



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 09.09.2021
Kabul Tarihi : 08.11.2021

Received Date : 09.09.2021
Accepted Date : 08.11.2021

KOMPOZİT MALZEMELERİN CHARPY DARBE TESTİ SONRASI ULTRASONİK C-SCAN YÖNTEMİ İLE HASAR ANALİZİ

DAMAGE ANALYSIS OF COMPOSITE MATERIALS BY ULTRASONIC C- SCAN METHOD AFTER CHARPY IMPACT TEST

Burak ÖZTAŞ^{1*} (ORCID: 0000-0002-8789-155X)

Yasemin KORKMAZ¹ (ORCID: 0000-0000-0002-0030-6259)

H. İbrahim ÇELİK² (ORCID: 0000-0002-1145-6471)

¹ Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Tekstil Mühendisliği Bölümü, Kahramanmaraş, Türkiye

² Gaziantep Üniversitesi, Tekstil Mühendisliği Bölümü, Gaziantep, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Burak ÖZTAŞ, burakoztas46@gmail.com

ÖZET

Bu çalışmada, elyaf takviyeli kompozitlerde darbe sonrası absorblanan enerji ile oluşan iç hasar görüntüsü araştırılmıştır. 14 kat karbon ve 14 kat cam dokuma kumaştan oluşturulan kompozit yapılarda matris malzeme değişkeni sabit tutularak vakum infüzyon yöntemi ile numuneler aynı boyutlarda üretilmiştir. Üretilen bu numuneler Charpy darbe test cihazı ile darbeye maruz bırakılmıştır. Numunelere darbe öncesinde ve sonrasında doğrudan geçişli ultrasonik test (TTU) yöntemine göre muayene yapılmıştır. Elde edilen C-Tarama görüntülerinde görüntü işleme yöntemi kullanılarak, oluşan iç hasar alanı hesaplanmıştır. Sonuç olarak; Charpy test cihazından alınan enerji absorblama oranı ile hasar yayılımı ve hasarlı bölgenin kapladığı alan arasında doğru orantı tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kompozit, charpy testi, hasar analizi, ultrasonik görüntüleme, görüntü işleme

ABSTRACT

In this study, the image of internal damage caused by the energy absorbed after impact in fiber reinforced composites was investigated. In composite structures made of 14 layers of carbon and 14 layers of glass fabric, the matrix material variable was kept constant and the samples were produced in the same dimensions by vacuum infusion method. These produced samples were subjected to impact with Charpy impact tester. The samples were examined according to through transmission ultrasonic test (TTU) method before and after the impact. The resulting internal damage area was calculated using image processing methods from the C-Scan images. As a result; It has been understood that there is a direct proportionality between the energy absorption rate from the Charpy test device and the damage spread and the area covered by the damaged area.

Keywords: Composite, charpy impact test, damage analysis, ultrasonic imaging, image processing

GİRİŞ

Kompozit malzemeler, yüksek maliyetlerine rağmen yüksek özgül mukavemet, spesifik sertliği ve korozyon direncinin sayesinde son yıllarda mühendislik uygulamalarında yaygın olarak tercih edilmektedirler. Geleneksel kaynakların tükenmesi ve çevre kirliliği gibi önemli faktörler her geçen gün bu alana olan ilgiyi arttırmaktadır. Özellikle elyaf takviyeli kompozitler yanı sıra metal malzemelere kıyasla performans/ağırlık oranları nedeniyle spor endüstrisi, otomotiv endüstrisi ve havacılık endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Hoa, 2009; Mazumdar, 2014).

ToCite: ÖZTAŞ, B., KORKMAZ, Y., & ÇELİK, H., (2021). KOMPOZİT MALZEMELERİN CHARPY DARBE TESTİ SONRASI ULTRASONİK C-SCAN YÖNTEMİ İLE HASAR ANALİZİ.

Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 24(4), 332-340.

Küçük hataların istenmeyen sonuçlar doğurabileceği havacılık endüstrisi gibi kritik alanlarda kullanılan kompozit malzemelerdeki hasar davranışlarının tespit edilmesi büyük önem arz etmektedir. Elyaf takviyeli kompozit malzemelerde geleneksel malzemelere göre hasar analizinin yapılması, kırılma tokluğunun anlaşılması zordur. Çünkü elyaf takviyeli kompozitler lif kırılması, ara yüzden lif ayrılması ve delaminasyon gibi metal malzemelerde görülmeyen karmaşık bir hasar mekanizmasına sahiptir (Hayman et al., 2007; Lauderdale & Stewart, 2010; Richardson et al., 1996; Thollon & Hochard, 2009). Bu sebeple malzeme özelliklerini incelenmek ve darbe davranışlılarını karakterize etmek için standart bir test tekniği veya yaygın bir şekilde kabul edilen herhangi bir teknik mevcut değildir.

Günümüzde kompozit malzemelerin darbe dirençlerinin belirlenmesi amacıyla sarkaç testleri (Izod ve Charpy), balistik testler ve ağırlık düşürme testleri yaygın olarak kullanılmaktadır (Ceyhun & Turan, 2003). Hufenbach vd. (2008) kompozit yapıların darbe hasar direncini etkileyen temel parametreleri belirlemek için Charpy testi uygulayarak, karbon takviyeli kompozitlerin darbe altında incelemiştir. Kahtoff (2004) Charpy darbe testi ile cam/epoksi kompozitin farklı sıcaklıklarda dinamik hasar karakteri üzerine çalışmıştır. Shokrieh vd. (2011) -30°C ila 23°C sıcaklık değerlerinde E-cam/epoksi kompozitlere Charpy testi kullanarak 10, 15 ve 30 J enerji seviyelerinde darbe uygulamış, düşük sıcaklık altında cam/epoksi kompozitlerin dinamik kırılma davranışını incelemiştir. Farsani vd. (2014) bazalt elyaf takviyeli epoksi kompozitlere mikro cam tozu ilavesinin Charpy darbe davranışı üzerindeki etkisini incelemiştir.

Charpy metodu gibi testler darbe ile malzeme üzerinde tahribat yaratan ölçüm yöntemleridir. Öte yandan kompozit malzemenin yapısal durumunu belirlemek için X-ışını, termografi, ultrasonik test gibi çeşitli tahribatsız test teknikleri kompozit malzemelerdeki farklı kusurları karakterize etmek için yaygın olarak kullanılır (Chakrapani et al., 2013; Munoz et al., 2016; Wu et al., 1995). Ultrasonik testler taşınabilirliği ve geniş bölgeleri nispeten kısa bir süre içinde inceleme yeteneği nedeniyle kompozit malzemelerin muayenesinde sık kullanılır hale gelmiş, kompozit malzemelerde görülen yaygın kusurların tespitinde etkinliğini kanıtlamıştır (Bull et al., 2013). Ultrasonik yöntem, ses dalgalarının malzemenin içinden geçerken parçacıklarla etkileşerek yüksek frekanslarda sönümlenmesi, saçılması ve yansması olgusuna dayanmaktadır. Kompozit yapı incelemesi için kullanılan başlıca test tekniklerinden biri ultrasonik "C-tarama" tekniğidir. Bu uygulama, yayılan/alınan dalga zayıflamasının ve bir uçuş haritasının zamanının düzlemsel görüntülerini verir (Adams & Cawley, 1988; Cawley et al., 1985; Hsu et al., 2000; Kroworz et al., 2018).

Literatürde, çeşitli hataların ve hasarların (düşük hızlı darbe testi, üretim hataları ve gömülü kusurlar) analizi için karbon/epoksi ve cam/epoksi kompozitler başta olmak üzere birçok kompozit malzemenin incelenmesinde ultrasonik C-tarama tekniğinin kullanıldığı görülmektedir (Abdullah, 2021; Arhamnamazi et al., 2019; Hasiotis et al., 2011; Iskandarani, 2019; Santos et al., 2021; Selver et al., 2021; Tabrej et al., 2021; Tuo et al., 2019; Yolacan, 2018). Bahsedilen yöntemlerin aksine Charpy testi sonrası çoğunlukla yapı bütünlüğünün korunamaması nedeniyle sayısal modelleme ve kırılan parçaların mikroskopik görüntüleri üzerinden hasar analizi yapılmaktadır. Bu şekilde yapılan analizlerde kompozit malzemelerin karmaşık iç yapıları nedeniyle başarılı sonuçlar elde etmek zorlaşmaktadır (De Almeida et al., 2019; Hufenbach et al., 2008; Nascimento et al., 2018; Pereira et al., 2017).

Bu çalışmada, literatüre farklı bir bakış açısı geliştirmek amacı ile üretilen kompozitlere uygulanan Charpy darbe testi sonrası oluşan hasarın yapısı, yayılımı tahribatsız ultrasonik muayene yöntemi ile incelenmiştir. Alınan çıktılar geliştirilen görüntü işleme algoritmaları vasıtasıyla işlenmiş, darbe sonrası oluşan yapısal iç hasarın yönelimi ve alan hesabı gerçekleştirilmiştir.

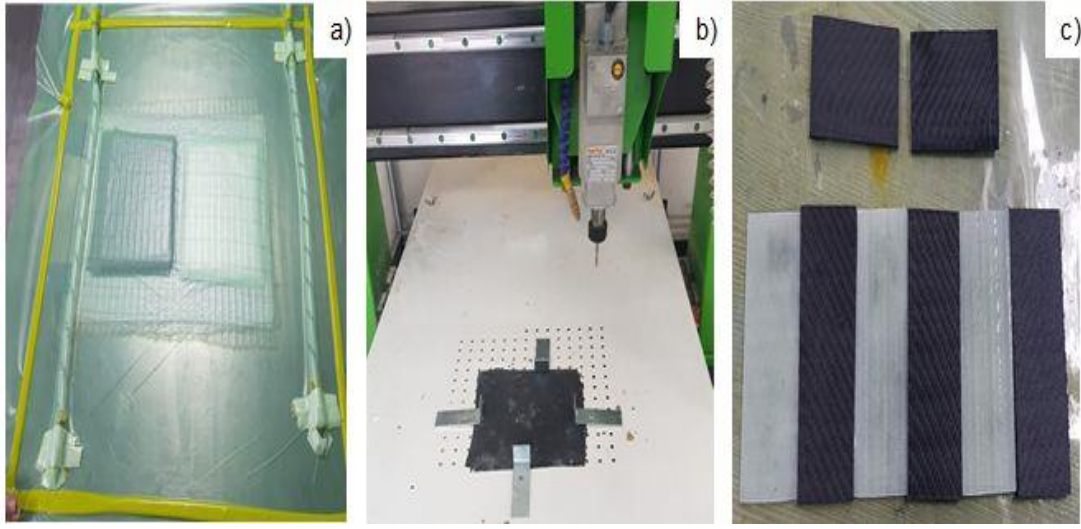
MATERYAL VE METOD

Üretim

Bu çalışmada, 2/2 dimi doku yapısına sahip, 245 g/m² gramajlı karbon kumaş ve 2/2 dimi doku yapısına sahip, 280 g/m² gramajlı cam kumaş kullanılarak iki farklı numune üretilmiştir. Bu kumaşlar 150 mm x 150 mm olacak şekilde 14 kat kesilmiştir. Kesilen cam ve karbon dokuma kumaşlar [0°/0°]₁₄ serim yönünde yerleştirilmiştir. Hazırlanan her iki numuneye matris malzeme olarak epoksi reçine (MGS LR160 Hexion Inc) ve epoksi ağırlığının %25'i kadar sertleştirici (MGS LR160 Hexion Inc) vakum infüzyon yöntemi kullanılarak emdirilmiştir (Şekil 1a). Reçine transferi sonrası 1 saat süreyle 80°C'de sıcaklıkta kürlenerek karbon dokuma kumaş/epoksi (CFRP) ve cam dokuma kumaş /epoksi (GFRP) kompozit numuneler üretilmiştir. Üretilen numuneler test boyutlarına göre CNC makinesinde kesilmiştir (Şekil 1b, Şekil 1c).

Tablo 1. Karbon ve Cam Dokuma Kumaş Özellikleri

Kumaş Tipi	İplik numarası (tex)		Sıklık (Tel/cm)		Gramaj (g/m ²)
	Çözü	Atkı	Çözü	Atkı	
Cam	200	200	6	6	280
Karbon	200	200	6	6	245

**Şekil 1.** (a) Vakum İnfüzyon Yöntemi ile Numunelerin Üretimi (b) CNC ile Numunelerin Kesilmesi (c) Hazırlanmış Numuneler

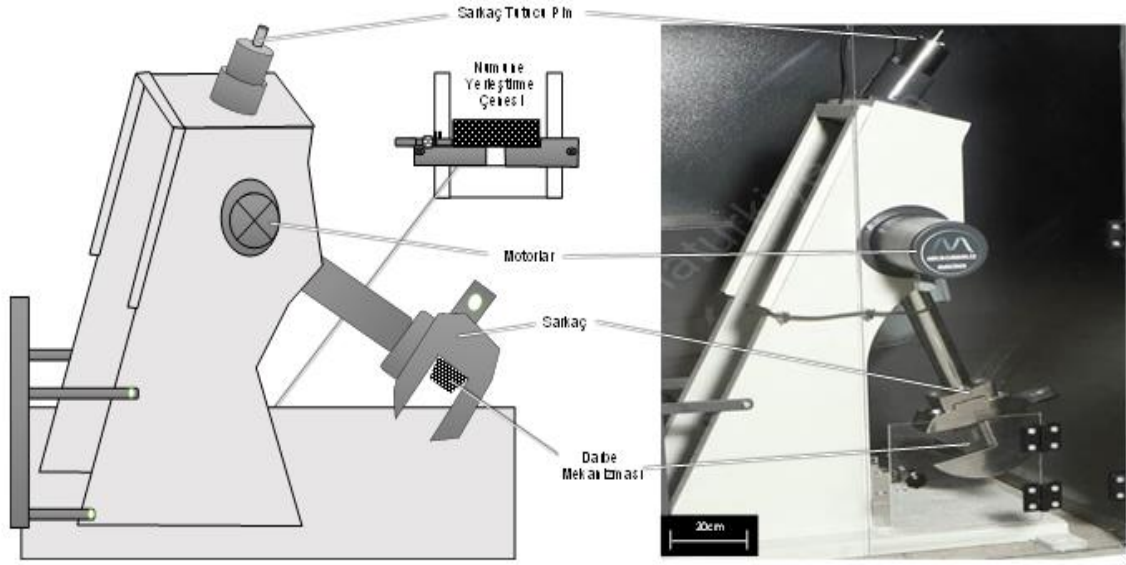
Üretilen kompozit malzemelerin kalınlık ölçer (kumpas) vasıtasıyla kalınlıkları ölçülmüş, ASTM D 792-91 standardına göre yoğunluk ve ASTM D 3171 standardına göre lif hacim oranı ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Ancak CFRP numunelerin hacim oranı ölçümü esnasında karbon liflerinin yanma probleminden dolayı, bu numunelerin lif hacim oranı ölçümü teorik denklem (Selver & Kaya, 2019) kullanılarak hesaplanmıştır. Gerçekleştirilen testler 2 tekrarlı olarak yapılmış, sonuçlar Tablo 2’de gösterilmiştir.

Tablo 2. Kompozit Malzemelerin Özellikleri

Numune Adı	Kalınlık (mm)	Yoğunluk (g/cm ³)	Lif hacim oranı (%)
CFRP	4	1.393	47.63
GFRP	4	1.726	49.12

Charpy Darbe Testi

Malzememin performans davranışı ile ilgili bilgi sahibi olabilmek için Charpy test cihazında ISO 179-1:2010 standardına uygun olarak her bir kompozit seti için 3 tekrarlı test yapılmıştır. Charpy test cihazı metallerin yüksek gerinim oranlı üç noktalı bükülme testi için geliştirilmesine rağmen son dönemlerde kompozit malzemeler üzerindeki darbe çalışmalarının yaygın olarak kullanılmaktadır (Farsani, Khalili, & Daghigh, 2014). Test düzeneği, 85 mm x 40 mm x 4 mm boyutlarına sahip numune, numunenin yerleştirildiği çene ve makine gövdesine bağlı dönen bir kola sabitlenmiş belirli bir kütleye sahip sarkaçtan oluşmaktadır (Şekil 2). Cihazın çalışma prensibine göre dairesel bir yörüngeyi takip ederek salınan sarkaç kolu sahip olduğu kinetik enerjiyi test numunesine çarparak aktarır. Yapılan testlerde, sarkaç çekicinin kütlesi ve salınım kol uzunluğundan dolayı oluşan hız sayesinde darbe esnasında 50 J’luk depolanmış bir enerji oluşturulmuştur.



Şekil 2. Mikroanaliz Charpy Test Cihazı

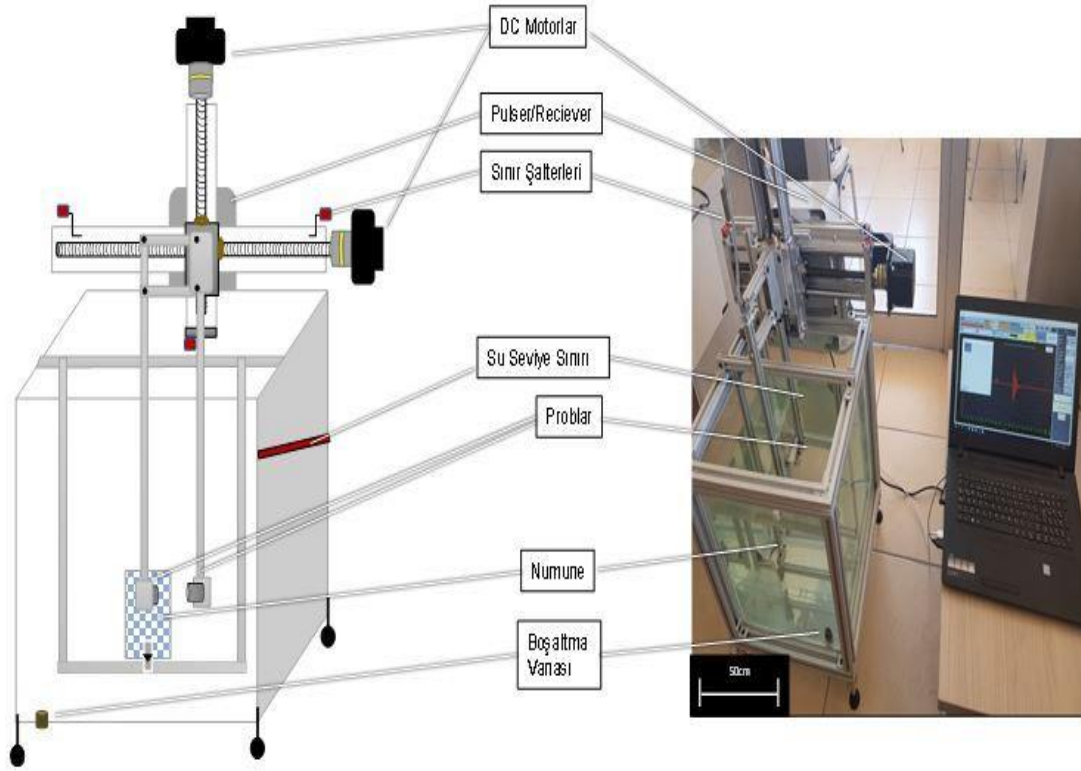
Ultrasonik Muayene

Çalışmanın ikinci kısmında, maruz kalınan darbe sonucunda numunelerde oluşan hasarın yönelimi ve hasarlı alan tespiti için ultrasonik C-tarama testi uygulanmıştır. Bunun için numunelerin ultrasonik muayenesi daldırma tipi US100 ultrasonik görüntüleme test cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Daldırma tipi olarak adlandırılan sistemlerde malzeme ile prob arasında bir ara yüzey oluşturularak saçılımı azaltma amacıyla numune bir su tankı içerisinde muayene edilir. Ultrasonik muayene yapılan kompozit malzemelerin sahip oldukları karmaşık yapı itibarıyla geri yansıyan ses sinyallerinin genliği malzeme içerisinden geçerek karşıya ulaşan sinyallerin genliğinden azdır. Bu sebeple sinyal saçılımının yüksek ve hataların büyük olduğu durumlarda doğrudan geçişli ultrasonik test (TTU) yöntemi tercih edilir. Bu yöntemde karşılıklı biri verici diğeri de alıcı olarak görev yapan iki prob kullanılır (Şekil 3). TTU ile gerçekleştirilen testler malzemenin içinden geçerken zayıflayarak alıcı proba ulaşan sinyaller de dahi süreksizlikleri tespit etmekte büyük başarı göstermektedir (Mix, 2005).



Şekil 3. TTU Çalışma Prensibi

Bu çalışmada kullanılan US100 cihazı bilgisayar kontrollü olup kademeli motor sürücülerini ile donatılmış otomatik bir daldırma sistemidir (Şekil 4). Burada karşılıklı iki probun senkronize hareketine ihtiyaç duyulduğundan dolayı, elle muayene gerçekleştirmek zordur ve bunun için otomatikleştirilmiş sistemlerde kullanılmaktadır. Şekilde 4'de görülüşü gibi su tankına yerleştirilen numunelerden, 1 MHz frekansa sahip daldırma tipi problemler ile sistemde ilk görüntüler elde edilmiştir.



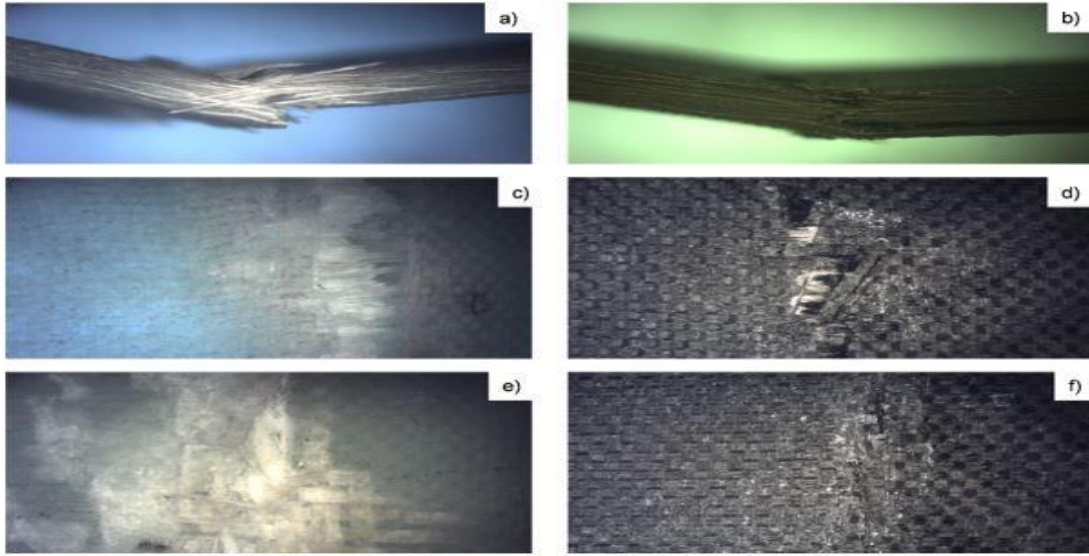
Şekil 4. US100 Ultrasonik Test Cihazı

BULGULAR VE TARTIŞMALAR

Kompozit malzemelerin son yıllarda kullanıldıkları alanlar itibariyle malzeme iç yüzeyi hakkında elde edilecek bilgiler büyük önem kazanmıştır. Genel olarak malzemelerde gerçekleştirilen darbe testleri sonrası elde edilen veriler malzeme tarafından absorbe edilen enerjiyi ve malzemenin dayanım sınırlarını belirlemek için kullanılmaktadır. Darbe sonrası oluşacak hasar yönelimi ve hasarlı bölgenin kapladığı alan malzemenin kullanım yerleri açısından önemli bilgiler vermektedir. Örneğin bir uçağın kanat kısmında kullanılan kompozit malzemenin darbe ile karşılaştığında göstereceği hasar yöneliminin ve hasar boyutlarının önceden bilinmesi, o yön üzerine yapılacak kuvvetlendirme ile riski azaltacaktır. Bu nedenle gerçekleştirilen Charpy darbe testleri sonrası numunelere ultrasonik muayene yapılmıştır. Numune setine 50J enerji seviyesinde uygulanan Charpy darbe testi sonrası absorbe edilen enerji miktarı Tablo 3'de numunelerde oluşan hasarın mikroskopik görüntüleri Şekil 5'de gösterilmiştir.

Tablo 3. Charpy Darbe Testi Sonrası Absorbe Edilen Enerji Miktarı

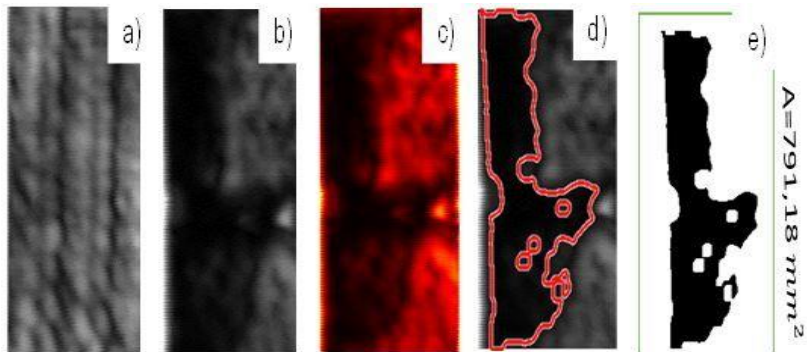
Numune Adı	Ortalama Absorbe edilen Enerji (J)	Standart Sapma	Hesaplanan Hasarlı Alan (mm ²)
CFRP	23.37	2.33	484.39
GFRP	31.08	2.23	791.18



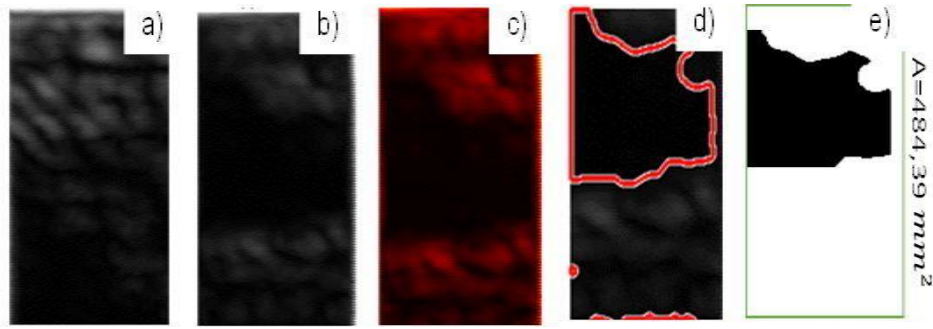
Şekil 5. Charpy Testi Sonrası (a) Cam Kompozit Numunenin Enine, (b) Karbon Kompozit Numunenin Enine, (c) Cam Kompozit Numunenin Arka Yüzeyi, (d) Karbon Kompozit Numunenin Arka Yüzeyi, (e) Cam Kompozit Numunenin Ön Yüzeyi, (f) Karbon Kompozit Numunenin Ön Yüzeyinin Mikroskopik Görüntüleri

Bu çalışmada, karbon ve cam dokuma kumaş takviyeli kompozit malzemelerde Charpy darbe testi sonrası oluşan hasarları tespit etmek için Ultrasonik C-tarama yöntemi kullanılmıştır. US 100 test cihazı ara yüzünden alınan gri görüntü formatındaki ilk görüntüler görüntü işleme algoritmaları ile düzenlemiştir. İlk olarak üretimden kaynaklı hataların tespiti için darbe testi öncesi üretilen numunelere ultrasonik muayeneye tabi tutulmuştur. Charpy testi sonrası numune formunda ve yapısında meydana gelen kırılmalar dolayısıyla numune setlerinden ultrasonik muayeneye uygun olan birer adet CFRP, GFRP numune seçilmiştir.

Charpy darbe testi öncesi (Şekil 6a, Şekil 7a,) ve sonrası numuneler ultrasonik C-tarama yöntemi ile ölçülmüş gri seviye görüntüler elde edilmiştir. Gri seviye görüntülere uygulanan “Gaussian” görüntü işleme filtresi ile geçişler yumuşatılmış, görüntü iyileştirilmiştir (Şekil 6b, Şekil 7b). Elde edilen filtrelenmiş görüntüler “hot” renk haritası kullanılarak RGB renk uzayına dönüştürülmüş (Şekil 6c, Şekil 7c) hasar yöneliminin daha net görünmesi sağlanmıştır. Filtrelenmiş görüntüler üzerindeki hasarlı alanların yöneliminin daha iyi tespit edilebilmesi için bu alanlar işaretlenmiştir (Şekil 6d, Şekil 7d). Son olarak görüntüler “otsu” prensibi kullanılarak ikili görüntüye (binary) (Şekil 6e, Şekil 7e) dönüştürülmüş, hasarlı bölgenin siyah diğer bölgelerin beyaz olarak işaretlenmesi sağlanmıştır. Bu şekilde tüm toplam piksel değerinin hasarlı bölgede ki piksel oranına bölünmesiyle hasarlı alan mm^2 cinsinden hesaplanmıştır.



Şekil 6. Cam Kumaş Takviyeli Kompozit Numunenin (a) Hasar Almadan Önce, (b) Hasar Aldıktan Sonra, (c) RGB Formatına Çevrilmiş Renklendirilmiş, (d) Hasarlı Alan Seçilmiş, (e) İkili Görüntü (Binary) Formatına Çevrilmiş Görüntüleri



Şekil 7. Karbon Kumaş Takviyeli Kompozit Numunenin (a) Hasar Almadan Önce, (b) Hasar Aldıktan Sonra, (c) RGB Formatına Çevrilmiş Renklendirilmiş, (d) Hasarlı Alan Seçilmiş, (e) İkili Görüntü (Binary) Formatına Çevrilmiş Görüntüleri

Ortalama absorblanan enerji miktarı 31,08 J olan GFRP numunelerde hasar yönelimini numunenin bir köşesinden diğer köşesine kadar boyunca uzanmaktadır. Sarkaç çekici ile numunenin temas noktasında ise hasar boyutunun arttığı görülmüştür hasarlı alan yaklaşık 791,18 mm² olarak hesaplanmıştır. CFRP numunelerde ise ortalama 23,37 J enerji absorbe edilmiş olup hasarlı alan GFRP numuneler gibi boyuna yönelim göstermekten ziyade enine bir şerit şeklinde yönelmiştir. Hasar kümelenmesi sarkaç çekici ile numunenin temas noktasının biraz üst kısmında meydana gelmiştir. CFRP malzeme ile yapılan ultrasonik taramada hasarlı alan yaklaşık olarak 484,39 mm² olarak hesaplanmıştır. GFRP numuneler CFRP numunelere nazaran daha fazla enerji absorbe etmiş ve buna bağlı olarak hasarlı alan miktarı daha fazla hesaplanmıştır. CFRP numunelerde takviye malzemesi olarak kullanılan karbon lifinin karakteristik olarak cam liflerine göre daha kırılabilir olması nedeniyle, sarkaç çekici ile ilk temas noktasında yükün dağılımı gerçekleşmeden numune üzerinde bölgesel kırılmalar meydana gelmiştir. Böylelikle numunenin kuvvetle temas noktası ve etrafı haricinde hasar oluşumu gözlemlenmemiştir. GFRP numunelerde ise hasar numune boyunca yayılmış ve numuneler daha fazla enerji absorbe etmişlerdir. Gerçekleştirilen darbe testi sonrası meydana gelen hasarlı alan ile absorbe edilen enerji miktarı arasında doğru bir orantı tespit edilmiştir.

SONUÇLAR

Üretilen numunelerin kırılırken ne kadar enerji absorbe edebileceği veya kırılma enerji miktarının önceden bilinmesi malzemenin kullanılacağı yerdeki performansını belirler. Gerçekleştirilen darbe testlerinde GFRP numuneler, CFRP numunelere göre daha fazla enerji absorbe etmiştir. GFRP numunelerin iç yapısında oluşan hasarlı bölge yönelimi ve hasarlı bölge boyutunun CFRP numunelere göre fazla olduğu tespit edilmiş, absorblanan enerjinin kompozit iç yapısında hasarlı bölgeyi artırdığı sonucuna varılmıştır. Ultrasonik C-tarama testi ve sonrasında geliştirilen görüntü işleme algoritmaları hasarı daha da belirginleştirmiş, hasar detaylarının incelenmesine fırsat sunmuş, hasar mekanizmaları yorumlanabilir hale gelmiştir. Sonuç olarak kullanılan ekipman ve uygulanan prosedürlerin, charpy darbe testi sonrası GFRP ve CFRP numunelerin incelenmesinde verimli olduğu ve hasar yöneliminin doğru bir şekilde tahminlenmesinin, yönelim bölgelerine yapılacak takviyeler ile malzeme ömrünün uzatılmasına ve malzeme veriminin artırılmasına yarar sağlayacağı anlaşılmıştır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma 2018/4-14 D nolu proje kapsamında KAHRAMANMARAŞ SÜTÇÜ İMAM ÜNİVERSİTESİ- BAP KOORDİNASYON BİRİMİ tarafından desteklenmiştir.

KAYNAKLAR

Abdullah, S. S. (2021). Low Velocity Impact Testing and Post-impact Analysis Through Compression After Impact (CAI) and C-Scan. In *Impact Studies of Composite Materials* (pp. 185-194): Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-16-1323-4_12

Adams, R., & Cawley, P. J. N. i. (1988). A review of defect types and nondestructive testing techniques for composites and bonded joints. 21(4), 208-222. [https://doi.org/10.1016/0308-9126\(88\)90333-1](https://doi.org/10.1016/0308-9126(88)90333-1).

- Arhamnamazi, S. A., Bani Mostafa Arab, N., Refahi Oskouei, A., Aymerich, F. J. J. o. A., & Mechanics, C. (2019). Accuracy assessment of ultrasonic C-scan and X-ray radiography methods for impact damage detection in glass fiber reinforced polyester composites. 5(2), 258-268. <https://doi.org/10.22055/JACM.2018.26297.1318>
- Bull, D., Helfen, L., Sinclair, I., Spearing, S., Baumbach, T. J. C. S., & Technology. (2013). A comparison of multi-scale 3D X-ray tomographic inspection techniques for assessing carbon fibre composite impact damage. 75, 55-61. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2012.12.006>
- Cawley, P., Woolfrey, A., & Adams, R. J. C. (1985). Natural frequency measurements for production quality control of fibre composites. 16(1), 23-27. [https://doi.org/10.1016/0010-4361\(85\)90654-8](https://doi.org/10.1016/0010-4361(85)90654-8)
- Ceyhun, V., & Turan, M. (2003). Tabakalı kompozit malzemelerin darbe davranışı. 44(516), 35-41.
- Chakrapani, S. K., Dayal, V., & Barnard, D. J. R. i. N. E. (2013). Detection and characterization of waviness in unidirectional GFRP using Rayleigh wave air coupled ultrasonic testing (RAC-UT). 24(4), 191-201. <https://doi.org/10.1080/09349847.2013.786158>
- De Almeida, O., Ferrero, J.-F., Escalé, L., & Bernhart, G. J. J. o. T. C. M. (2019). Charpy test investigation of the influence of fabric weave and fibre nature on impact properties of PEEK-reinforced composites. 32(6), 729-745. <https://doi.org/10.1177/0892705718778744>
- Farsani, R. E., Khalili, S., & Daghigh, V. J. I. J. o. D. M. (2014). Charpy impact response of basalt fiber reinforced epoxy and basalt fiber metal laminate composites: Experimental study. 23(6), 729-744. <https://doi.org/10.1177/1056789513511976>
- Hasiotis, T., Badogiannis, E., & Tsouvalis, N. G. J. S. v.-J. o. M. E. (2011). Application of ultrasonic C-scan techniques for tracing defects in laminated composite materials. 57(3), 192-203. <https://doi.org/10.5545/sv-jme.2010.170>
- Hayman, B., Berggreen, C., & Tsouvalis, N. (2007). A review of the causes of production defects in marine composite structures and their influence on performance. Paper presented at the Proceedings of the 1st International Conference on Marine Structures.
- Ho, S. V. (2009). Principles of the manufacturing of composite materials: DEStech Publications, Inc. Concordia University, Montreal, Canada ISBN 978-1-60595-421-9
- Hsu, D. K., Barnard, D. J., Peters, J. J., & Dayal, V. (2000). Physical basis of tap test as a quantitative imaging tool for composite structures on aircraft. Paper presented at the AIP Conference Proceedings. <https://doi.org/10.1063/1.1306256>
- Hufenbach, W., Ibraim, F. M., Langkamp, A., Böhm, R., Hornig, A. J. C. S., & Technology. (2008). Charpy impact tests on composite structures—an experimental and numerical investigation. 68(12), 2391-2400. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2007.10.008>
- Iskandarani, M. Z. (2019). Abnormalities in Ultrasonic (C-Scan) Images of Composite Structures: Impact Damaged Versus Hole Damaged. <https://doi.org/10.3844/jcssp.2019.972.982>
- Kalthoff, J. J. C. P. B. E. (2004). Characterization of the dynamic failure behaviour of a glass-fiber/vinyl-ester at different temperatures by means of instrumented Charpy impact testing. 35(6-8), 657-663. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2003.11.008>
- Kroworz, A., Katunin, A. J. S. D., & Monitoring, H. (2018). Non-destructive testing of structures using optical and other methods: A review. 12(1), 1. <https://doi.org/10.3970/sdhm.2018.012.001>
- Lauderdale, S. F., & Stewart, R. J. R. P. (2010). COMPOSITES 2011—looking to the US industry's future. 54(6), 40-44. [https://doi.org/10.1016/S0034-3617\(10\)70216-2](https://doi.org/10.1016/S0034-3617(10)70216-2)
- Mazumdar, S. (2014). Strategic growth opportunity in composites industry. Paper presented at the Composites Executives Forum. Washington, DC April.
- Mix, P. E. (2005). Introduction to nondestructive testing: a training guide: John Wiley & Sons. ISBN: 978-0-471-42029-3

- Munoz, V., Valès, B., Perrin, M., Pastor, M.-L., Weleman, H., Cantarel, A., & Karama, M. J. C. P. B. E. (2016). Damage detection in CFRP by coupling acoustic emission and infrared thermography. 85, 68-75. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.09.011>
- Nascimento, L. F. C., Monteiro, S. N., Louro, L. H. L., da Luz, F. S., dos Santos, J. L., de Oliveira Braga, F., & Marçal, R. L. S. B. (2018). Charpy impact test of epoxy composites reinforced with untreated and mercerized mallow fibers. *Journal of Materials Research and Technology*, 7(4), 520-527. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2018.03.008>
- Pereira, A. C., Monteiro, S. N., de Assis, F. S., Margem, F. M., da Luz, F. S., de Oliveira Braga, F. J. J. o. M. R., & Technology. (2017). Charpy impact tenacity of epoxy matrix composites reinforced with aligned jute fibers. 6(4), 312-316. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2017.08.004>
- Richardson, M., Wisheart, M. J. C. P. A. A. S., & Manufacturing. (1996). Review of low-velocity impact properties of composite materials. 27(12), 1123-1131. [https://doi.org/10.1016/1359-835X\(96\)00074-7](https://doi.org/10.1016/1359-835X(96)00074-7)
- Santos, M., Santos, J., Reis, P., & Amaro, A. J. M. T. (2021). Ultrasonic C-scan techniques for the evaluation of impact damage in CFRP. 63(2), 131-137. <https://doi.org/10.1515/mt-2020-0020>
- Selver, E., Öztaş, B., Uçar, M., Ucar, N., Baydogan, M., Altay, P., & Geygel, B. (2021). Mechanical and thermal properties of glass/epoxy composites filled with silica aerogels. *Plastics, Rubber and Composites*, 50, 1-13. <https://doi.org/10.1080/14658011.2021.1903142>
- Selver, E., & Kaya, G. (2019). Flexural properties of sandwich composite laminates reinforced with glass and carbon Z-pins. 53(10), 1347-1359. <https://doi.org/10.1177/0021998318800146>
- Shokrieh, M. M., Torabizadeh, M. A., & Fereidoon, A. (2011). Dynamic failure behavior of glass/epoxy composites under low temperature using Charpy impact test method. ISSN: 0975-1017 (Online); 0971-4588 (Print) <http://hdl.handle.net/123456789/12468>
- Tabrej, K., Sultan, M., Jawaid, M., Shah, A., & Sani, S. (2021). Low Velocity Impact, Ultrasonic C-Scan and Compression After Impact of Kenaf/Jute Hybrid Composites. In *Impact Studies of Composite Materials* (pp. 73-85): Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-16-1323-4_6
- Thollon, Y., & Hochard, C. J. M. o. M. (2009). A general damage model for woven fabric composite laminates up to first failure. 41(7), 820-827. <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2009.02.009>
- Tuo, H., Lu, Z., Ma, X., Zhang, C., & Chen, S. J. C. P. B. E. (2019). An experimental and numerical investigation on low-velocity impact damage and compression-after-impact behavior of composite laminates. 167, 329-341. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.12.043>
- Wu, D., Steegmüller, R., Karpen, W., & Busse, G. (1995). Characterization of CFRP with lockin thermography. In *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation* (pp. 439-446): Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-1987-4_52
- Yolacan, G. (2018). Comparison of the impact damage resistance of non-hybrid and intra-ply hybrid carbon/E-glass/polypropylene non-crimp thermoplastic composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. <https://doi.org/10.1177/0731684418805561>