$

$$v_{13} = \frac{-E_1(C_{12} \cdot C_{23} - C_{13} \cdot C_{22})}{D}$$

$$v_{12} = \frac{-E_1(C_{13} \cdot C_{23} - C_{12} \cdot C_{33})}{D}$$

Malzemelerin Young modülleri (E1, E2, E3), Poisson oranları (v13, v12, v23) ve enine dalga kayma modülleri (G12, G13, G23) eşitlik (6) ve eşitlik (7) kullanılarak hesaplanır (Mistou ve diğ., 1999).

Farklı malzemeler bir araya getirilerek kompozitler üretilir. Kompozit malzemeler dayanıklılığı yüksek aşınmalara karşı dirençli ve daha hafif malzemelerdir. Karbon elyaf/Epoksi, Cam elyaf/Polyester ve Aramid elyaf/Epoksi kompozit malzemeler tercih edilen kompozitlerdir. Kompozit malzemeler otomotiv sanayisinde, havacılık endüstrilerinde ve teknelerin imalatında kullanılmaktadır. Hafiflikleri ve sağlamlıkları nedeniyle kompozit malzemelerin günümüzde kullanımı git gide artmaktadır. Plastik malzemelerin sert polimer elyaflarla, metallerle ve seramiklerle katılanmasıyla faydalı pek çok ürün elde edilmektedir. Plastik içeren malzemeler katılan elyafların etkisiyle kolay şekil verilen hafif ve aynı zamanda sert olan yapıları nedeniyle pek çok alanda kullanılmaktadır. Aynı zamanda fiberlerle katılanarak polimer matrisli kompozit malzemeler üretilebilmekte farklı sektörlerde kullanılabilmektedir. Karbon elyaf veya cam elyaf katkılı plastik kompozit malzemeler metallere göre dayanıklılık/ağırlık oranlarının büyük olması, korozyona karşı dirençli olmaları gibi özellikleri nedeniyle askeri alanlarda, taşımacılık ve inşaat sektörlerinde çokça kullanılmaktadır (Kaya ve Kılınç, 2008).

Elyaf katkılı kompozitler arasında en çok kullanılanı cam elyaf kompozit malzemelerdir. Cam elyaf malzemelerin Young modülleri, darbe ve çekme dayanımları yüksektir (Mallick, 1993). Yeni geliştirilen kompozit yapılarda karbon, bor, karbür, aramid ve silisyum fiber elyafların kullanımı yaygınlaşmaktadır. Young modüllerinin yüksek olması,

dayanıklı olmaları aynı zamanda yüksek sıcaklıklara karşı dirençli olmaları nedeniyle karbon elyaflar özellikle uzay ve uçak sektöründe kullanılan kompozitlerdendir.

Elyaf yönelimlerine bağlı olarak kompozit malzemelerin mekanik özellikleri değişebilmektedir. Cisimlerin Young modülü'nün yüksek olduğu yönlerde basınç ve gerilime karşı dayanıklılıkları artmaktadır. Buna karşın Young modülü'nün küçük olduğu yönlerde malzemelerin bozulması kolaylaşmaktadır. Esneklik modülü arttığında atomların arasındaki bağ kuvvetlenmekte, esneklik modülü azaldığında da atomlar arasındaki bağlar zayıflamaktadır. Malzemelerin atom ve molekülleri arasındaki bağ kuvvetleriyle ilgili bilgiler malzemelerin esneklik özelliklerinden öğrenilebilir.

Bu araştırma, E-cam/epoksi ve Karbon/epoksiden oluşan ortotropik kompozit plakalarda Young modülleri ve Poisson oranlarının ultrasonik yöntemle ve çekme testi deneyi ile ölçülmüş sonuçlarının karşılaştırılması amacıyla yapılmıştır.

2. Materyal ve Metot

2.1. Malzemelerin sentezi

Araştırmada (500×500×12,5mm) boyutlarında cam elyaf takviyeli epoksi kompozit plakalar ve cam elyaf takviyeli epoksi kompozit plakalar kullanılmıştır. Bu plakalar İzoreel Kompozit Malzemeler San. ve Tic. Ltd. Şti.' de ürettirilmiştir. Malzemelerde matris malzemesi olarak iki yapay reçinenin karışımı kullanılmıştır. Üretilen E-cam elyaf ve Karbon elyafının özellikleri tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1

Epoksi reçine ve elyaflara ait özellikler.

Özellikler	Epoksireçine	E-Cam Elyaf	Karbon Elyaf
Çekme Mukavemeti (MPa)	70-80	2400	4200
Esneklik Modülü (GPa)	3,5	73	240

Tablo 1'deki özelliklere sahip kompozit malzemelerin üretimi şu şekilde olmuştur. 100/80 oranında EPR840 ve EPH875 epoxy reçine karıştırılmıştır. Bu karışım 70 OC üstünde ısıtılmış böylece matris elemanları elde edilmiştir. 50 adet tabaka E-cam epoksi kompozit, 49 adet tabaka karbon epoksi kompozit arasına rulo ile reçine uygulanarak üst üste istiflenmiştir. Kompozitin kalınlığı 12,5 mm oluncaya kadar sıcak pres altına konulmuş ve yaklaşık 0.3 MPa basınç altında sıkıştırılıp daha sonrada 120 OC' de 4 saat preste tutularak kürlendirilmiştir.

2.2. Ultrasonik hız ölçümleri

Araştırmada 5800PR ultrasonic pulse generator-receiver devic ve GW Instek GDS-2062 model 60 MHz dijital oscilloscope kullanılmıştır. Hız ölçümleri için 5 MHz Boyuna prob ve 2,25 MHz Enine problemleri kullanılmıştır. Enine ultrasonik dalga hız ölçümleri için doğrudan iletim (Transmisyon) yöntemi, boyuna ultrasonik dalga hız ölçümü için darbe-yankı (puls-eko) yöntemi kullanılmıştır. Ultrasonik hız büyüklüklerinin ölçümleri eşitlik (8) ile hesaplanmıştır.

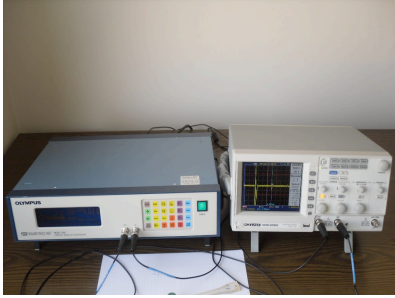
$$V = \frac{2d}{\Delta t} \quad (8)$$

Burada d malzemenin kalınlığını, Δt geçiş zamanını göstermektedir. Ultrasonik enine dalga hız değerleri hesaplanırken 2d yerine 1 d kullanılmıştır (doğrudan iletim yöntemi olduğu için). Bu hız değerlerinin ölçümleri direk

kontakt tekniği ile yapılmıştır. Yansımaları minimuma indirmek ve aynı zamanda sesin kolay iletimi için malzeme ve ultrasonik transduser arasında sıvı kuplaj maddesi uygulanır (Güzel, Oral ve İşler, 2019).

2.3. Ultrasonik hız ölçümü için kullanılan cihazlar

Hız ölçümü darbe-yankı yöntemi ve doğrudan iletim yöntemi ile yapılmıştır. Malzemelerde boyuna ve enine ultrases dalgalarının hız büyüklüklerini ölçmek için şekil 3’ de görülen düzenek kurulmuştur. Ultrasonik darbe-yankı yöntemiyle yapılan hız ölçümleri ve Archimedes prensibinden yararlanılarak ölçülen yoğunluk değerleri kullanılarak esneklik katsayıları hesaplanmıştır.



Şekil 3. Ultrasonik hız ölçümünde kullanılan düzenek.

Araştırmanın ikinci kısmında malzeme sabitlerini ölçmek için mekanik deneylerden Çekme Testi ile deneyler yapılmıştır.

2.4. Çekme testi

Bu araştırma kapsamında E-cam/elyaf/epoksi ve Karbon/elyaf/epoksi kompozitlerin elyaf yönünde ve elyaf yönüne dik doğrultuda çekme dayanımı, Young modülleri ve Poisson oranları çekme testi ile de hesaplanmıştır.

Çekme testinde hazırlanan deney örneklerinin iki ucu deney setindeki çeneler arasına sıkıştırılmaktadır. Malzemenin bir ucu sabitleştirilir diğer ucu belirli bir hızla çekilerek malzemeler gerdirilir. Gerdirme tek yön ve belirli hızda malzeme kopuncaya kadar yapılır. Bu işlem sırasında giderek artan kuvvet altında malzemenin uzama miktarları tespit edilir (Karabulut,2019; Savaşkan, 1999).

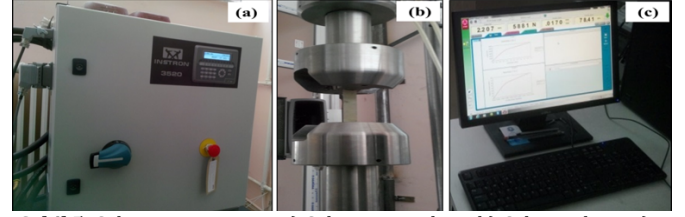
Araştırmada elyaf yönelimi x(1) yönü olarak seçilmiştir E-cam/elyaf/epoksi ve Karbon/elyaf/epoksi kompozitler x(1) yönünde dizilerek 3 mm kalınlıklı plakalar elde edilmiştir. Çekme testi ile malzemelerin çekme ve kopma mukavemetleri, Young modülleri ve Poisson oranları belirlenmiştir (Güzel, Karabulut ve Oral, 2020). Teste hazır numuneler şekil 4 de görülmektedir.



Şekil 4. Çekme testi deneyinde kullanılan çekme testi malzemeleri.

2.5. Çekme testi deneyi için kullanılan cihazlar

Çekme testi için Instron 3520 cihazı kullanılmıştır. Sistem, çekme testi cihazı Instron 3520 (Şekil 5-a),malzemelerin çekilmesi işlemi (Şekil 5-b) ve çekme testini kontrol eden ve verileri kaydeden yazılımı içeren masaüstü bilgisayardan oluşmaktadır (Şekil 5-c).



Şekil 5. Çekme testi sistemi: a) Çekme testi cihazı, b) Çekme işlemi, c) Yazılım yüklü bilgisayar (Güzel, Karabulut ve Oral, 2020).

3. Bulgular

Bu bölümde E-cam/epoksi ve Karbon/epoksi kompozit malzemelerin ultrasonik yöntem ile ve çekme testi ile elde edilen esneklik katsayıları sırasıyla aşağıda verilmiştir.

3.1. Ultrasonik yöntem ile elde edilen değerler

E-cam elyaf katkılı epoksi kompozit ile Karbon elyaf katkılı epoksi kompozit malzemelerin ölçülen yoğunluk (ρ) değerleri, (kg m^{-3}) cinsinden Tablo 2. de sunulmuştur.

Tablo 2

Kompozit malzemelerin yoğunluk (ρ) değerleri (İşler, 2015).

Kompozitler	ρ (kg m^{-3})
E-cam/epoksi	1802.87
Karbon/epoksi	1506.07

Tablo 2’ verilerine göre yoğunluğu $1100 \text{ (kg m}^{-3}\text{)}$ olan epoksi matris içerisine E-cam elyaf ilave edildiğinde yoğunluk $1802.87 \text{ (kg m}^{-3}\text{)}$, karbon elyaf ilave edildiğinde ise yoğunluk $1506.07 \text{ (kg m}^{-3}\text{)}$ değerlerine ulaşılmıştır.

3.2. Ultrasonik dalga hız değerleri

Her iki malzeme için ultrasonik darbe-yankı yöntemi ile ölçülen x(1), y(2) ve z(3) doğrultularındaki boyuna ultrasonik ses dalga hız değerleri (V_{11}, V_{22}, V_{33}), ve doğrudan iletim yöntemi ile ölçülen enine ultrasonik ses dalga hız değerleri (V_{12}, V_{13}, V_{23}) ve üç farklı 45° ’lik açıyla kesimden ölçülen enine ultrasonik ses dalga hız değerleri (V_{s1}, V_{s2}, V_{s3}), m s^{-1} cinsinden Tablo-3’de sunulmuştur.

Tablo 3

Malzemelerin farklı yüzeylerinden ölçülen ultrasonik ses dalgası hız değerleri.

Hız değerleri (m s^{-1})	E-cam/epoksi	Karbon/epoksi
V_{11}	4520	8674
V_{22}	3098	2898
V_{33}	2165	2490
V_{12}	1812	1694
V_{13}	1460	1662
V_{23}	1272	1299
V_{s1}	1426	1411
V_{s2}	1648	2047
V_{s3}	2253	2183

Tablo-3 verilerine göre E-cam/epoksi kompozit malzemenin x doğrultusundaki boyuna ultrasonik ses dalga hızı 4520 m s^{-1} iken y doğrultusunda 3098 m s^{-1} ve z doğrultusunda ise 2165 m s^{-1} ye düşmüştür. Karbon/epoksi kompozit için ise; x doğrultusundaki boyuna ultrases dalga

hızı 8674 m s⁻¹ iken y doğrultusunda 2898 m s⁻¹ ye ve z doğrultusunda ise 2490 m s⁻¹ ye düşmüştür. Görüldüğü gibi, her iki kompozit malzemede de boyuna ultrasonik ses dalga hızı en büyük x doğrultusunda en küçük ise z doğrultusunda çıkmıştır.

Her iki kompozit malzemede ölçülen ultrasonik dalga hızları ve yoğunluk değerleri eşitlik (6) da yerine yazılarak esneklik katsayıları hesaplanmıştır. İki malzemenin Young modülünü hesaplamak için D parametre değerleri eşitlik (7) den bulunmuştur.

Aynı şekilde malzemelerin ölçülen yoğunluk ve ultrasonik hız değerleri eşitlik (6) da yazılarak malzemelerin kayma modülü değerleri (G₁₂, G₁₃, G₂₃) hesaplanmıştır. Bu araştırmada kullanılan malzemeler ortotropik yapıda olduklarından üç farklı yönde kayma modülleri vardır.

Malzemelerin x(1), y(2), z(3) yönlerinde hesaplanan esneklik (Young) modülleri Tablo 4 'de sunulmuştur.

Tablo 4

E-cam/Epoksi kompozit ve karbon/epoksi kompozit için x (1), y (2) ve z (3) yönlerinde young modülü (E₁, E₂, E₃) 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

Tablo4 verilerine göre, E-cam/epoksi kompozit malzemenin Young modülleri x (1) doğrultusunda 33.51 GPa, x (2) doğrultusunda 14.94 GPa ve z (3) doğrultusunda ise 7.00 GPa'değrinde hesaplanmıştır. Karbon/epoksi kompozitin ise Young modülleri x (1) doğrultusunda 101.59 GPa, y (2) doğrultusunda 9.38 GPa ve z (3) doğrultusunda ise 7.50 GPa olarak hesaplanmıştır. Bu bulgulara göre, her iki kompozit malzemede de Young modülü değeri en büyük x doğrultusunda, en küçük ise z doğrultusunda çıkmıştır.

Tablo 6

E-cam Elyaf/Epoksi kompozitler için x(1) doğrultusunda elde edilen çekme testi verileri.

Deney No	Uzama (mm)	Maksimum Çekme Kuvveti (N)	Çekme Gerilmesi σ_c (Mpa)	Kopma Gerilmesi σ_k (Mpa)	Esneklik Modülü E ₁ (GPa)
1	3.55	25284	702.35	572.95	30.50
2	3.90	26948	748.58	538.54	29.65
3	4.24	27967	776.89	539.27	29.12
4	4.65	30727	853.53	660.40	28.90
5	4.62	30787	791.19	720.19	29.24
6	4.32	26884	746.80	698.11	27.21
7	4.28	29600	822.23	761.65	31.36
8	4.64	31032	862.00	776.36	28.97
9	4.00	27687	769.10	750.89	30.75
10	4.11	28644	795.67	792.02	30.59
Ort.	4.266364	28753.36	792.8973	695.2091	29.58818
Std.	0.341581	1868.226	48.71922	99.63943	1.10151
Var.	0.116678	3490267	2373.562	9928.017	1.213324

Tablo 6'da elde edilen uzamalar ve maksimum kuvvetler çekme deneyinde kullanılan bilgisayar programından alınan verilerden oluşmuştur. Diğer bulgular hesaplanarak elde edilmiştir. Bu sonuçlara göre ortalama olarak numuneler yaklaşık 4.27 mm uzamıştır. Ortalama maksimum çekme kuvveti 28753 N olarak gerçekleşmiştir. Yapılan hesaplamalar sonucu çekme gerilmesi 792.90 MPa olarak ve

Kompozit malzemelerin hesaplanan Poisson oranı değerleri Tablo 5' de sunulmuştur.

Tablo 5

E-cam/Epoksi kompozit ve karbon/epoksi kompozitin poisson oranları değerleri.

Kompozitler	V ₁₂	V ₁₃	V ₂₃
E-cam/epoksi	0.17	0.50	0.46
Karbon/epoksi	0.92	0.11	0.47

Tablo 5 verilerine göre cam epoksi kompozitin en düşük poisson oranı değeri v₁₂ 0.17 ve en yüksek değeri v₁₃ 0,50 bulunmuştur. Karbon epoksi için en düşük poisson oranı v₁₃ 0,11 ve en yüksek poisson oranı değeri v₁₂ 0,92 bulunmuştur. Her iki kompozit malzeme için en düşük ve en yüksek poisson oranı değerleri farklı yönlerde bulunmuştur. Bu malzemeler farklı yönlerde farklı özellikler göstermektedir.

3.3. Çekme testi ile elde edilen değerler

E-cam elyaf/Epoksi kompozitinde x(1) elyaf doğrultusunda yapılan çekme testi verileri Tablo 6'da sunulmuştur.

kopma gerilmesi ise 695.21 MPa olarak bulunmuştur. Buradan elyaf doğrultusundaki ortalama E₁ değeri 29.59 GPa olarak hesaplanmıştır.

Karbon/epoksi kompozit örneklerinin x(1) doğrultusunda yapılan çekme testi sonuçları Tablo 7'de sunulmuştur.

Tablo 7

Karbon Elyaf/Epoksi kompozitler için x(1) doğrultusunda elde edilen çekme testi verileri.

Deney No	Uzama (mm)	Maksimum Çekme Kuvveti (N)	Çekme Gerilmesi σ_c (Mpa)	Kopma Gerilmesi σ_k (Mpa)	Esneklik Modülü E_1 (GPa)
1	4.08	57323	1592.30	1592.17	78.75
2	3.44	52987	1471.85	1421.57	81.89
3	3.05	44276	1229.88	1173.57	73.81
4	3.64	50830	1411.94	1400.34	71.92
5	2.95	41570	1154.72	1145.25	75.75
6	3.02	48664	1351.79	1351.79	79.18
7	3.30	48748	1354.11	1352.70	68.93
8	2.31	39569	1099.15	1094.11	80.66
9	3.47	51314	1425.37	1389.74	81.68
10	3.24	46845	1301.24	1290.45	69.68
Ort.	3.25	48212	1339.24	1321.17	76.23
Std.	0.47	5363.67	148.99	149.68	4.91
Var.	0.22	28773029.82	22200.16	22406.24	24.14

Tablo 7' de elde edilen uzamalar ve maksimum kuvvetler bilgisayar programından alınan verilerden oluşmaktadır. Diğer bulgular hesaplama ile elde edilmiştir. Bu verilere göre malzemeler 3.25 mm uzamıştır. Maksimum çekme kuvveti 48212 N olarak gerçekleşmiştir. Hesaplamalar ile çekme gerilmesi 1339.24 MPa ve kopma gerilmesi ise 1321.17 MPa olarak bulunmuştur. Elyaf yönündeki E_1 değerinin ortalaması 76.23 GPa hesaplanmıştır.

E-cam/Epoksi ve Karbon/Epoksi Kompozit için x ve y yönlerinde hesaplanan Esneklik Modülü (E_1 ve E_2) değerleri Tablo 8'de sunulmuştur.

Tablo 8E-cam/Epoksi ve Karbon/Epoksi kompozit için x ve y yönlerinde hesaplanan ortalama esneklik modülü (E_1 ve E_2) değerleri.

Kompozitler	E_1 (GPa)	E_2 (GPa)
E-cam/Epoksi	29.59	10.82
Karbon/Epoksi	76.23	8.70

Tablo 8 verilerine, E-cam/epoksi kompozit malzemenin esneklik modülleri x yönünde 29.59 GPa y yönünde 10.82

Tablo 10

Ultrasonik yöntem ve çekme deneyi ile elde edilen esneklik katsayısı değerlerinin karşılaştırılması.

Mekanik özellikler	Çekme Deneyi Sonuçları	UltrasonikYöntem Sonuçları	Karşılaştırma %
E_1 (E-cam/Epoksi) GPa	29.59	33.51	88
E_2 (E-cam/Epoksi) GPa	10.82	14.94	72
ν_{12} (E-cam/Epoksi)	0.236	0.17	72
E_1 (Karbon/Epoksi) GPa	76.23	101.59	75
E_2 (Karbon/Epoksi) GPa	8.70	9.38	92
ν_{12} (Karbon/Epoksi)	0.40	0.92	43

Tablo 10 verileri incelendiğinde ultrasonik yöntemle ve çekme deneyi ile elde edilen sonuçlara göre en yakın oran %88 ile E-cam/epoksi kompozitin E_1 esneklik katsayısı değeri olmuştur. E-cam/epoksi kompozitin E_2 değeri %72 oranında yakın çıkmıştır. E-cam/epoksi kompozitin Poisson değeri (ν_{12}) olarak %72 yakınlıkta bulunmuştur. Karbon/epoksi değerleri incelendiğinde E_1 değeri %75 oranında yakın olduğu görülmektedir. En fazla yakınlık ise %92 ile Karbon/epoksi kompozit malzemenin E_2 değeri olduğu görülmektedir. Karbon/epoksi kompozit malzemenin ν_{12} (Poisson oranı) ise %43 yakın çıkmıştır. Ultrasonik yöntem ile ve çekme testi ile elde edilen sonuçlar birbirlerine uyum sağlamaktadır.

GPa hesaplanmıştır. Karbon/epoksi kompozitin ise esneklik modülleri x yönünde 76.23 GPa. y yönünde 8.70 GPa hesaplanmıştır. Bu bulgulara göre her iki kompozit malzemede de Young modülü değeri x yönünde daha büyük ve y yönünde ise daha küçük bulunmuştur.

Hesaplanan Poisson Oranı (ν_{12}) değerleri Tablo 9'da sunulmuştur.

Tablo 9

Malzemelerin çekme testi ile belirlenen poisson oranı değerleri.

Malzeme	Poisson oranı (ν_{12})
E-cam elyaf/epoksi	0.236
Karbon elyaf/ epoksi	0.40

Tablo 9 verilerine göre E-cam/epoksi kompozitlerin Poisson oranı 0.236, Karbon elyaf/epoksi kompozitlerin Poisson oranı değeri 0.40 bulunmuştur.

Ultrasonik yöntemle ve çekme deneyi elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak Tablo 10'da sunulmuştur.

4. Sonuçlar ve Tartışma

Bu çalışmada, E-cam epoksi ve Karbon epoksi malzemelerin ultrasonik yöntemle ve mekanik deneyle hesaplanan Young modülü ve Poisson oranları karşılaştırılmıştır.

Araştırmada öncelikle ultrasonik yöntemle veriler elde edilmiştir. Tablo 3 verilerine göre E-cam/epoksi kompozit malzemede ve Karbon/epoksi kompozit malzemede boyuna ultrasonik dalga hızı en büyük x yönünde, en küçük ise z yönünde bulunmuştur. Bu araştırma bulgusuna benzer olarak Wrobel ve Pawlak (2006) araştırmalarında Cam elyaf

oranlarına bağlı olarak kompozitlerdeki ultrasonik hız değerlerinin değiştiğini belirlemişlerdir.

Araştırmada Tablo-4 verilerine göre, E-cam/epoksi kompozit malzemenin Young modülleri ve Karbon/epoksi kompozit malzemenin Young modülleri incelendiğinde her iki kompozit malzemede de Young modülü değeri en büyük x yönünde en küçük ise z yönünde çıkmıştır.

Araştırmada elde edilen mekanik özelliklerden bir diğeri Poisson oranıdır. Tablo 5 verilerine göre cam epoksi kompozitin ve karbon epoksi kompozitin en düşük poisson oranı değerleri ve en yüksek poisson değerleri farklı yönlerde bulunmuştur. Bu malzemelerin farklı yönlerde farklı özellikler gösterdiği söylenebilir.

Araştırmada daha sonra veriler çekme testi deneyi ile elde edilmiştir. Cam epoksi ve karbon epoksi kompozitlerin çekme testi ile elde edilen esneklik katsayıları incelendiğinde (Tablo.8) her iki kompozit türünde de x(1) doğrultusunda ölçülen Young modülü (E_1) değerleri (29.59 GPa ve 76.23 GPa), y(2) doğrultusunda ölçülen Young modülü (E_2) değerlerinden (10.82 GPa ve 8.70 GPa) daha yüksek çıkmıştır. Yani fiber yönünde Young modülü büyük değer almış elyaf yönüne dik yönde ise küçük değer almıştır. Bu sonuca göre Young modülü değerlerinin elyaf yönelimine göre değiştiği söylenebilir.

Bu araştırmadan elde edilen sonuçlar aynı malzemelerde Al-Qrimli ve diğ. (2015) tarafından yapılan çekme testi ile elde edilen sonuçlarla uyumludur. Al-Qrimli ve diğ. (2015), karbon elyaf epoksinin Young modülü (E_1) değerini 67 GPa, (E_2) değerini 7.60 GPa, bulmuşlardır.

Alan yazında bu konuda yapılan bir diğeri araştırmada Song (2015), Karbon/cam fiber ve Karbon/aramid fiberlerin değişik dizilimlerini kullanarak ürettiği kompozitlerin çekme deneyindeki özelliklerini araştırmıştır. Kompozitlerin fiber dizilimlerinin farklı olmasının, malzeme özelliklerini etkilediğini ortaya koymuştur.

Araştırmanın en önemli sonuçlarından olan ultrasonik yöntemle ve çekme testi ile elde edilen esneklik katsayılarının karşılaştırma sonuçlarıdır. Tablo. 10 verilerine göre E-cam/Epoksi malzemelerde elyaf yönüne paralel Young modülü E_1 için %88'lik bir uyum olduğu görülmektedir. Elyaf yönüne dik Young modülü E_2 için bu oran %72 olmuştur. Karbon/Epoksi malzemelerde ise elyaf yönüne paralel esneklik modülü E_1 'de %75'lik bir uyum olmuştur. Elyaf yönüne dik E_2 için %92'lik bir uyum elde edilmiştir. Çekme testi ile elde edilen E-cam/Epoksi Poisson oranı değeri ν_{12} 0.236, ultrasonik yöntemle elde edilen E-cam/Epoksi Poisson değeri ν_{12} 0.17 bulunmuştur benzerlik oranını %72' dir. Sonuçlar değerlendirildiğinde Karbon/Epoksi kompozitin Poisson oranı hariç diğeri elde edilen sonuçlar ultrasonik yöntemle elde edilen sonuçlarla uyum sağlamaktadır. Karbon/Epoksi kompozitin Poisson oranının uyumunun düşük çıkmasının Karbon/Epoksi kompozitin fiber diziliminden kaynaklanmış olabileceği düşünülmektedir.

Araştırmada ultrasonik yöntem ile ölçülen değerler ile çekme testi ile ölçülen değerler arasında ortaya çıkan az bir farklılığın nedeninin malzemelerin üretilmesi sürecindeki şartlardan kaynaklanabileceği düşünülmektedir. Ayrıca kompozitlerin üretilmesi esnasında polimer kürleştiği için kürleşmeye bağlı mekanik özelliklerde farklılıkların ortaya çıkabileceği söylenebilir.

Alan yazında bu araştırma bulguları ile benzer bulguya ulaşan araştırmalar mevcuttur. Mistou ve diğ. (1999) yaptıkları araştırmada çekme testi ve ultrasonik yöntemle belirlenen cam fiber kompozit malzemelerin esneklik özelliklerini karşılaştırmalı olarak incelemişlerdir. Her iki yöntemle yapılan ölçümlerin karşılaştırılmasında sonuçların

uyumlu olduğu ultrasonik dalgaların kullanımının güvenilir sonuçlar verdiği ileri sürülmüştür.

Bir diğeri araştırmada Grimberg ve diğ. (2010), ultrasonik yöntem kullanarak karbon fiber takviyeli plastiğin mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Elde edilen değerlerin elektromanyetik testler ve Dinamik Mekanik Analiz (DMA) kullanılarak belirlenen değerlerle uyum gösterdiğini belirlemişlerdir.

Benzer şekilde Adamowski ve diğ. (2008), kompozit malzemelerin esneklik sabitlerinin iletim yoluyla belirlenmesinde geniş diyaframlı (aperture) bir ultrasonik alıcının kullanımını incelemişlerdir. Geniş diyaframlı PVDF alıcıyla esneklik sabit ölçümünün sonuçları, çekme testiyle elde edilen sonuçlarla iyi bir uyum göstermiştir.

Mekanik testlerle esneklik katsayılarının hesaplanması zordur. Ayrıca mekanik testlerin pahalı ve karmaşık test aletleri gerektirmesi, testlerin uzun süre alması gibi birçok olumsuzluğu bulunmaktadır. Ancak tahribatsız muayene metodu olan ultrasonik metotla, esneklik katsayılarının belirlenmesi için sadece malzemenin ultrasonik hızlarının ölçülmesi ve yoğunluk değerinin bilinmesi yeterlidir. Böylece malzemenin esneklik katsayıları kolayca hesaplanabilmektedir. Ayrıca ultrasonik yöntemde deney süresi kısa olduğu için de en pratik yöntemdir.

Sonuç olarak daha ucuz ve kolay ve aynı zamanda da tahribatsız yöntem olan ultrasonik yöntemle malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi tahribatlı ve daha zahmetli yöntem olan ve aynı zamanda malzemeye de zarar veren çekme testi yerine kullanılabilir.

Kaynaklar

- Abi E (2007). *Yapı Seramiklerinde Ultrases Geçim Hızı ile Malzeme Parametreleri İlişkisinin İncelenmesi*. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon Kocatepe Üniversitesi Afyonkarahisar.
- Adamowski JC, Andrade MA, Perez N and Buiochi 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.
- AL-Qrimli HF, Mahdi FA and Ismail FB (2015). Carbon/epoxy woven composite experimental and numerical simulation to predict tensile performance. *Advances in Materials Science*, 4(2), 33-41.
- Ataş E (2000). *TM Al-SiC Kompozitlerin Mikroyapı Özelliklerinin Ultrasonik Tekniklerle Belirlenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Berke M and Hoppenkamps U (1992). Practical training with digital ultrasonic instruments. Krautkrämer Training System, Part 4, 3rd Edition.
- Beköz N (2006). *Ultrasonik Yöntemde Kaynak Hatalarının Optimum Test Parametrelerinin Belirlenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Deniz A (2005). *Alümina Seramiklerinde Tanecik Boyutunun Ultrases ile Belirlenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon.
- Güleç Ş (1980). *Malzeme Ders Notları*. İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi Makina Fakültesi.
- Güzel H (1996). *Transduser Tasarımı ve Sıvı Gıdalarda Ultrasonik Hız Ölçümleri*. Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Güzel H, Oral İ and İşler H (2019). *Measurement of the elastic properties of orthotropic materials by ultrasonic method*.

- Science and Mathematics Research Papers, Chapter 4, Gece kitablığı.
- Güzel H, Karabulut M, and Oral İ (2020). *Determining Elastic Coefficients of Composite Materials by Mechanical Methods*. Multidisciplinary Studies on Recent Advances in Science and Engineering –Experimental and Theoretical Chapter 2, İksad Yayınevi.
- Grimberg R, Savin A, Steigman R, Bruna A, Barsnesco PD and Salavastru DP (2010). Determination of CFRP's mechanical properties using ultrasound methods. *5th International Workshop NDT in Progress, 2009 October 12-14, Prague: CD-ROM*.
- İşçi C (1978). Hekzagonal Kristallerin Esneklik Özellikleri. *Ege Üniversitesi Fen Fakültesi Dergisi, Seri-A, 2 (3), 279-299*.
- İşler H (2015). *Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemelerin Esneklik Katsayılarının Ultrasonik Ölçümü*, Yüksek Lisans Tezi, Necmettin Erbakan Üniversitesi Eğitim Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Jones RM (1998). *Mechanics of Composite Materials* (2nd Edition). Philadelphia: Taylor & Francis, Inc.
- Karabulut M (2019). *Ultrasonik Yöntemle Belirlenen Malzeme Sabitlerinin Mekanik Deneylerle Doğrulanması*, Yüksek Lisans Tezi, Necmettin Erbakan Üniversitesi Eğitim Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Kaya D ve Kılınc S (2008). Kompozit Malzemelerin Kayma Testi İçin Aparat Tasarımı, İmalatı Ve Kayma Gerilmesi Analizi, Bitirme Projesi, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü, İzmir.
- Kökdemir E (2007). *Alaşımsız Yapı Çeliği Levhalarında Kaynak Dikişlerinin Ultrasonik Muayenesi*, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Lee SC and Suen JM (1990). Ultrasonic nondestructive Evaluation of matrix structures and nodularity in cast irons, *Metallurgical Transaction A*, 20, 2399- 2407.
- Mallick PK (1993). *Fiber Reinforced Composites Materials, Manufacturing, and Design (Second Edition)*. New York: Marcel Dekker Incorporated.
- Mistou S, Karama M, Guerjouma REL, Ducret D, Faye JP 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*.
- Okkay H (2007). *Selülozik Atıkların Ultrasonik Ön İşlenmesi ve Mikrodalga Reaktörde Hidrolizi*, Doctoral dissertation, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Mühendislik Ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze.
- Oral İ (2011). *Çeşitli Polifonksiyonel Gruplu Modifiye Polistirenler ile Epoksi Reçinelerin Sentezi ve Bunlardaki Ultrases Hızlarının Ölçülmesi*, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Savaşkan T (1999). *Malzeme Bilgisi ve Muayenesi*. Derya Kitabevi, Trabzon.
- Song JH (2015). Pairing effect and tensile properties of laminated high-performance hybrid composites prepared using carbon/glass and carbon/aramid fibers. *Composites Part B: Engineering*, 79, 61-66.
- Tatar A (2011). *Tabakalı Ortotropik Silindirik Bir Kabuk ile Dikdörtgen Bir Plakanın Birlikte Titreşim Analizi*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Tuncel, S. (1987). *Ultrasonik Muayene Transduserleri Proje Sonuç Raporu*. Marmara Bilimsel ve Endüstriyel Araştırma Enstitüsü Malzeme Araştırma Bölümü. Gebze.
- Wrobel G and Pawlak S (2006). Ultrasonic evaluation of the fiber content in glass/epoxy composites. *Journal Of Achievements In Materials And Manufacturing Engineering*. 18, 1-2.
- Yılmaz M ve Altıntaş S (1997). Al-sicp kompozitinin ısı çevrim koşulu altında davranışının teorik ve deneysel incelenmesi. *9. Uluslararası Metalürji ve Malzeme Kongresi. 721-726. İstanbul*.