


Hidrotermal Yaşlandırılmaya Maruz Bırakılan Karbon Elyaf Epoksi Kompozit Boruların Kırılma Tokluklarının İncelenmesi

Investigation of Fracture Toughness of Carbon Fiber Epoxy Composite Pipes Exposed to Hydrothermal Aging

Oğuzhan Kosalı* 

Mersin Milli Eğitim Müdürlüğü / Ar-Ge, Mersin, Türkiye

Memduh Kara 

Doç. Dr., Mersin Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Mersin, Türkiye

* Corresponding author: oguzhankosali@hotmail.com

Geliş Tarihi / Received: 28.03.2023
Kabul Tarihi / Accepted: 20.04.2023

Araştırma Makalesi/Research Article
DOI: 10.5281/zenodo.7968908

Özet

Farklı malzeme özelliklerini tek bir malzemede bir araya getirmek veya yeni bir özellik eklemek amacı ile iki veya daha fazla malzemenin makro düzeyde birleştirilmesi ile çeşitli yöntemler aracılığıyla üretilen yeni malzemeler “Kompozit Malzeme” olarak ifade edilmektedir. Kompozit malzeme temel olarak matris olarak adlandırılan ana yapı ve takviye elemanından oluşabilmektedir. Bununla birlikte kompozit malzemelerin el yatırması, reçine transfer, püskürtme, kalıplama ve filaman sarım gibi birçok üretim yöntemi bulunmaktadır. Kompozit malzemelerin mekanik ve ısı özellikleri üzerinde etkili olan parametrelerden biri çevresel koşullardır. Kompozit malzemelerin uzun süre sıcaklık, nem gibi çevresel koşullara maruz kalması ile özelliklerinde değişimler meydana gelmektedir. Zamanla oluşan kompozit malzeme özelliklerindeki bu değişim sürecine yaşlanma denir. Hidrotermal yaşlandırma işlemi de, sıcaklık ve nem etkisinin birlikte görülebileceği ve malzemelerin bu etkilere maruz kalabileceği çevresel koşul örneklerindedir. Çalışma da matris fazı olarak fiberlerin yapısal bütünlüğünü oluşturan ve yükün fiberler arasında dağılmasını iyi bir şekilde gerçekleştirerek literatürde geniş bir çalışma alanı bulunan epoksi reçine kullanılmıştır. Takviye malzemesi olarak ise karbon elyaf kullanılmıştır. Filaman sarım yöntemiyle $\pm 55^\circ$ sarım açısında kompozit borular üretilmiştir. Üretilen karbon elyaf epoksi kompozit numuneler bir hafta, iki hafta ve üç hafta olacak şekilde hidrotermal yaşlandırma işlemine maruz bırakılmış ve yaşlandırma işlemi sonrasında Charpy darbe test cihazı ile numunelere kırılma tokluğu deneyleri uygulanmıştır. Uygulanan bu deney ile kompozit malzemenin darbe yüklerine karşı davranışını belirlemek amacıyla birçok test aşaması gerçekleştirilmiş ve bu aşamalar boyunca kırılma tokluğu değerleri gözlemlenmiştir. Ayrıca bu bildiri de araştırma kapsamında Charpy darbe deneyinin malzeme üzerinde meydana getirdiği hasar mekanizması da gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Hidrotermal Yaşlandırma, Epoksi, Kırılma Tokluğu, Charpy Darbe Testi.

Abstract

New materials produced by combining two or more materials at macro level with the aim of combining different material properties in a single material or adding a new feature are referred to as "Composite Materials". The composite material can basically consist of the main structure and reinforcement element called matrix. However, there are many production methods of composite materials such as hand lay-up, resin transfer, spraying, molding and filament winding. One of the parameters that affect the mechanical and thermal properties of composite materials is environmental conditions. Changes in properties occur when composite materials are exposed to environmental conditions such as temperature and humidity for a long time. This process of change in composite material properties over time is called aging. Hydrothermal aging process is also an

example of environmental conditions where temperature and humidity effects can be seen together and materials can be exposed to these effects. In the study, epoxy resin, which constitutes the structural integrity of the fibers and has a wide field of study in the literature, has been used as the matrix phase by performing the distribution of the load between the fibers well. Carbon fiber is used as reinforcement material. Composite pipes were produced with a $\pm 55^\circ$ winding angle using the filament winding method. The produced carbon fiber epoxy composite samples were subjected to hydrothermal aging process for one week, two weeks and three weeks, and fracture toughness tests were applied to the samples with the Charpy impact tester after the aging process. With this experiment, the test phase was carried out to test the composite material against impact loads and the fracture toughness was tested during these stages. In addition, this paper is conducting research and the mechanism of damage caused by the Charpy impact experiment has been observed.

Keywords: Hydrothermal Aging, Epoxy, Fracture Toughness, Charpy Impact Test.

Giriş

Teknolojinin hızlı bir şekilde ilerlemesi ve rekabet koşullarının ağırlaşması klasik malzemelere alternatif gelişmiş özelliklere sahip yeni malzemelerin kullanılması gerekliliğini günden güne hissettirmektedir. Bu nedenle mevcut mühendislik malzemelerine alternatif olan kompozit malzemeler alanındaki çalışmalar son yarım asırdır hız kazanmıştır. Aslında kompozit malzemelerin tarihsel süreçte ilk kullanımları tam olarak bilinmese de eski medeniyetlerde bu tür kullanımlara rastlanmaktadır. Örneğin çamur tuğlalara saman parçalarının katılması, zırh olarak farklı metal tabakalarının bir araya getirilmesi gibi [1].

Farklı malzeme özelliklerini tek bir malzeme toplamak ya da yeni bir özellik elde etmek amacı ile iki veya daha fazla malzemenin makro düzeyde birleştirilmesi ile üretilen yeni malzeme “Kompozit Malzeme” olarak adlandırılır. Kompozit malzeme temel olarak matris olarak adlandırılan ana yapı ve takviye elemanından oluşmaktadır [1]. Bununla birlikte kompozit malzemelerin el yatırması, reçine transfer, püskürtme, kalıplama ve filaman sarım gibi birçok üretim yöntemi bulunmaktadır.

Filaman sarım tekniği (bir çeşit kompozit malzeme üretimi yöntemi) ile üretilen kompozit boruların ve tankların kullanımı, havacılık, ulaşım, lojistik ve uzay endüstrisi alanındaki avantajları nedeniyle sürekli artmaktadır. Filaman sarım tekniği, yüksek mukavemet ve elastikiyet modülüne sahip takviyeli malzeme elyaflarını, bir bağlayıcı reçineyle doyurarak sarmak, daha sonra da belirli bir kalınlığa ulaşana kadar farklı açılar ve çoklu katmanlardaki bir silindirin üzerine sarmaktır. Bu teknik kullanılarak üretilen malzemelerin ana kullanım alanı, yüksek basınç ve korozyona dayanıklı borular, sıkıştırılmış hava, sıvılaştırılmış petrol gazı, sıkıştırılmış doğal gaz tankı, uzay aracı, savaş yakıt rezervuarı ve uçak taşımacılığı, denizaltılar için oksijen tüpü, roket silahlarının namlusu, denizaltı gövdesi, radar kubbelerinin yapısı ve bir roket gövdesidir [2-4].

Bu çalışmada kompozit borularımız filaman sarım yöntemi kullanılarak oluşturulmuştur. Bununla birlikte matris fazı olarak fiberlerin yapısal bütünlüğünü oluşturan ve yükün fiberler arasında dağılmasını iyi bir şekilde gerçekleştirerek literatürde geniş bir çalışma alanı bulunan epoksi reçine kullanılmıştır. Epoksi reçineler, diğer polimer matrislere göre pahalı olmasına rağmen, kompozitler için en çok tercih edilen polimer matristir. Epoksilerin en çok kullanılan polimer matris olmasının başlıca sebepleri ise çekme ve darbe dayanımları oldukça yüksektir ve aşınmaya karşı çok dayanıklıdır [5].

Kompozit malzemelerin mekanik ve ısıl özellikleri üzerinde etkili olan bir diğer parametre ise çevresel koşullardır. Kompozit malzemelerin uzun süre sıcaklık, nem gibi çevresel koşullara maruz kalması ile orijinal özelliklerinde geri dönüşü olmayan değişimler meydana gelmektedir. Zamanla kompozit malzeme özelliklerindeki bu değişim sürecine yaşlanma denir. Kompozit malzemelerin kullanım yerlerindeki dayanımı ve servis ömrünün belirlenebilmesi için malzemelerin sıcaklık, nem, saf su, tuzlu su ve ultraviyole ışın gibi çevresel şartlar altında mekanik ve ısıl özelliklerindeki değişim iyi bilinmelidir [6].

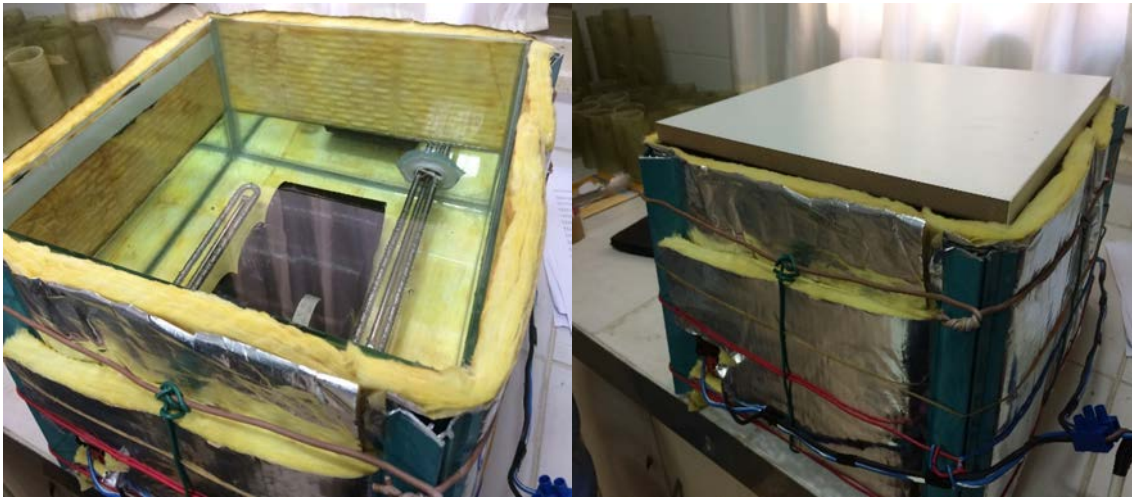
Hidrotermal yaşlandırma işlemi de sıcaklık ve nem etkisinin birlikte görülebileceği ve malzemelerin bu etkilere maruz kalabileceği çevresel koşul örneklerindedir.

Bu doğrultuda, üretilen saf karbon epoksi kompozit borular 80°C sıcaklıkta saf su ortamında bir hafta, iki hafta ve üç hafta olacak şekilde üç farklı sürede hidrotermal yaşlandırma işlemine maruz bırakılmış ve yaşlandırma işlemi sonrasında Charpy test cihazı ile numunelere kırılma tokluğu deneyi uygulanmıştır.

Yöntem

Hidrotermal Yaşlandırma İşlemi

Çalışmamız da elyaf sarma (filaman sarım) yöntemiyle üretilen saf karbon elyaf epoksi borular 80°C sıcaklıkta saf su ortamında bir hafta, iki hafta ve üç hafta olacak şekilde üç farklı sürede hidrotermal yaşlandırma işlemine maruz bırakılmıştır. Bu işlemin yapılabilmesi için bölüm laboratuvarında bulunan 40x40x25 cm boyutlarında 5 mm kalınlığında camdan yapılmış 40 litre hacimli yaşlandırma cihazı kullanılmıştır. Karbon elyaf kompozit boruların hidrotermal yaşlandırma işlemi 80 °C sabit sıcaklıktaki saf su ortamında gerçekleştirilmiştir. Yaşlandırma sıcaklığı, reçinenin camsı geçiş sıcaklığına yakın olması ve önceden gerçekleştirilen çalışmaların da referans alınmasıyla seçilmiştir. Test düzeneğinin 80°C sıcaklıkta sabit kalması için iki adet 3 kW' lık termostatlı rezistans kullanılmış ve bunula birlikte sistemden ısı kaybının yaşanmaması için de ünitenin dış kısmı yalıtım malzemesi ile kaplanmıştır. Deneyler için kullanılan bu hidrotermal yaşlandırma ünitesi Şekil 1' de gösterilmiştir.

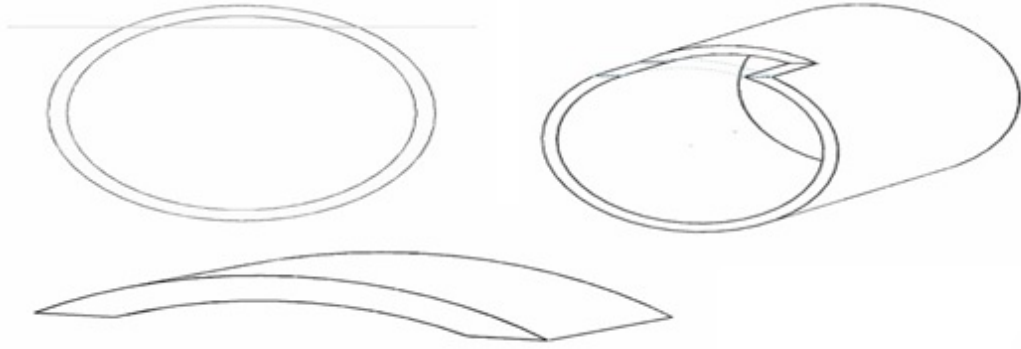


Şekil 1. Hidrotermal yaşlandırma ünitesi [6].

Kompozit Boruların Deney İçin Hazırlanması

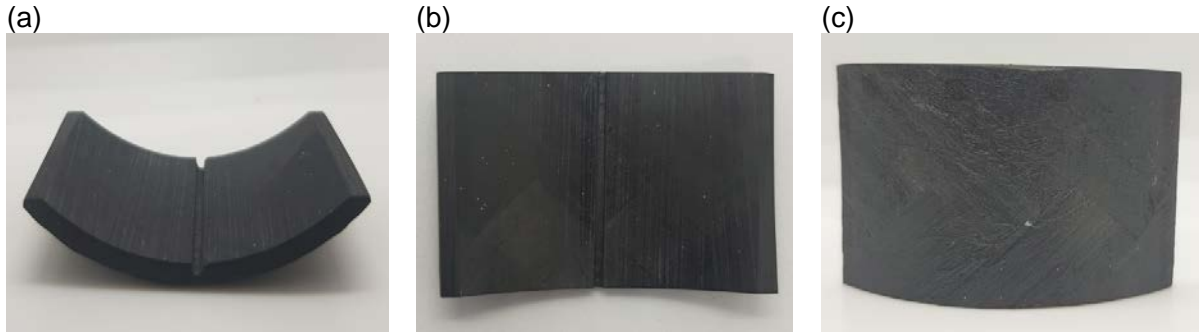
Bu çalışmada hem bir hafta, iki hafta ve üç hafta olacak şekilde üç farklı sürede hidrotermal yaşlandırma işlemine maruz bırakılmış hem de hidrotermal yaşlandırma işlemine maruz bırakılmamış, saf karbon elyaf epoksi kompozit malzemeler bulunmaktadır.

Charpy test cihazı ile numunelere kırılma tokluğu deneyi uygulanması için ASTM E399-20a [7] standardı referans alınarak ürettiğimiz borulardan yay şeklinde örnekler kesilmiş ve çentik açılmıştır. Yay şeklindeki numuneler için çentik derinliği, a/W oranı (0,30)'a göre 1 mm kalınlığında bir elmas disk ve bistoury ile kesilerek hazırlanmıştır Numunelerin hazırlanma şeması Şekil 2 'de verilmiştir.



Şekil 2. Numunelerin hazırlanma şeması

Çentik açma işlemi tamamlanan numunelere ait kesit alanı görüntüsü, iç görüntüsü, dış görüntüsü Şekil 3 'de verilmiştir. Her bir farklı parametre için testler üç kez tekrarlanmış ve ortalama sonuçlar değerlendirilmiştir.



Şekil 3. Çentik açma işlemi tamamlanan numunelere ait (a) kesit görüntüsü, (b) iç yüzey görüntüsü, (c) dış yüzey görüntüsü

Charpy Darbe Test Yöntemi ile Kırılma Tokluğunun Belirlenmesi İşlemi

Charpy testi diğer malzemelere oranla metallere sıklıkla kullanılır, bunun yanında kompozitlere, seramiklere ve polimerlere de uygulanır. Charpy testi ile malzemelerin bağıl tokluğunu değerlendirebiliriz.

Charpy testi, sarkaç yöntemi kullanılarak geliştirilmiştir. Mekanik deney düzeneğinde önce sarkaç, daha önce belirlenen potansiyel enerjiye sahip olabileceği bir yüksekliğe çıkarılmıştır. Daha sonra numune, mesnetlere (örslere) tam yaslanacak şekilde ve çekicinin salınım düzlemi ile çentiğinin simetri düzlemi 0,5 mm içinde birbirine çakışacak şekilde yerleştirilmiştir. Bu durum cihaza bağlı, yardımcı bir aletle sağlanmıştır. Numune uygun şekilde yerleştirildikten sonra, okumaların yapıldığı kadranın göstergesi başlangıç durumuna getirilmiş ve sarkaç düzgün bir şekilde serbest bırakılmıştır. Her deney esnasında kompozitlere tek düzeyde(50J) darbe enerjisi uygulanmıştır. Sonuç, deneyden sonra kadrandan okunmuştur [8]. Deneyler için kullanılan Charpy test cihazı Şekil 4' de gösterilmiştir.



Şekil 4. Charpy test cihazı

Bulgular

Çalışmamızda hem bir hafta, iki hafta ve üç hafta olacak şekilde üç farklı sürede hidrotermal yaşlandırma işlemine maruz bırakılmış hem de hidrotermal yaşlandırma işlemine maruz kalmamış, saf karbon elyaf epoksi kompozit malzemeler bulunmaktadır.

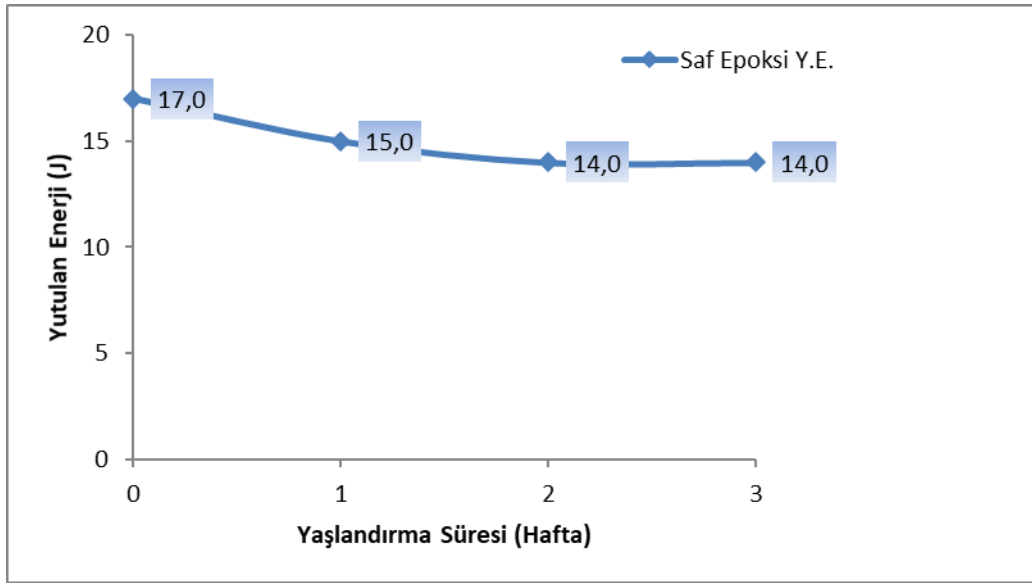
Bu malzemelere Charpy test cihazı ile kırılma tokluğu deneyi uygulanması için ASTM E399-20a [7] standartı referans alınarak ürettiğimiz borulardan yay şeklinde örnekler kesilmiştir. Yay şeklindeki numuneler için 1 mm kalınlığında çentik açma işlemi yapılmıştır.

Hazırlanan numunelere charpy darbe test yöntemi ile kırılma tokluğunun belirlenmesi işlemi ve numunelere hasar analizi işlemi yapılmıştır.

Yaşlandırma Süresinin Kırılma Tokluğuna Etkisi

Bu bölümde, saf elyaf epoksi kompozit numunelerdeki hidrotermal yaşlandırma işlemimin kırılma tokluğuna etkisini belirlemek amacı ile numunelere 50J enerji seviyesinde, Charpy test cihazı ile kırılma tokluğu deneyi uygulanmıştır. Her numunelere ait yutulan enerji-yaşlandırma süresi grafikleri çizilerek değerlendirme yapılmıştır.

Saf karbon elyaf epoksi boruların farklı süreli yaşlandırma işlemine maruz kalmaları sonucu oluşan kırılma tokluğu değerleri Şekil 5' de verilmiştir.



Şekil 5. Farklı sürelerde yaşlandırılmış saf epoksi kompozit numunelerin kırılma tokluğu değerleri

Takviyesiz karbon elyaf epoksi borulara ait numunelerin grafiği incelendiğinde, yaşlandırma süresinin artmasıyla birlikte numunelere ait yutulmuş enerji miktarının azaldığı ve iki hafta yaşlandırma işlemi sonrasında ise yaklaşık olarak sabit kaldığı gözlemlenmektedir.

Birçok polimer malzemelerde hidrofobik özellikler gözlemlenmektedir. Bu polimerler atomlar arasındaki kuvvetli bağlar sebebiyle oldukça yüksek hidrofobik ve aşınma dayanımı özelliklerine sahiptirler [9]. Epoksi malzemelerde hidrofobik özellikleri olan malzemelere örnektir; ancak bu malzemeler hidrofobik özellik göstermesine rağmen hidrotermal yaşlandırma işleminin etkisi ve yaşlandırma süresine bağlı olarak malzeme içerisine su girimi durumunu engelleyememiştir. Bu durum dolayısıyla da saf epoksi kompozit numunelerin mekanik özelliklerinde değişim gerçekleşmiştir. Değişen bu mekanik özelliklerden bir tanesi de malzemenin kırılma tokluğudur; ancak bu değişim iki haftalık hidrotermal yaşlandırma işlemi sonrasında malzemenin absorbe edebileceği su miktarına büyük oranda ulaşması sebebiyle kırılma tokluğu değerlerinin de yaklaşık olarak sabit kaldığı gözlemlenmiştir.

Yaşlandırılmaya Maruz Bırakılmamış Kompozit Boruların Kırılma Tokluğu

Yaşlandırma işlemine maruz bırakılmamış ve charpy test cihazı ile kırılma tokluğu deneyi uygulanmış kompozit numunelerin hasar görüntüleri Şekil 6 'da gösterilmiştir.



Şekil 6. Yaşlandırma işlemine maruz bırakılmamış saf epoksi kompozit numunelerin (a) kesit alanı darbe hasar görüntüsü, (b) iç yüzey darbe hasar görüntüsü, (c) dış yüzey darbe hasar görüntüsü

Hasar görüntüleri incelendiğinde darbe deneyine bağlı olarak kompozit numunenin kırıldığı bariz bir şekilde görülmektedir. Yapılan deneylerde numunelere standartlara uygun olarak çentik açılmıştır. Numunede gerçekleşen kırılma beklenildiği şekilde çentik bölgesinden gerçekleşmiştir. Deney esnasında kompozit numunede çentik bölgesinden önce matris çatlağı başlamış, daha sonra vurucunun etkisiyle matris çatlakları ilerlemiş, tabakalar arası ayrılma gerçekleşmiş ve sonuç hasarı elyaf kırılmaları şeklinde oluşmuştur. Şekil 6a'daki kesit görüntüsüne bakıldığında numunede oluşan tabakalar arası ayrılmalar ve elyaf kopmaları bariz bir şekilde görülmektedir. Darbe dış yüzeyden iç yüzeye doğru gerçekleştiği için iç yüzeyde meydana gelen elyaf kopmaları ve ayrılmalar daha büyük olmuştur (Şekil 6b). Dış yüzeyde ise elyaf kopmaları gerçekleşmiş ancak elyafların birbirinden ayrılmaları daha az olmuştur (Şekil 6c).

Bir Hafta Yaşlandırılmaya Maruz Bırakılmış Kompozit Boruların Kırılma Tokluğu

Bir hafta yaşlandırma işlemine maruz bırakılmış ve charpy test cihazı ile kırılma tokluğu deneyi uygulanmış kompozit numunelerin hasar görüntüleri Şekil 7 'de gösterilmiştir.



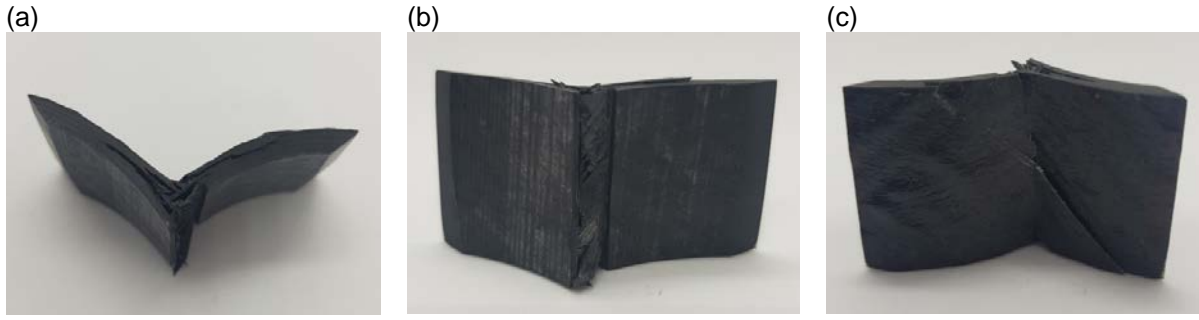
Şekil 7. Bir hafta yaşlandırma işlemine maruz bırakılmış saf epoksi kompozit numunelerin (a) kesit alanı darbe hasar görüntüsü, (b) iç yüzey darbe hasar görüntüsü, (c) dış yüzey darbe hasar görüntüsü

Hidrotermal yaşlandırma işlemiyle birlikte kompozit numunelerde rijitlik kaybı ortaya çıkmıştır. Bundan dolayı rijitliğini kaybeden kompozit numuneler darbelere karşı daha fazla elastik özellik göstermişlerdir. Yaşlandırma işlemiyle meydana gelen yumuşama durumu yapı içerisindeki hasar mekanizmasını da değiştirmiştir.

Darbe sonucu oluşan kırılma durumu her tabakada farklı olmuş ve tabakalar arasında delaminasyona ve matris çatlaklarının görülmesine neden olmuştur. Bununla birlikte yaşlandırma işlemi uygulanmış numunelerde yaşlandırma süresi arttıkça malzemenin darbe mukavemeti azaldığı görülmüştür.

İki Hafta Yaşlandırılmaya Maruz Bırakılmış Kompozit Boruların Kırılma Tokluğu

İki hafta yaşlandırma işlemine maruz bırakılmış ve charpy test cihazı ile kırılma tokluğu deneyi uygulanmış kompozit numunelerin hasar görüntüleri Şekil 8 'de gösterilmiştir.



Şekil 8. İki hafta yaşlandırma işlemine maruz bırakılmış saf epoksi kompozit numunelerin (a) kesit alanı darbe hasar görüntüsü, (b) iç yüzey darbe hasar görüntüsü, (c) dış yüzey darbe hasar görüntüsü

Şekil 8a-c'de iki hafta yaşlandırma işlemine maruz bırakılmış saf epoksi kompozit numuneye ait hasar görüntüleri verilmiştir. Şekil 8a'daki kesit görüntüsüne bakıldığında saf epoksili numunede vurucu temas yüzeyinde matris çatlaması ve buna bağlı olarak delaminasyon görülmektedir. Şekil 8b'de darbenin oluşturduğu kuvvet etkisi ile elyaf kopmaları ve oluşan hasar durumu daha belirgin olmuştur. Dış yüzeyde oluşan penetrasyon kaynaklı elyaf kırılması 1 hafta yaşlandırılmış kompozit numuneye göre daha belirgindir (Şekil 8c).

Üç Hafta Yaşlandırılmaya Maruz Bırakılmış Kompozit Boruların Kırılma Tokluğu

Üç hafta yaşlandırma işlemine maruz bırakılmış ve charpy test cihazı ile kırılma tokluğu deneyi uygulanmış kompozit numunelerin hasar görüntüleri Şekil 9 'da gösterilmiştir.



Şekil 9. Üç hafta yaşlandırma işlemine maruz bırakılmış saf epoksi kompozit numunelerin (a) kesit alanı darbe hasar görüntüsü, (b) iç yüzey darbe hasar görüntüsü, (c) dış yüzey darbe hasar görüntüsü

Şekil 9a-c'de oluşan hasar görüntüleri incelendiğinde vurucu nüfuziyet yüzeyinde matris çatlaması ve elyaf kopmaları görülmektedir. Bunun yanında alt tabaka da oluşan delaminasyon hasarı da bulunmaktadır.

Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmamızın temel amacı; hem hidrotermal yaşlandırma işlemine maruz bırakılmış hem de yaşlandırma işlemine maruz bırakılmamış saf karbon elyaf epoksi kompozit boruların kırılma tokluğu değerlerine yaşlanma süresinin etkisinin belirlenmesi ve bunun yanında malzemede görülen mekanik özelliklerin ortaya çıkarılmasıdır.

Karbon elyaf epoksi borulara ait numunelerin kırılma tokluğu değerleri incelendiğinde, yaşlandırma süresinin artmasıyla birlikte numunelere ait yutulan enerji miktarının azaldığı ve iki hafta yaşlandırma işlemi sonrasında ise yaklaşık olarak sabit kaldığı gözlemlenmektedir.

Kompozit numunelerin hasar görüntüleri incelendiğinde hidrotermal yaşlandırma ile birlikte numunelerde rijitlik kaybı ortaya çıkmış ve bu durum numunelerin darbelere karşı daha elastik özellik göstermesine neden olmuştur.

Katkı Belirtme

Bu çalışma, Oğuzhan KOSALI tarafından Mersin Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Nanoteknoloji ve İleri Malzemeler Anabilim Dalında yürütülmekte olan Yüksek Lisans Tezinin bir bölümüdür. Ayrıca bu çalışma Mersin Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimince 2019-3-TP2-3688 proje numarası ile desteklenmiştir.

Kaynaklar

1. Kılıç, E. (2006). Kompozit Malzemeden Yapılan Yaprak Yayların Analizi. Doctoral Dissertation, DEÜ Fen Bilimleri Enstitüsü.
2. Samancı, A., Avci, A., Tarakcioglu, N., & Şahin, Ö. S. (2008). Fatigue Crack Growth Of Filament Wound GRP Pipes With A Surface Crack Under Cyclic İnternal Pressure. *Journal Of Materials Science*, 43(16), 5569-5573.
3. Zhu, L., Sun, B., Hu, H., & Gu, B. (2010). Constitutive Equations Of Basalt Filament Tows Under Quasi-Static And High Strain Rate Tension. *Materials Science And Engineering: A*, 527(13-14), 3245-3252.
4. Avci, A., Şahin, Ö. S., & Tarakçıoğlu, N. (2007). Fatigue Behavior Of Surface Cracked Filament Wound Pipes With High Tangential Strength İn Corrosive Environment. *Composites Part A: Applied Science And Manufacturing*, 38(4), 1192-1199.
5. Şeker, A. (2010). Epoksi Reçine/Sepiyolit Kompozitlerinin Hazırlanması Ve Karakterizasyonu. Doctoral Dissertation, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
6. Günöz, A. (2019). Nanopartikül Takviyeli Karbon Epoksi Borularda Hidrotermal Yaşlandırmanın Isıl İletkenliğe Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Mersin Üniversitesi, Mersin.
7. ASTM E399-20a, Metalik Malzemelerin Doğrusal-Elastik Düzlem Gerilme Kırılma Tokluğu için Standart Test Yöntemi, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2020, www.astm.org
8. Sevinç, B. (2007). Geleneksel Charpy Vurma Deneyi Verilerinin Labview Programı Kullanılarak Elde Edilmesi Ve Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Muğla.
9. Özbey, M., Gürbüz, M., & Karakurt, U. Hidrofobik çark yüzeylerinin santrifüj tip bir pompa performansına etkilerinin deneysel incelenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 36(1), 267-274.