

ULTRASONİK C-TARAMA YÖNTEMİ KULLANILARAK ELYAF TAKVİYELİ KOMPOZİT MALZEMELERİN KALİTE KONTROLÜ

QUALITY CONTROL OF FIBER REINFORCED COMPOSITE MATERIALS USING ULTRASONIC C-SCAN METHOD

Burak ÖZTAŞ

Dr. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Tekstil Mühendisliği Bölümü, Kahramanmaraş/Türkiye
ORCID: 0000-0002-8789-155X

ÖZET

Bu çalışmada, kompozit malzemelerin üretim hatalarını incelemek amacıyla elyaf takviyeli kompozit malzemeler içerisinde en yaygın kullanım alanına sahip karbon ve cam dokuma kumaşlardan vakum infüzyon yöntemi kullanılarak kompozitler üretilmiştir. Üretilen kompozitlerin ana bileşenlerinden olan matris malzemenin (reçine) takviye malzemesi üzerinde dağılımı ultrasonik C-tarama yöntemi ile incelenmiştir. Kompozit plakalardan merkezden ve köşeden olmak üzere 2 tip örnek alınmış, doğrudan geçişli ultrasonik muayene (TTU) prensibine göre çalışan daldırma tipi ultrasonik tarama tezgahında 3 MHz frekansa sahip prob çifti ile muayene edilmiştir. Elde edilen ilk görüntüler geliştirilen görüntü işleme algoritmaları ile düzenlenmiştir.

Yapılan incelemeler sonucunda plaka merkezinden alınan örneklerle köşelerden alınan örneklerde homojen olmayan reçine dağılımı gözlemlenmiştir. Ham görüntülerde fark edilemeyen ayrıntılar görüntü işleme adımları sonrasında belirgin bir şekilde görülmüştür. Kullanılan yöntem ve geliştirilen görüntü işleme algoritmaları üretim sürecinde meydana gelen hataların tespitinde başarılı sonuçlar vermiştir.

533

Anahtar Kelimeler: Kompozit, Ultrasonik Test, C-Tarama, Görüntü İşleme, Kalite Kontrol

ABSTRACT

In this study, composites were produced from carbon and glass woven fabrics, the most widely used fiber-reinforced composite materials, using the vacuum infusion method to examine the production defects of composite materials. The orientation of the matrix material (resin), one of the main components of the composites, on the reinforcement material was investigated by the ultrasonic C-scan method. Two types of samples were taken from the composite plates, from the center and the corner, and were examined with a pair of probes with a frequency of 3 MHz on an immersion type ultrasonic test operating according to the through-transmission method (TTU) principle. The first images obtained were arranged with the developed image processing algorithms.

As a result of the examinations, non-homogeneous resin orientation was observed in the samples taken from the corners compared to the samples taken from the center of the plate. The details that could not be noticed in the raw images were clearly seen after the image processing steps. The method used and the developed image processing algorithms gave successful results in detecting the errors that occurred in the production process.

Keywords: Composite, Ultrasonic Testing, C-Scan, Image Processing, Quality Control

1. GİRİŞ

Kompozit malzemelerin mühendislik uygulamalarında kullanımı, sağladıkları üstün özellikler sayesinde son yıllarda giderek artmaktadır (Dow & Dexter, 1997; Xia & Wu, 2010). Bu özellikler korozyon direnci, yüksek mukavemet-ağırlık oranı, yüksek ısı mukavemeti olarak sıralanabilir.

Minimum ağırlıkta maksimum mukavemetin sağlanması, yüksek teknoloji ürünlerinde en fazla aranan özelliklerin başında gelmektedir (Sur, 2008). Bu sebeple özellikle havacılık, savunma, spor ve otomotiv sanayii gibi alanlarda kompozitlerin kullanımı giderek yaygın hale gelmektedir (Hoa, 2009; Kamiya et al., 2000; Strong, 2008). Kompozit malzemeler sağladıkları avantajların yanı sıra bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Bunlar yüksek maliyetli oluşları, geri dönüştürülmesinin mümkün olmaması, kırılabilirlik gibi özellikleridir. Ancak son yıllarda gelişen üretim teknolojileriyle birçok sorunun önüne geçilebilmektedir (Mazumdar, 2014).

Kompozit malzemeler homojen olmayan malzemeler olduğundan dolayı, kusurların şekli ve mekanik performans üzerindeki etkileri metalik malzemelerden oldukça farklı ve daha karmaşıktır. Genel olarak, kompozitler, tek bir kusurun büyümesi yoluyla hasar biriktirmezler, bunun yerine, delaminasyonun gelişmesine yol açan sayısız küçük matris kusurunun başlamasıyla biriktirirler (Fahr, 1992). Bu nedenle kompozit hasarlarının modellenmesinde birtakım zorluklar yaşanmaktadır. Kompozit malzemelerde hatalar kullanım sırasında ve imalat sürecinde meydana gelebilmektedir. Kullanım sırasında oluşabilecek hataların tespiti imalat sürecinde meydana gelen hatalara kıyasla daha kolay yapılabilmektedir. İmalat sürecinde meydana gelen, laminer boşluklar, yabancı maddelerin karışması, yanlış elyaf yönlendirmesi ve homojen olmayan reçine dağılımı olarak sıralanabilir (Huang et al., 2005). Özellikle kompozit malzemeyi meydana getiren ana yapılardan biri olan reçinenin (matris malzeme), takviye malzemesi üzerine homojen bir şekilde dağılmasında birtakım zorluklar yaşanabilmekte, bu da doğrudan malzeme özelliklerini etkilemektedir. Homojen olmayan bir malzemede hatalar en düşük dayanıma sahip bölgelerde başlamakta, bu da malzemenin toplam dayanımına etki etmektedir (Mallick, 1988).

Kullanıldıkları kritik alanlar itibariyle kompozit malzemelerde yapılacak hasar analizleri ve testler büyük önem taşımaktadır. Yapılacak olan testin hem kompozit malzemeye zarar vermemesi hem de numune üzerinde yer alan hasar alanlarını başarılı bir şekilde belirlemesi gerekmektedir. Kompozit malzemelerde hasar analizinin birçok tahribatlı ve tahribatsız test yöntemi vardır (Adams & Cawley, 1988; Oral, 2011). Tahribatsız testler malzemenin bütünlüğünü bozmadan gerçekleştirilen test yöntemlerinin genel adıdır. Tahribatsız muayene sadece mamul ürünlerin değil, aynı zamanda yarı mamul ve hatta hiç işlem görmemiş malzemelerin kalite kontrolünde önemli rol almaktadır. Tahribatsız muayene üretim işlemlerinin her aşamasında, ürün kalitesinin izlenmesinde ve yeni bir ürün geliştirilmesi sırasında kullanılabilir (Gür, 2003). Tahribatsız yöntemler arasında kompozit malzemelerin muayenesinde en fazla kullanılan ultrasonik C-tarama yöntemidir (Oral, 2011). Bu yöntem malzeme üzerine gönderilen ses dalgalarının süresizliğe çarpıp geri dönmesi esasına göre malzemenin plan tipi görüntüsünün çıkarılmasını kapsamaktadır (Adams & Cawley, 1988). Literatür incelendiğinde kompozit malzemelerle yapılan ultrasonik C-tarama testleri, genel olarak hasar sonrası, hasar boyutlarının belirlenmesi, kompozit malzeme içerisine yerleştirilen yabancı madde ve yapay hasarların tespiti, istifleme özelliklerinin bağlanmaya etkisi ve üretim sırasında oluşan hataların tespiti gibi özellikleri araştırmak için kullanılmaktadır (Hasiotis et al., 2011; Kamar et al., 2015; Papa et al., 2017; Pinto et al., 2020; Tsao et al., 2012).

Post ve ark (Post et al., 2017) yaptıkları çalışmada karbon/epoksi kompozitler içerisine yerleştirilen 2 ve 5 cm çapında deliklerin tespitinde ultrasonik test yöntemini kullanmışlardır. Rao ve ark (Rao et al., 2016) E-cam/epoksi ve E-cam/fenolik kompozitlerde yüksek hızlı darbe etkisi altında oluşacak hasarın tespitini ultrasonik C-tarama yöntemi kullanarak gerçekleştirmiştir. Blandford ve Jack (Blandford & Jack, 2020) ise karbon takviyeli kompozitlerde düşük hızlı darbe etkisini araştırdıkları çalışmalarında darbe öncesi ve sonrası numunelere ultrasonik test uygulamış, darbeden önceki test, kompozitin uygun şekilde üretildiğini doğrulamak için kullanılmış, darbe sonrası görüntülerini desteklemek için bir referans elde edilmiştir. Bir başka çalışmada Dong ve ark (Dong et al., 2015) cam / polieterimid kompozitlerin üretim aşamasında delaminasyon oluşturmak amacıyla katlar arasına 6 mm ve 12 mm çapa sahip 250 µm çapında teflon filmlerin tespitinde ultrasonik C-tarama yöntemini kullanmışlardır. Fahr ve Kandeil (Fahr, 1992) yaptıkları çalışmada elyaf takviyeli kompozitlerin imalatı veya kullanımı sırasında oluşabilecek kusur tiplerini araştırmak amacıyla

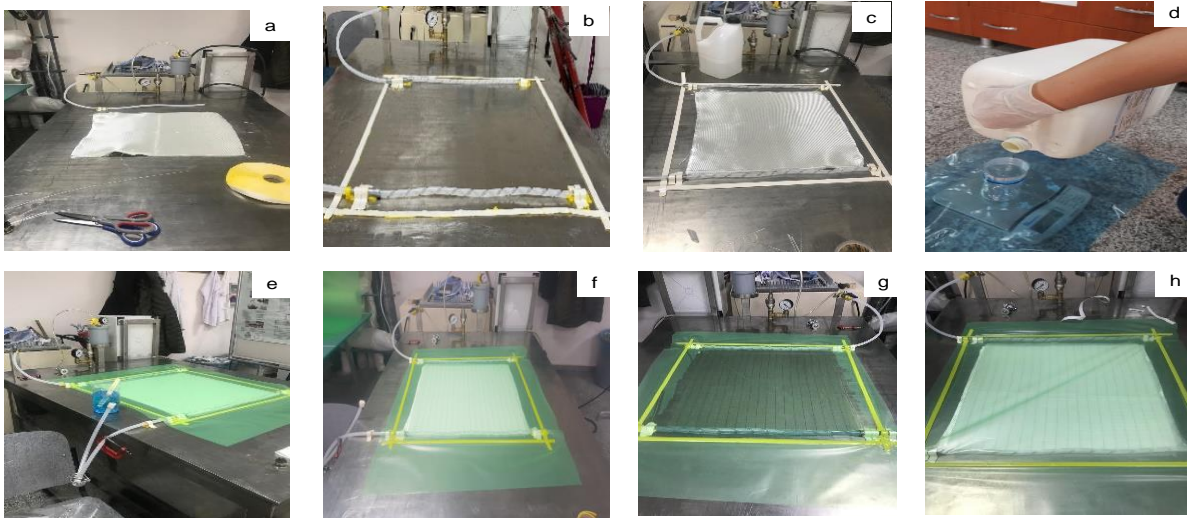
karbon/epoksi kompozitler üretmiş ve bunların ultrasonik C-tarama yöntemi kullanarak tespit etmişlerdir.

Yapılan çalışmada cam ve karbon dokuma kumaş takviyeli kompozitler vakum infüzyon yöntemi ile üretilmiş, üretilen kompozitler kalite kontrol amacıyla ultrasonik C-tarama testi yapılmıştır. Yapılan ultrasonik C-tarama testi sonrası elde edilen veriler geliştirilen görüntü işleme algoritmalarıyla işlenerek matris malzeme olarak kullanılan epoksinin numune üzerinde ki dağılımı izlenmiş, kullanım ömrünü kısaltacak üretim kaynaklı hatalar incelenmiştir.

2. MATERYAL METOT

2.1. Kompozitlerin Üretimi

Üretilen numunelerde takviye elamanı olarak 2/2 dimi doku yapısına sahip, 245 g/m² gramajlı karbon dokuma kumaş ve 2/2 dimi doku yapısına sahip 280 g/m² gramajlı cam dokuma kumaş kullanılmıştır (Çizelge 1). Matris malzemesi olarak tüm numuneler için Hexion MGS L160 epoksi reçine ve epoksi ağırlığının %25'i kadar Hexion MGS H160 sertleştirici kullanılmıştır. Tüm üretimler vakum infüzyon yöntemine göre çalışan Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Tekstil Mühendisliği bölümü kompozit laboratuvarında bulunan VI-1 makinesinde gerçekleştirilmiştir. Karbon ve cam dokuma kumaşlardan her bir numune üretimi için 500 mm×500 mm boyutlarında 6 kat kesilmiştir (Şekil 1a). Vakum infüzyon masası hazırlanmış (Şekil 1b), kesilen dokuma kumaşlar [0°/0°]₆ serim yönünde yerleştirilmiştir (Şekil 1c). Kesme esnasında oluşabilecek filament kaymalarını engellemek amacıyla dokuma kumaş kenarları bantlanmıştır. Kesilen takviye dokuma kumaşlar hassas terazide tartılmış, epoksi oranı belirlenmiştir (Şekil 1d). Vakum infüzyon makinesinde üretim boyutlarına göre yerleştirilmiş, üretim geçilmiştir (Şekil 1e, Şekil 1f, Şekil 1g, Şekil 1h) Reçinenin kompozitin her tarafına emdirilmesinden sonra vakumlama sistemi durdurulmuş, tabla özel bir sistemle ısıtılarak numune 1 saat 80 ° 'de kürleşmeye bırakılmıştır.

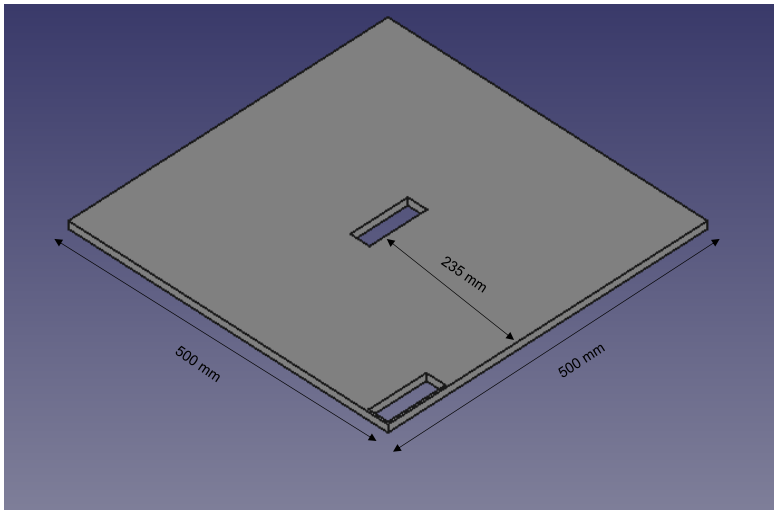


Şekil 1. Kompozit numunelerin vakum infüzyon yöntemi ile üretimi

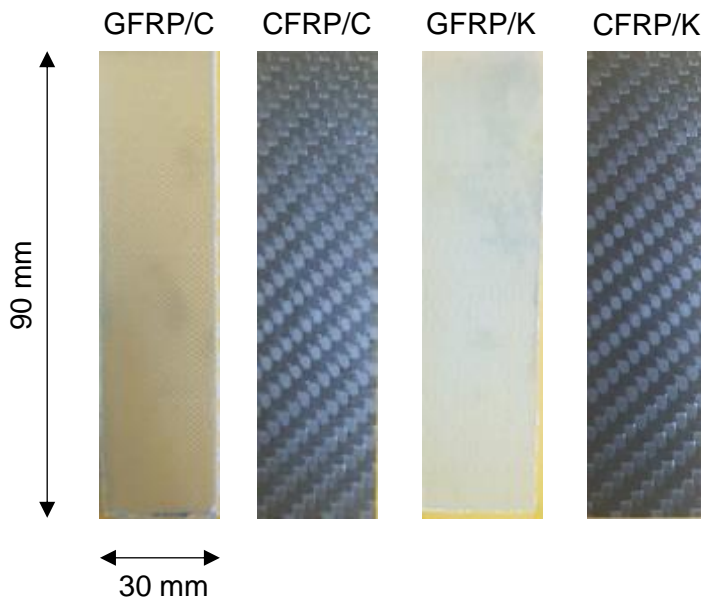
Çizelge 1. Üretimlerde kullanılan dokuma kumaş takviye malzemesi özellikleri

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

Vakum infüzyon makinesinden alınan karbon ve cam dokuma kumaş takviyeli kompozit malzemelerin 90 mm x 30 mm boyutlarında orta (GFRP/C, CFRP/C) ve (GFRP/K, CFRP/K) köşe kısımlarından (Şekil 2) iki numune alınarak teste hazır hale getirilmiştir (Şekil 3). Hazırlanan numunelerin kalınlığı cam dokuma kumaş takviyeli kompozitlerde 1,75 mm ±10, cam dokuma kumaş takviyeli kompozitlerde 1,90 mm ±10 olarak ölçülmüştür.



Şekil 2. Test numunelerinin kesildiği bölgeler

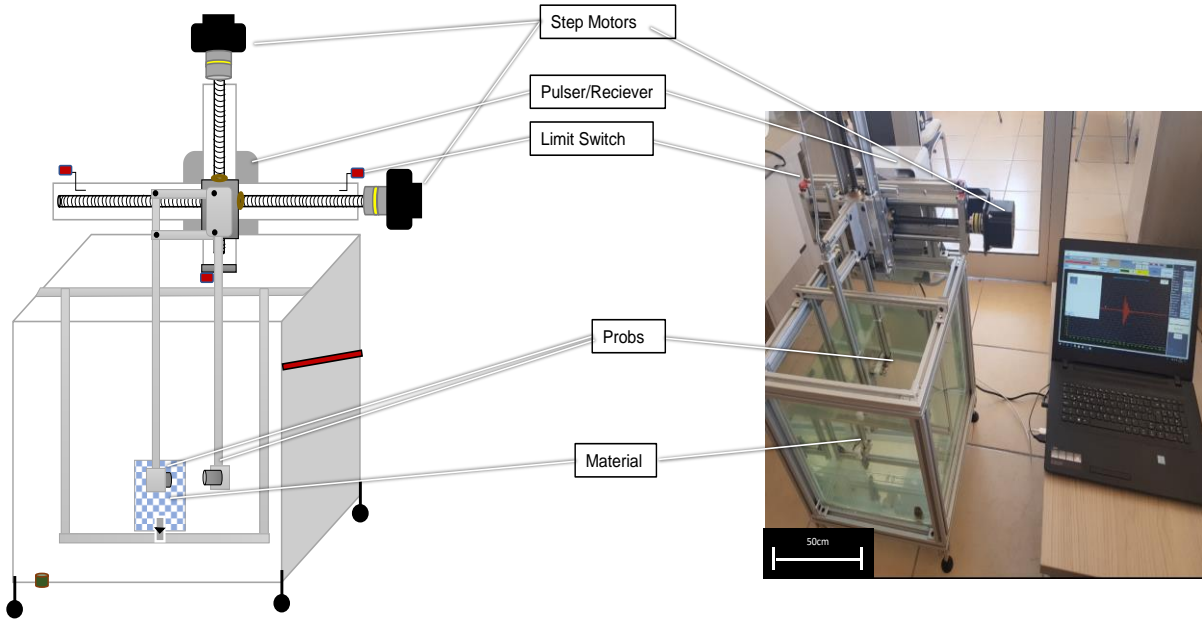


Şekil 3. Test numuneleri

2.2. Ultrasonik Muayene

Üretilen numunelerde üretilen kompozitlerin ürün kalitesinin izlenmesi, kalite kontrol amacıyla ultrasonik test yöntemi kullanılmıştır.

Gerçekleştirilen testler daldırma tipi USDSA ultrasonik görüntüleme cihazında doğrudan geçişli ultrasonik test (TTU) yöntemi uygulanarak yapılmıştır. TTU yönteminde muayene karşılıklı iki prob kullanılarak gerçekleştirilmiştir, problardan biri verici diğeri de alıcı olarak görev yapmıştır. Bu şekilde sinyal kuvvetinin zayıf olduğu durumlarda dahi bu yöntem süreksizlikleri tespit etmekte büyük başarı göstermektedir. Daldırma tipi olarak adlandırılan sistemlerde malzemede yararlı seviyelerde ses enerjisi almak için, prob ve numune arasındaki havanın giderilmesi adına numune bir su tankı içerisinde muayene edilmiş, karşılıklı iki probun senkronize hareketine ihtiyaç duyulduğundan dolayı, otomatikleştirilmiş sistem kullanılmıştır (Şekil 4).



Şekil 4. USDSA Ultrasonik test cihazı

Su tankına yerleştirilen numunelerden, 3 MHz frekansa sahip daldırma tipi probalar ile veri toplanmıştır. Alınan sinyal verileri hazırlanan yazılım aracılığı ile görüntüye dönüştürülmüştür. Ara yüzden alınan gri görüntü formatındaki ilk görüntüler görüntü işleme algoritmaları ile düzenlenerek hatalı bölge işaretlenmiştir.

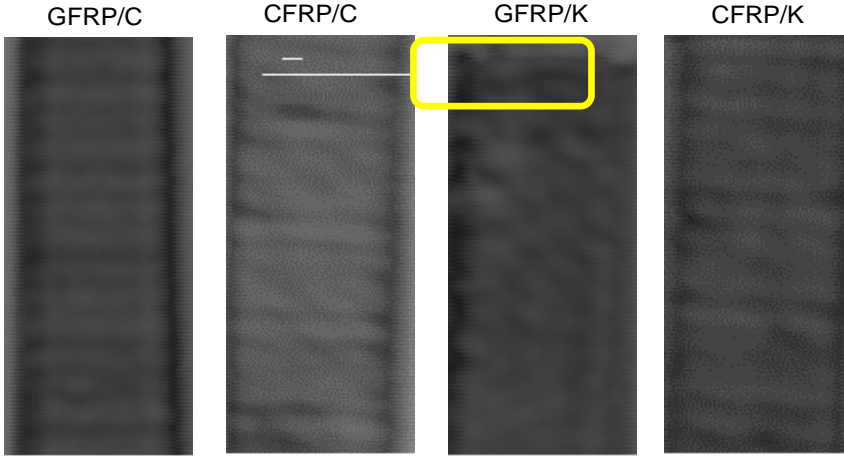
2.3. Görüntü İşleme

USDSA daldırma tipi ultrasonik muayene cihazında test edilmiş, numunelerden elde edilen sinyaller ara yüz vasıtasıyla gri seviye görüntülere dönüştürülmüştür. Gri seviye görüntüler MATLAB paket programı kullanılarak işlenmiştir.

Uygulanan gauss filtresi ile arka plan dokusu zayıflatılarak, bulanıklaştırılmıştır. Elde edilen filtrelenmiş görüntülere RGB renk uzayında dönüştürülerek “hot” ve “colorcube” renk haritaları kullanılarak hatalı bölgenin daha net görünmesi sağlanmıştır. Sonrasında aslında bir sinyal işleme prosesi olan ayırık dalgacık yöntemi kullanılmış (DWT) bu şekilde hatalı bölgenin ayrıştırılabilmesi amaçlanmıştır. DWT yöntemi kullanılarak görüntü dört alt görüntüye; yaklaşık görüntü ve detay görüntüleri (yatay, dikey ve çapraz detaylar) ayrılmıştır. DWT yönteminde ‘db5’ tipi dalgacık kullanılarak tek bir çözünürlük seviyesinde alt görüntüler elde edilmiştir.

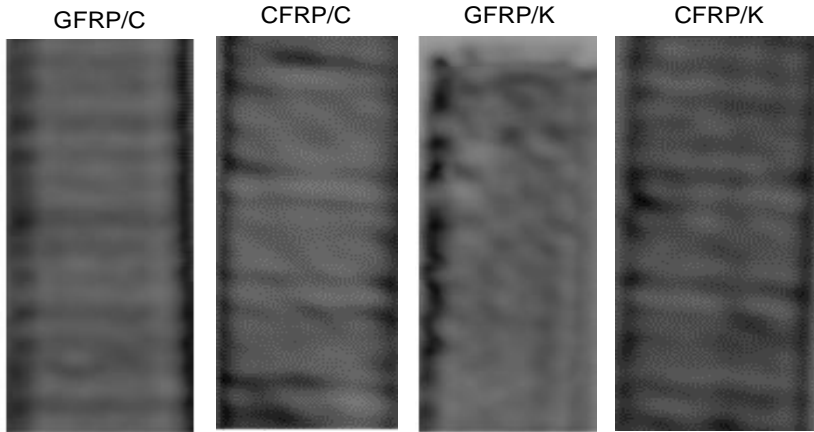
3. BULGULAR

Üretilen cam ve karbon dokuma kumaş takviyeli numunelerin orta ve kenar kısımlarından alınan örnekler USDSA ultrasonik görüntüleme cihazına yerleştirilmiş, TTU yöntemine göre 3 MHz frekansa sahip probalar ile muayene edilmiş ve ilk gri skala görüntüler elde edilmiştir (Şekil 5).



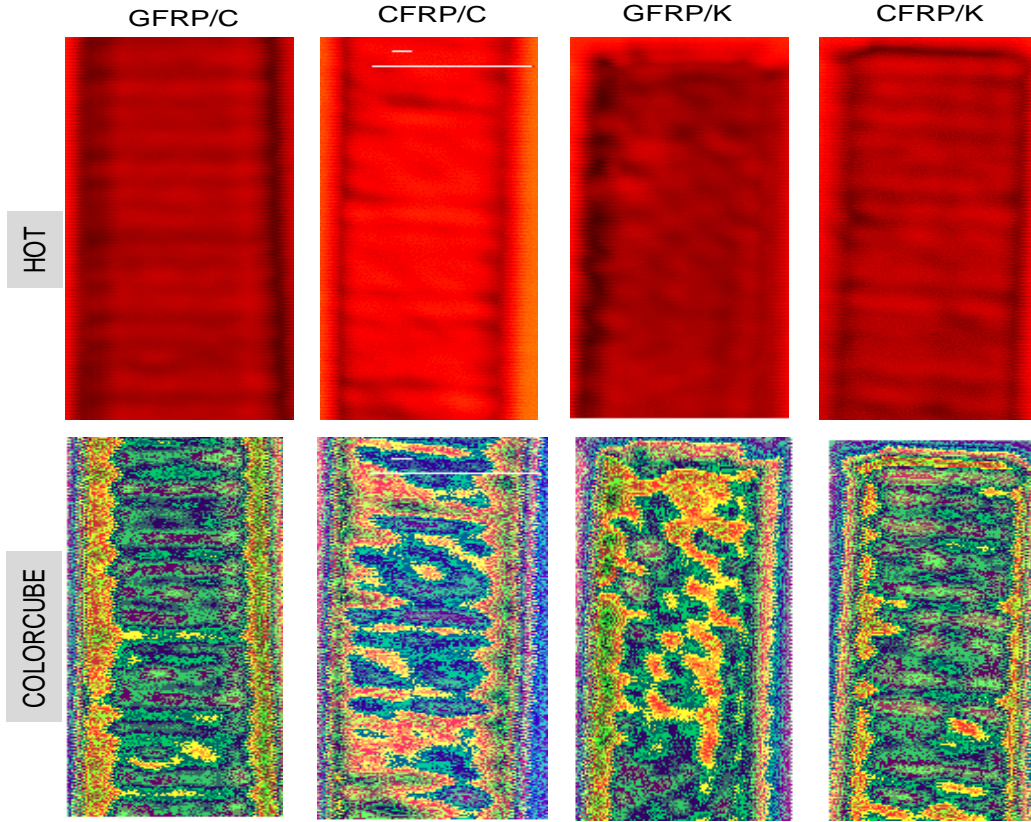
Şekil 5. İlk test görüntüleri (Gri skala)

Alınan ilk ham görüntülerde bulunan gürültü ve düzgünsüzlükler sebebiyle hasar analizi yapmak kolay olmamış elde edilen görüntüler görüntü işleme algoritmaları ile düzenlenmiştir. İlk görüntülerde arka plan bulanıklaştırılarak (Gauss filtresi) görüntü iyileştirilmiştir (Şekil 6). CFRP/C numunesinde işaretli alanda bulunan gürültü bu şekilde giderilmiş, bulanıklaşma işlemi görüntülerdeki farklı noktaları ilk görüntülere nispeten daha seçilebilir hale getirmiştir.



Şekil 6. Gauss filtresi uygulanan görüntüler

Elde edilen bu filtrelenmiş görüntüler RGB renk uzayına dönüştürülmüş bu dönüşüm yapılırken “hot” ve “colorcube” renk haritaları kullanılarak (Şekil 7) farklılıkların farklı renk tonlarıyla daha net görünmesi sağlanmıştır. Hot renk haritası numunelerdeki geçiş noktalarını renk tonlarının değişimiyle daha seçilebilir hale getirmiştir. Colorcube renk haritasının kullanımıyla daha seçilebilir ayrıntılı ve keskin geçişler tespit edilmiştir.

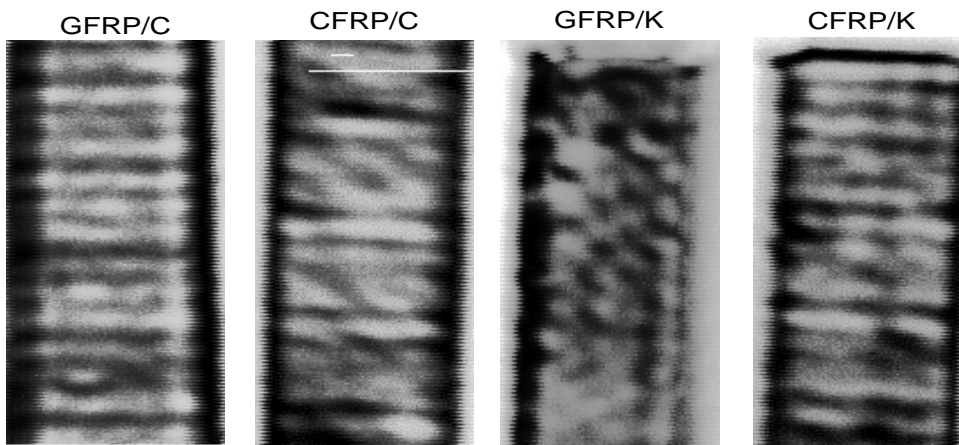


Şekil 7. RGB görüntüler

Colorcube renk haritası ile işlenen görüntülerde homojen olmayan epoksi dağılımı ve numune ana yapısı farklı renk tonları olarak görülmüştür. Sarı ve turuncunun tonları olarak görülen bölgeler epoksi yoğun bölgeleri temsil etmektedir. Görüntüler incelendiğinde cam ve karbon dokuma kumaş takviyeli kompozitlerde orta kısımdan alınan numunelerde, köşeden alınan numunelere kıyasla daha homojen bir reçine dağılımı görülmektedir. Genel olarak malzeme yüzeyinde farklılıklar gözlemlenmiş, GFRP/K numunesindeki yüksek oranda epoksi birikintileri sebebiyle yoğun renklerin görüldüğü düşünülmektedir.

539

Sonrasında ayrık dalgacık yöntemi kullanılmış (DWT) bu şekilde hatalı bölgenin ayrıştırılması gerçekleştirilmiştir (Şekil 8). DWT yönteminde ayrıştırılan alanlar ile Colorcube renk haritası ile renklendirilen görüntülerde ki alanlar birebir benzerlik göstermiştir.



Şekil 8. DWT yöntemi uygulanan görüntüler

Yukarıda bahsedilen işlem adımları her iki tipte 4 adet numune için sırasıyla gerçekleştirilmiştir. Epoksi yoğun bölgeler daha koyu renk tonları ile gözlemlenmiştir.

4. SONUÇ

Yapılan bu çalışmada kompozit malzemelerin vakum infüzyon yöntemi ile üretim esnasında meydana gelmesi muhtemel homojen olmayan epoksi reçine dağılımları ultrasonik test yöntemleri kullanılarak incelenmiştir. Ultrasonik görüntüleme sonrası hasarların daha iyi anlaşılabilmesi için görüntü işleme algoritmaları geliştirilmiş, üretilen numune setleri üzerinde uygulanmıştır. Bu şekilde reçine bakımından zengin ve fakir alanlar belirlenmiştir.

- Ultrasonik C-tarama testi ve gerçekleştirilen görüntü işleme adımları sonrası numunelerde homojen olmayan bölgelerin seçimi daha kolay hale gelmiştir.
- DWT yöntemi ve Colorcube renk haritası ile hataların belirlenmesinde başarılı sonuçlar elde edilmiştir.
- Reçine yoğun bölgeler DWT yönteminde koyu, Colorcube renk haritasında sarı ve turuncunun renk tonları olarak gözlemlenmiştir.
- Kompozit plakanın orta kısımlardan alınan örneklerdeki epoksi dağılımının köşeden alınan örneklerle kıyasla daha homojen olduğu görülmüştür.
- Numune sınırlarında gözlemlenen daha koyu renk tonlarının ultrasonik test yönteminde kenarlarda meydana gelen sinyal saçılımından kaynaklandığı tespit düşünülmektedir.

Sonuç olarak kullanılan ekipman ve uygulanan prosedürlerin, karbon ve cam dokuma kumaş takviyeli kompozit numunelerin epoksi dağılımının incelenmesinde verimli olduğu düşünülmektedir.

KAYNAKÇA

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.

Blandford, B. M., & Jack, D. A. (2020). High resolution depth and area measurements of low velocity impact damage in carbon fiber laminates via an ultrasonic technique. *Composites Part B: Engineering*, *188*, 107843.

Dong, J., Kim, B., Locquet, A., McKeon, P., Declercq, N., & Citrin, D. (2015). Nondestructive evaluation of forced delamination in glass fiber-reinforced composites by terahertz and ultrasonic waves. *Composites Part B: Engineering*, *79*, 667-675.

Dow, M., & Dexter, H. J. N. T. R., NASA/TP-97-206234. (1997). Development of stitched, braided and woven composite structures in the ACT program and at Langley Research Center (<http://techreports.larc.nasa.gov/ltrs/PDF/1997/tp/NAS A-97-tp206234.pdf>).

Fahr, A. (1992). Ultrasonic C-scan inspection of composite materials.

Gür, C. H. (2003). Investigation of microstructure–ultrasonic velocity relationship in SiCp-reinforced aluminium metal matrix composites. *Materials Science Engineering: A*, *361*(1-2), 29-35.

Hasiotis, T., Badogiannis, E., & Tsouvalis, N. G. (2011). Application of ultrasonic C-scan techniques for tracing defects in laminated composite materials. *Strojniški vestnik-Journal of Mechanical Engineering*, *57*(3), 192-203.

Hoa, S. V. (2009). *Principles of the manufacturing of composite materials*. DEStech Publications, Inc.

Huang, H., Talreja, R. J. C. S., & Technology. (2005). Effects of void geometry on elastic properties of unidirectional fiber reinforced composites. *65*(13), 1964-1981.

Kamar, N. T., Hossain, M. M., Khomenko, A., Haq, M., Drzal, L. T., & Loos, A. (2015). Interlaminar reinforcement of glass fiber/epoxy composites with graphene nanoplatelets. *Composites Part A: Applied Science Manufacturing*, *70*, 82-92.

Kamiya, R., Cheeseman, B. A., Popper, P., Chou, T.-W. J. C. s., & technology. (2000). Some recent advances in the fabrication and design of three-dimensional textile preforms: a review. *60*(1), 33-47.

- Mallick, F. R. C. (1988). New York. In: Marcel Dekker Inc.
- Mazumdar, S. (2014). Strategic growth opportunity in composites industry. Composites Executives Forum. Washington, DC April,
- Oral, İ. (2011). *Çeşitli Polifonksiyonel Gruplu Modifiye Polistirenler ile Epoksi Reçinelerin Sentezi ve Bunlardaki Ultrases Hızlarının Ölçülmesi* Selçuk Üniversitesi].
- Papa, I., Lopresto, V., Simeoli, G., Langella, A., & Russo, P. (2017). Ultrasonic damage investigation on woven jute/poly (lactic acid) composites subjected to low velocity impact. *Composites Part B: Engineering*, 115, 282-288.
- Pinto, F., Boccarusso, L., De Fazio, D., Cuomo, S., Durante, M., & Meo, M. (2020). Carbon/hemp bio-hybrid composites: Effects of the stacking sequence on flexural, damping and impact properties. *Composite structures*, 242, 112148.
- Post, W., Kersemans, M., Solodov, I., Van Den Abeele, K., Garcia, S. J., & Van Der Zwaag, S. (2017). Non-destructive monitoring of delamination healing of a CFRP composite with a thermoplastic ionomer interlayer. *Composites Part A: Applied Science Manufacturing*, 101, 243-253.
- Rao, M. S., Reddy, T. S., Reddy, P. R. S., Madhu, V., & Murthy, B. (2016). *Post impact damage evaluation of high velocity impacted E-glass composites using Immersion Ultrasonic C-scan technique* 8th International Symposium on NDT in Aerospace,, Bangalore, India.
- Strong, A. B. (2008). *Fundamentals of composites manufacturing: materials, methods and applications*. Society of manufacturing engineers.
- Sur, G. J. G. Ü. F. B. E., Doktora Tezi, Ankara. (2008). Karma takviyeli alüminyum matriksli kompozitlerin üretimi, mekanik özellikler ve işlenebilirliklerinin incelenmesi.
- Tsao, C., Kuo, K., & Hsu, I. (2012). Evaluation of a novel approach to a delamination factor after drilling composite laminates using a core-saw drill. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 59(5), 617-622.
- Xia, F., & Wu, X.-q. J. C. s. (2010). Study on impact properties of through-thickness stitched foam sandwich composites. 92(2), 412-421.