

ÜÇ BOYUTLU DOKUMA KUMAŞ TAKVİYELİ SANDVIÇ KOMPOZİTLERDE YÜZEYLERDEKİ ELYAF KATMAN SAYISININ EĞİLME DAVRANIŞINA ETKİSİ

Rukiye ERTAN^{*ID}
Abdil KUŞ^{*ID}
İsmail DURGUN^{**ID}

Alınma: 15.03.2019; düzeltme: 10.10.2019; kabul: 23.10.2019

Öz: Bu çalışmada karbon elyaf yüzeyli üç boyutlu dokuma sandviç kompozit yapıların farklı yüzey katman sayısının eğilme davranışına etkisi incelenmiştir. Alt ve üst yüzey malzemesi olarak kullanılan reçine emdirilmiş karbon elyaflar vakum infüzyon tekniği kullanılarak 2, 3 ve 4 katman halinde üç boyutlu ara kumaşa birleştirilmiştir. Reçine malzemesi olarak epoksi ve polyester olmak üzere iki farklı polimer malzeme kullanılmıştır. Farklı yüzey kalınlıklarına ve reçine malzemesine sahip sandviç kompozit plakalar standartlara uygun numuneler halinde kesilmiştir. Eğilme davranışını test etmek için oda sıcaklığında üç nokta eğilme deneyleri yapılmış ve numunelerin eğilme kuvveti-sehim eğrileri oluşturulmuştur. Sonuçlar, sandviç kompozitlerin yüzey malzemesi katman sayısı artışı ile birlikte eğilmeye karşı dirençlerinin arttığını göstermiştir. Epoksi matrisli kompozitlerin polyestere kıyasla daha yüksek dayanım sergiledikleri ve katman kalınlığına bağlı dayanımın artışının daha fazla olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Sandviç kompozit, Karbon elyaf, Katman, Eğilme, Reçine.

Effect of Number of Surface Fiber Layers on Flexural Behavior in Three Dimensional Integrated Woven Spacer Reinforced Sandwich Composites

Abstract: In this study, the effect of number of surface layers on the flexural behavior of carbon fiber surfaced 3D integrated woven spacer sandwich composite structures was investigated. The resin impregnated carbon fibers used as the bottom and top surface material were joined to the three-dimensional intermediate fabric in 2, 3 and 4 layers using a vacuum infusion technique. Two different polymer materials, epoxy and polyester, were used as resin material. The composite sandwiches plates with different surface thicknesses and resin materials are cut into samples according to the standards. In order to test the flexural behavior, three point bending tests were performed at room temperature and the flexural force-displacement curves of the samples were established. The results showed that the sandwich composites increased their resistance to flexural with increasing number of surface layers. It has been found that epoxy matrix composites exhibit higher strength than polyesters and that the increase in strength due to layer thickness is greater.

Keywords: Composite sandwich, Carbon fiber, Layer, Flexural, Resin.

* Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Otomotiv Mühendisliği Bölümü, 16059, Görükle, Bursa

** İsmail Durgun Eğitim & Danışmanlık, Bursel Sitesi, Yüzüncüyıl Mahallesi, 16120, Bursa

İletişim Yazarı: Rukiye Ertan (rukiye@uludag.edu.tr)

1. GİRİŞ

Polimer esaslı elyaf takviyeli köpük/petek çekirdeklerden oluşan kompozit sandviç yapılar birçok uygulamada yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu uygulamaların başında hafifliğin ön planda olduğu havacılık, otomotiv ve denizcilik sektörü gelmektedir. Sandviç kompozitlerin ağırlığına göre eğilme direncinin yüksek olması, zorlamalar karşısında düşük yanıl deformasyonlar sergilemesi, yüksek burkulma direnci, ısı yalıtımı, ses ve titreşim sönümlenme özelliklerinden dolayı günümüzde en çok tercih edilen malzemelerdendir (Daniel ve diğ., 2009), (Hosur ve diğ., 2004).

Sandviç kompozitler alt ve üst yüzeyde yüksek performanslı ve elyaf takviyeli iki tabaka ince kompozitten ve ara yüzeyde petek, 3D örgü, köpük gibi özel formlara sahip bir çekirdek malzemedan oluşan birbirine yapıştırılmış üç tabakadan oluşan bir yapıdır (Wu ve diğ., 2014), (Gay, 2014). Çekirdek tabakası sandviç kompozitin en hafif ve dayanıksız bileşenidir. Yüzey bileşeni ise dayanımı ve sertliği yüksek olan metal veya elyaf esaslı bir kompozittir (Loos, 2015). Eğilme zorlamalarına karşı direnci artırır, enine zorlamalarda da tabakaların burkulmasını ve lokal deformasyonları stabilize eder (Daniel, 2008). Çekirdek ise kesme kuvvetlerini yüzeylere transfer ederek sönümler ve yük dengesini sağlar. Yüzeyler arasındaki yük transferi ise çekirdek ile yüzeyler arasında bulunan bağlayıcı/yapıştırıcı tarafından gerçekleştirilir. Bu bakımdan kullanılan bağlayıcı sandviç yapının kararlılığı ve bütünlüğü açısından kritik öneme sahiptir. Bunun yanında sandviç yapıyı oluşturan malzemeler ve üretim teknikleri de mekanik özellikler ve performans açısından önemli etkiye sahiptir (Gibson ve Ashby, 1999). Bu konuda literatürde son yıllarda yapılan birçok çalışmaya rastlamak mümkündür (Mohamed ve diğ., 2015), (Bella ve diğ., 2012), (Wang ve diğ., 2016) (Gündoğan ve diğ., 2009), (Çavdar ve Bingöl, 2016), (Doğru, 2017)[8-13]. Özellikle sandviç kompozitlerin statik ve dinamik yüklemelerdeki davranışları birçok farklı malzeme kombinasyonu için incelenmiştir. Yorulma gibi dinamik zorlamalar karşısında sandviç kompozit bir malzemenin sergilediği davranış metallere kıyasla oldukça karmaşıktır. İçerdiği elyaf, reçine ve köpük/petek/3d örgü gibi bileşenlerden dolayı homojen olmayan bir davranışa sahiptir (Li ve diğ., 2015).

3D dokuma kumaş kompozitleri iki kumaş yüzeyinden ve bu yüzeylere bağlı delikli ara malzemedan oluşmaktadır. İki yüzeyi birbirine bağlamak için belirli bir düzende istiflenmiş iplerin oluşturduğu destek sayesinde 3 boyutta bütünlüğünü koruyabilmektedir. Çoğunlukla polimer esaslı bir reçine emdirilerek kullanılan bu kompozit malzemeleri yüksek mukavemetin yanı sıra, düşük ağırlıklı, ısı yalıtımı, titreşim sönümlenme, yüksek ara yüzey kesme direnci ve kolay işlenme gibi olumlu özelliklerinden dolayı geniş bir kullanım alanına sahiptir (Wang ve diğ., 2010), (Zhao ve diğ., 2012), (Zhao ve diğ., 2014). 3D dokuma kumaş kompozit sandviçler konusunda yapılan çalışmalar bu malzemelerin eğilme davranışları ve hasar mekanizmaları üzerine yoğunlaşmıştır (Karahan ve diğ., 2013), (Mountasir ve diğ., 2015). Elyaf takviyeli 3D dokuma kumaş içerikli kompozit sandviçlerin yüksek ısı yalıtım özelliği nedeniyle farklı sıcaklıklardaki çalışma performansları konusunda da çalışmalar yapılmıştır. Li ve diğ. (2014) farklı çekirdek kalınlıklarına sahip 3D dokuma kumaş sandviçlerin oda sıcaklığındaki ve -196°C sıcaklığındaki eğilme davranışını incelemişlerdir. Üç nokta eğilme testleri ve mikroyapı görüntüleme teknikleri kullanılarak meydana gelen deformasyonlar ve hasar mekanizmaları araştırılmıştır. Sonuç olarak -196°C'de ve yüksek çekirdek kalınlığına sahip kompozitlerin en yüksek eğilme dayanımını sergilediği tespit edilmiştir. Fan ve diğ. (2011) yaptıkları çalışmada çok sayıda 3D kumaş tabakasından oluşan kompozitlerin oda sıcaklığında enerji absorbe etme yeteneklerini araştırmışlardır. Katman sayısının deformasyon miktarı üzerindeki etkisi ve meydana gelen hasar mekanizmaları detaylı olarak incelenmiştir.

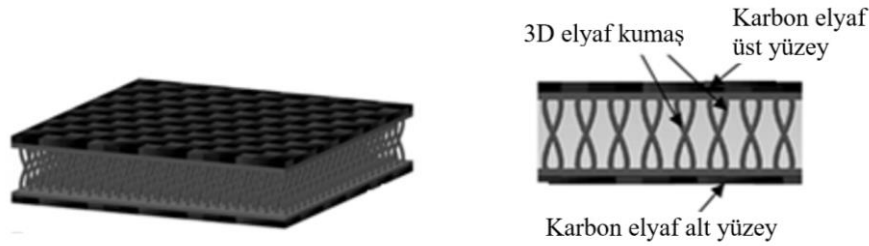
Bu çalışmada karbon elyaf yüzeyli üç boyutlu dokuma çekirdeğe sahip sandviç kompozit yapıların farklı yüzey katman sayılarının eğilme davranışına etkisi araştırılmıştır. Alt ve üst yüzey malzemesi olarak kullanılan reçine emdirilmiş karbon elyaflar vakum infüzyon tekniği kullanılarak 2, 3 ve 4 katman halinde üç boyutlu ara kumaş ile birleştirilmiştir. Reçine

malzemesi olarak epoksi ve polyester olmak üzere iki farklı polimer için testler yapılmıştır. Eğilme davranışını test etmek için oda sıcaklığında üç nokta eğilme deneyleri yapılmış ve numunelerin eğilme kuvveti-sehim eğrileri oluşturulmuştur.

2. DENEYSEL PROSEDÜRÜ

2.1. Malzeme Özellikleri ve İmalat

Bu çalışmada incelenen sandviç kompozitler alt ve üst yüzeyleri karbon elyaf takviyeli polimer matrisli bir kompozit ve ara yüzeyde bulunan üç boyutlu (3D) dokuma kumaştan oluşmaktadır (Şekil 1). Sandviç kompozitin alt ve üst yüzeyini oluşturan katmanlar karbon elyaf kumaşlar 2, 3 ve 4 katman halinde ve 0°/90° yön oryantasyonları ile vakum infüzyon yöntemiyle ayrı ayrı üretilmiştir. Karbon elyaf olarak CW200B 3K dimi kumaş kullanılmıştır. 3D dokuma kumaş çekirdek katmanı için 8 mm kalınlığında ve 350 gr/m² yoğunluğa sahip ön şekillendirilmiş 3D Parabeam cam elyaf kumaş kullanılmıştır.



Şekil 1:

Karbon elyaf yüzeyli 3D dokuma çekirdekli sandviç kompozitin üç boyutlu ve kesitinin şematik görüntüsü.

Reçine malzemesi olarak polyester ve epoksi ayrı ayrı incelenmiştir. Polyester reçine olarak 2% katalizör (Methyl Ethyl Ketone Peroxide) ve 0.2% (cobalt 6% solüsyonu) hızlandırıcı içeren BRE-452 doymamış bir polyester türü kullanılmıştır. Epoksi reçine olarak da 20% sertleştirici(Corepox®El 2200) içeren Corepox®Eh-2900 epoksi türü kullanılmıştır. Üretilen yüzey ve çekirdek tabakaları vakumlu torbalama işlemleri kullanılarak birleştirilmiştir. Oluşturulan yapı 12 saat oda sıcaklığında ve 1 saat 100°C'lik fırında kürlenme işlemine tabi tutulmuştur. Tablo 1'de üretilen sandviç kompozitin detayları verilmiştir.

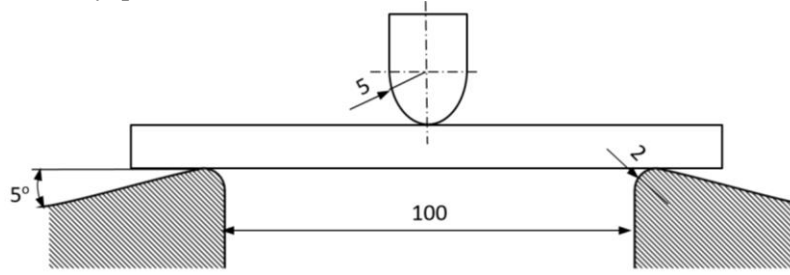
Tablo 1. Epoksi ve polyester esaslı sandviç kompozit panellerin genel özellikleri.

Reçine Türü	Numune Adı	Elyaf katman sayısı	Kalınlık (mm)	Ağırlık (gr)	Alansal yoğunluk (kg/m ²)
Epoksi	EC2	2	8,10	720	4,70
	EC3	3	8,15	860	5,60
	EC4	4	8,22	970	6,32
Polyester	PC2	2	8,08	810	5,28
	PC3	3	8,12	890	5,80
	PC4	4	8,15	910	5,93

1.2. Üç Nokta Eğilme Testi

Bu çalışmada üretilen sandviç kompozit panellerin eğilme performanslarını test etmek için üç nokta eğilme testleri yapılmıştır. Kompozit numuneler 30 mm x 120 mm boyutlarında ASTM C393/393M standardına uygun olarak hazırlanmıştır. Testte mesnetler arası mesafe 100 mm olarak ayarlanmıştır. Şekil 2'de üç nokta eğilme testinde numunenin konumlandırıldığı

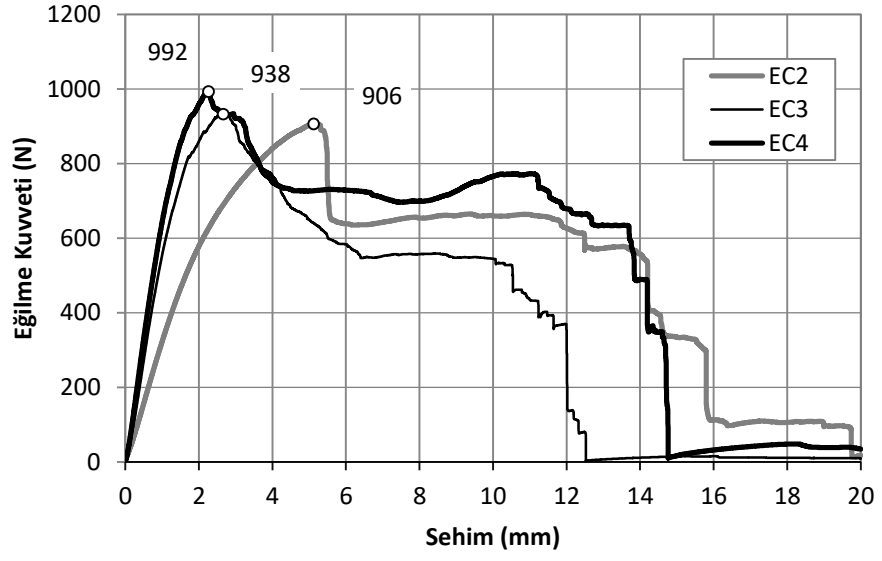
düzeneğin şematik görüntüsü verilmiştir. Üç nokta eğilme testi 1 mm/dak hızla Zwick/Roell universal test cihazında yapılmıştır.



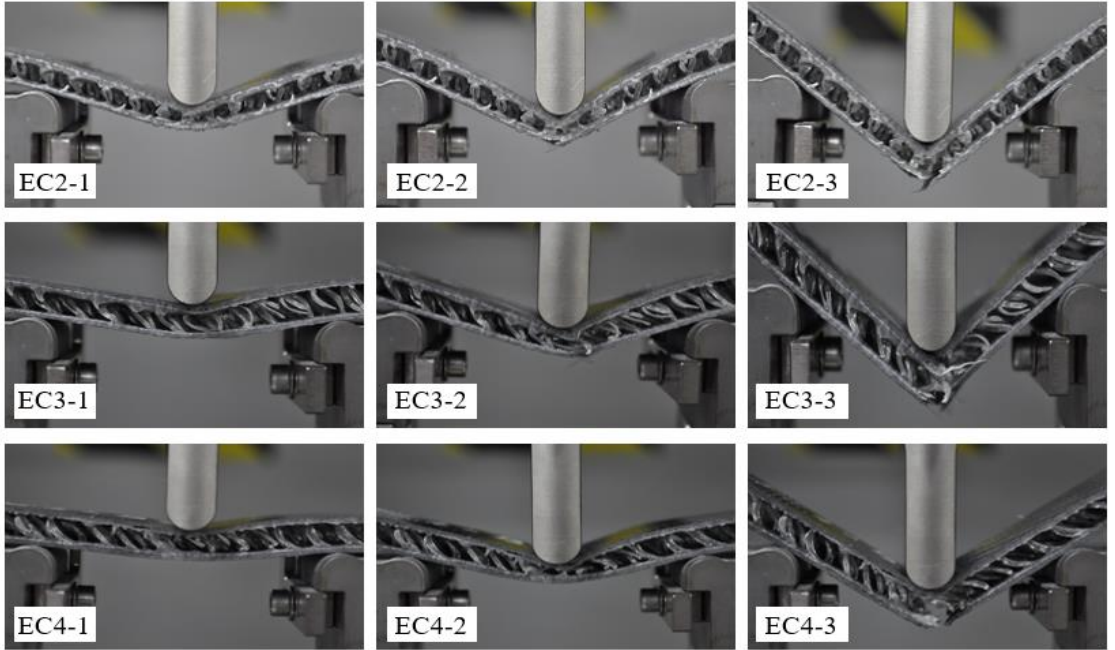
Şekil 2:
Üç nokta eğilme testi şematik görüntüsü.

2. BULGULAR VE TARTIŞMA

Şekil 3’de 3D dokuma kumaş çekirdekli 2, 3 ve 4 katmanlı karbon elyaf yüzeyli sandviç kompozitlerin kuvvete bağlı sehimi değişimi grafiği verilmiştir. Epoksi esaslı sandviç kompozitlerde yüzey katman sayısı artışıyla birlikte maksimum kuvvette de artış gözlemlenmiştir. En yüksek kuvvet değeri 992 N olarak 4 katman karbon elyaf içeren sandviç kompozitte elde edilmiştir. 3 katman karbon elyaf yüzeylere sahip olan kompozit malzemede kuvvet değeri %5,4’lük bir düşüş sergilemiştir. 2 katmanlı ise 4 katmanlıya göre %8,6 düşüş elde edilmiştir. Maksimum kuvvetteki sehimi değerleri incelendiğinde katman sayısı artışıyla birlikte sehimi azalmıştır. Sandviç kompozitin alt ve üst yüzeyinde yer alan karbon elyaf tabaka sayısının artması direngenliği arttırmıştır. 2 katmanlı kompozitte yük çoğunlukla çekirdek malzemenin deformasyonu ile belirli bir sehime kadar absorbe edilmiştir. Ancak 4 katmanlıda yük elyaf tabakalar tarafından karşılanmıştır. Elyaf tabakaların düşük deformasyon yeteneği nedeniyle yük çekirdek katmanına ulaşmadan artmış ve düşük bir sehimi ile kırılma meydana gelmiştir. Şekil 4’de epoksi esaslı ve her bir yüzeyinde 2, 3 ve 4 katman karbon elyafa sahip sandviç kompozitlerin üç nokta eğilme testi esnasındaki hasar sürecinin fotoğrafları verilmiştir. Katman sayısı artışıyla birlikte kompozitte meydana gelen hasarın büyüklüğü de artmıştır. Özellikle 4 katmanlı kompozit malzemede test süresince takımın kuvvet uyguladığı noktada et kalınlığında büyük oranda incelme meydana gelmiştir. Bununla birlikte 2 ve 3 katmanlı numunelere göre daha düşük bir sehimi sergilemiştir. Bu durum maksimum yükten sonra hasarın ani ve daha şiddetli olarak meydana gelmesine sebep olmuştur (EC4-3).

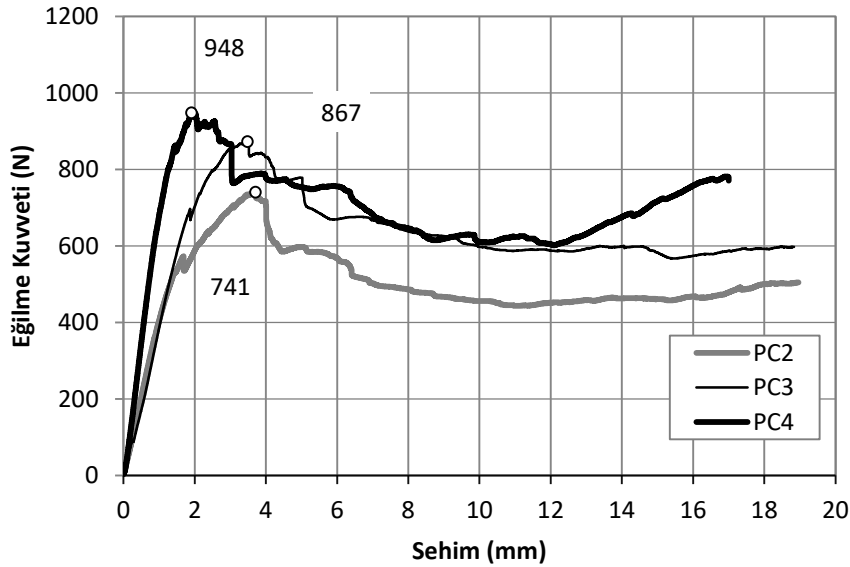


Şekil 3:
Üç nokta eğilme testi yapılan epoksi esaslı sandviç kompozitlerin yüzey katman sayılarına bağlı kuvvet sehim değişimi.



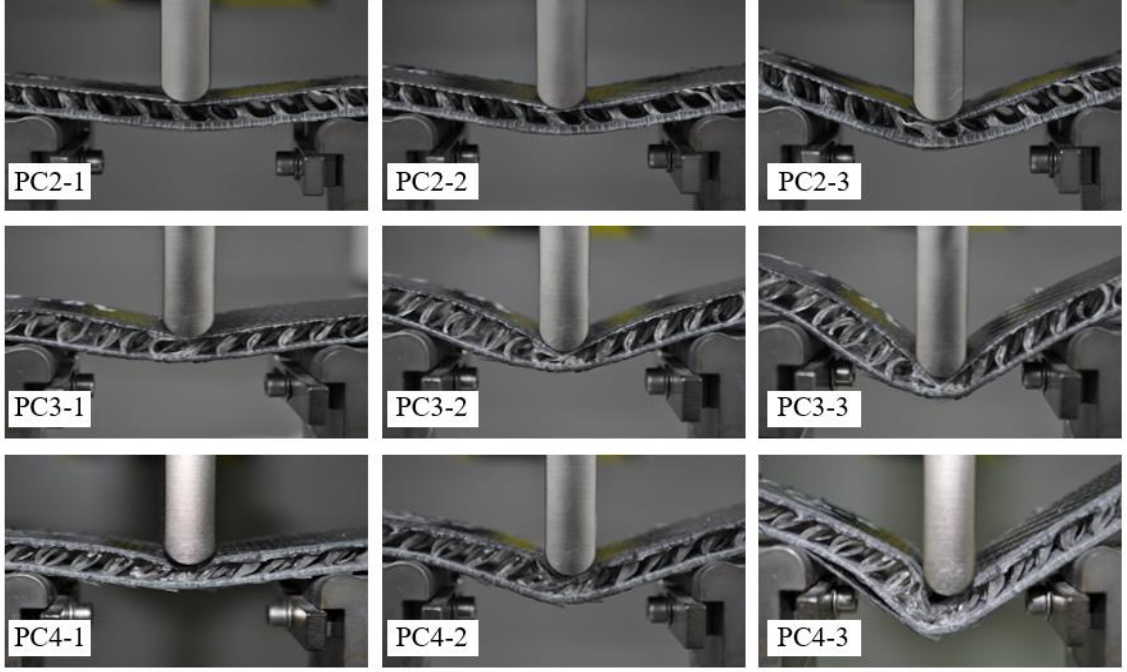
Şekil 4:
Epoksi esaslı sandviç kompozitlerde üç nokta eğilme testi esnasındaki üç farklı anda katman sayılarına bağlı kırılma hasarı süreci makroskobik görüntüleri.

Polyester esaslı üç boyutlu dokuma kumaş sandviç kompozitlerde ise yüzeylerde bulunan karbon elyaf katman sayısının eğilme kuvveti üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığı gözlenmiştir (Şekil 5). 4 katmanlı kompozitlerde 948 N olarak en yüksek maksimum kuvvet değerine ulaşılmıştır. 3 katmanlı kompozit numunelerinde ise maksimum kuvvet 867 N ile yaklaşık %8,5 ve 2 katmanlı olanlarda 741 N ile yaklaşık %22 daha düşük değerlerde elde edilmiştir. Kuvvet değişimine bakıldığında her üç tip kompozitte de sehim artışıyla zigzaglar meydana geldiği görülmektedir. Bu durum matris malzemede lokal ve küçük çatlakların oluşumunun bir göstergesidir. Epoksi esaslı kompozit numunelerinde böyle bir değişim meydana gelmemiştir (Şekil 3). Maksimum kuvvette meydana gelen sehim değerlerine bakıldığında PC2 ve PC3 numunelerinde yaklaşık 3,6 mm ve PC4 numunesinde 1,9 mm meydana gelmiştir. Polyester esaslı kompozit sandviçlere yük uygulanmaya başlandıktan sonra farklı anlarda oluşan deformasyon ve hasar görüntüleri Şekil 6'da verilmiştir. Şekil 5 ve Şekil 6 birlikte değerlendirildiğinde matris malzemesi olarak polyester kullanılmasının kompozitin davranışını önemli oranda etkilediği görülmektedir. Özellikle PC4 numunesine ait Şekil 6'daki görüntülerde alt ve üst yüzeyinde 4'er katman karbon elyaf içeren bir kompozit olmasına rağmen yük karşısında hem alt hem de üst katmanda belirgin çatlaklar oluştuğu görülmektedir. Bununla birlikte çekirdek malzeme ile yüzey malzemesinin gerilmelerin etkisiyle belirgin bir şekilde birbirinden ayrıldığı da görülmektedir (PC4-3). Polyesterin yük karşısında bağlarının epoksiye kıyasla daha kolay kırılması kullanılan yüzey katman sayısının önemini azaltmıştır. Çekirdek malzeme olarak kullanılan polyester emdirilmiş üç boyutlu dokuma kumaşın büyük oranda deforme olması da yine polyesterin yüksek kuvvetler karşısında dayanımının epoksiye kıyasla düşük olmasından kaynaklanmaktadır (Kumar, 2016), (Mani ve diğ., 1987). Şekil 4'de (EC2-3, EC3-3 ve EC4-3) epoksi esaslı kompozitlerin hasar görüntülerinde çekirdekteki deformasyonun polyester esaslı olanlara göre Şekil 6'da (PC2-3, PC3-3 ve PC4-3) çok daha düşük düzeyde gerçekleştiği görülmektedir.



Şekil 5:

Üç nokta eğilme testi yapılan polyester esaslı sandviç kompozitlerin yüzey katman sayılarına bağlı kuvvet sehim değişimi.



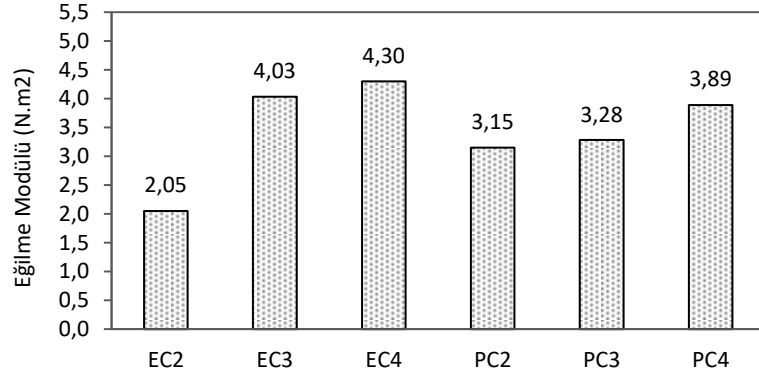
Şekil 6:

Polyester esaslı sandviç kompozitlerde üç nokta eğilme testi esnasındaki üç farklı anda katman sayılarına bağlı kırılma hasarı süreci makroskobik görüntüleri.

ASTM C393 standardına göre üç nokta eğilme testine tabi tutulan sandviç kompozit bir panelde eğilme modülü (D), (1) no'lu formülde verildiği gibi lineer kuvvet artımı ΔP , sehim artımı $\Delta \delta$ ve mesnetler arası mesafe L'ye bağlı olarak aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$D = \frac{L^3}{48} \left(\frac{\Delta P}{\Delta \delta} \right) \quad (1)$$

Yukarıda (1) no'lu denklem kullanılarak sandviç kompozitte katman sayılarına ve reçine türüne bağlı eğilme modülü grafikleri Şekil 7'de verilmiştir. Epoksi esaslı kompozit sandviçlerin eğilme modülü katman sayısı artışıyla birlikte artış sergilemiştir. 2 katmanlı kompozitte eğilme modülü $2,05 \text{ N.m}^2$ iken, 3 katmanlıda %50 artış ve 4 katmanlıda 2 katmanlıya göre %55 artış meydana gelmiştir. Polyester esaslı sandviç kompozitlerde katman sayısı ile eğilme modülü arasındaki ilişki Şekil 5'de verilen katman sayısına bağlı kuvvet değişimi arasındaki ilişkiye benzer bir gidişat sergilemiştir. En yüksek 4 katmanlıda olmak üzere sırasıyla bunu 3 katmanlı ve 2 katmanlı numuneler takip etmiştir. Şekil 7'deki eğilme modülü grafiğinden de görüldüğü üzere genel olarak 3 ve 4 katmanlı epoksi esaslı kompozitlerin daha rijit bir davranış sergilediği, polyester esaslı olanların da daha düşük eğilme modülü sergilediği görülmektedir. Epoksi ve polyester esaslı kompozitlerde üç nokta eğilme testinde ilk çatlak üst yüzey karbon elyaf tabakada meydana gelmiştir. Çekirdek malzeme ise yükün etkisiyle deforme olmuş ve polyester esaslı kompozitlerde herhangi bir kırılma veya çatlama sergilememiştir. Yükün büyük bir kısmını absorbe eden çekirdek, alt tabakaya daha düşük bir yük geçişine sebep olmuştur. Ancak 4 katmanlı panellerde karbon elyaf tabakaların çekirdek tabakasından deney esnasında iki yüzey arasından ayrıldığı gözlemlenmiştir. Oysa epoksi esaslı olanlarda katman sayısından bağımsız tüm numunelerde çatlama ve ayrılma meydana gelmiştir.



Şekil 7:

Sandviç kompozitlerde katman sayılarına ve reçine türüne bağlı eğilme modülü değişimi.

3. SONUÇLAR

Bu çalışmada karbon elyaf yüzeyli üç boyutlu dokuma sandviç kompozit yapıların farklı yüzey katman sayıları ve reçine türünün eğilme davranışına etkisi incelenmiştir. 2, 3 ve 4 katmanlı karbon elyaflara polyester ve epoksi reçineler ayrı ayrı uygulanarak elde edilen paneller üç nokta eğilme testlerine tabi tutulmuştur ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- Sandviç kompozitlerde kullanılan reçine türünün yüzey katman sayısına göre eğilme davranışı üzerinde daha büyük bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Bağlayıcı reçinenin epoksi olması kompozitin eğilme dayanımını polyester esaslıya göre önemli miktarda arttırdığı tespit edilmiştir.
- Epoksi esaslı sandviç kompozitlerde yüzey katman sayısı artışıyla birlikte maksimum eğilme kuvvetinde ve modülünde artış meydana gelmiştir. En yüksek eğilme kuvveti değeri 992 N olarak 4 katman karbon elyaf içeren epoksi esaslı sandviç kompozitte elde edilmiştir. En yüksek eğilme modülü de 4,30 N.m² ile yine 4 katmanlı karbon elyafı epoksi esaslı sandviç kompozitte elde edilmiştir.
- Epoksi ve polimer esaslı kompozitlerin eğilme kuvveti-sehim değişimleri eğrilerinin farklı gidişat sergiledikleri tespit edilmiştir. Epoksi esaslı sandviç kompozitlerde test sonucunda paneller daha kararlı bir davranış sergilemiş, polyester esaslıda ise sehim artışıyla kuvvette ani iniş çıkışlar görülmektedir. Epoksi esaslı kompozitlerde hasar çekirdek bölgede düşük bir incelme ve kompozitte daha yüksek bir sehimle gerçekleşmiştir. Polyester esaslılarda ise kuvvet artışıyla beraber çekirdek tabakasında maksimum yükün geldiği bölgede büyük oranda incelme, lokal bölgelerde çekirdek ve yüzey tabakalarının ayrılması ve daha geniş bir bölgede hasar şeklinde gerçekleşmiştir.
- Polyester esaslı kompozit sandviçlerde yüzeylerdeki karbon elyaf kumaş katman sayısının artmasıyla maksimum eğilme kuvvetinde düşük bir artış gözlemlenmiştir. Çekirdek malzemenin deformasyon miktarı ve hasarın derinliği de katman sayısı artışıyla artmıştır.

KAYNAKLAR

1. Bella, D., Borsellino, C. ve Calabrese, L. (2012) Effects of manufacturing procedure on unsymmetrical sandwich structures under static load conditions, *Materials & Design*, 35, 457-466. doi:10.1016/j.matdes.2011.09.037
2. Çavdar, K. ve Bingöl, M. (2016) Farklı Takviye Malzemelerinin Kompozit Malzeme Mekanik Özelliklerinin İyileştirilmesine Etkisi, *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*, 21 (2), 123-132. doi: 10.17482/uujfe.35051

3. Daniel, I.M. (2008) The Influence of Core Properties on Failure of Composite Sandwich Beams. In: Proceedings of the 8th International Conference on Sandwich Structures (ICSS8), Porto, Portugal, 63-74, 6-8 May.
4. Daniel, I.M., Gdoutos, E.E. ve Rajapakse, Y.D.S. (2009) Major Accomplishments in Composite Materials and Sandwich Structures, Springer, Netherlands.
5. Doğru, M.H. (2017) Tsai-Wu Kriteri Kullanarak Kompozit Plakaların Optimizasyonu için Geliştirilen Algoritma, Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 32, 821-829. doi: 10.17341/gazimmfd.337630
6. Fan, H.L., Yang, W. ve Zhou, Q. (2011) Experimental research of compressive responses of multi-layered woven textile sandwich panels under quasi-static loading, Composites Part B, 42(5), 1151-1156. doi:10.1016/j.compositesb.2011.03.008
7. Gay, D. (2014) Composite Materials: Design and Applications, 3rd Edition, CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, USA.
8. Gibson, L.J. ve Ashby, M. F. (1999) Cellular Solids: Structure and Properties, Cambridge University Press, 2nd ed., Cambridge.
9. Gündoğan, S., Eren, R. ve Karahan, M. (2009) Üç Boyutlu Dokuma Kumaş Takviyeli Kompozit Yapıların Çekme Mukavemetinin Analizi, Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering, 14(2), 161-168. <http://dergipark.gov.tr/uumfd/issue/21677/233309>
10. Hosur, M.V., Abdullah, M. ve Jeelani, S. (2004) Manufacturing and low-velocity impact characterization of hollow integrated core sandwich composites with hybrid face sheets, Composite Structures, 65(1), 103-115. doi:10.1016/j.compstruct.2003.10.013
11. Karahan, M., Gül S.H., Karahan N. ve Ivens J. (2013) Static behavior of three-dimensional integrated core sandwich composites subjected to three-point bending, Journal of Reinforced Plastics and Composites, 32(9), 664-678. doi:10.1177/0731684412474857
12. Kumar, R. (2016) A Review on Epoxy and Polyester Based Polymer Concrete and Exploration of Polyfurfuryl Alcohol as Polymer Concrete, Journal of Polymers, 2016, 1-13. doi: 10.1155/2016/7249743
13. Mani, P., Gupta, A. K. ve Krishnamoorthy, S. (1987) Comparative study of epoxy and polyester resin-based polymer concretes, International Journal of Adhesion and Adhesives, 7(3), 157-163. doi: 10.1016/0143-7496(87)90071-6
14. Li, D., Zhao C., Jiang N. ve Jiang L. (2015) Fabrication, properties and failure of 3D integrated woven spacer composites with thickened face sheets, Materials Letters, 148, 103-105. doi:10.1016/j.matlet.2015.02.058
15. Li, D., Zhao, C., Jiang, L. ve Jiang, N. (2014) Experimental study on the bending properties and failure mechanism of 3D integrated woven spacer composites at room and cryogenic temperature, Composite Structures, 111, 56-65. doi:10.1016/j.compstruct.2013.12.026
16. Loos, M. (2015) Carbon Nanotube Reinforced Composites, Chapter 2 - Composites, CNR Polymer Science and Technology, Elsevier, Oxford, UK.
17. Mohamed, M., Anandan, S., Huo, Z., Birman, V., Volz, J. ve Chandrashekhara K. (2015) Manufacturing and characterization of polyurethane based sandwich composite structures, Composite Structures, 123, 169-179. doi:10.1016/j.compstruct.2014.12.042
18. Mountasir, A., Hoffmann, G., Cherif, Ch., Löser, M. ve Großmann, K. (2015) Competitive manufacturing of 3D thermoplastic composite panels based on multi-layered woven

structures for lightweight engineering, *Composite Structures*, 133, 415-424. doi:10.1016/j.compstruct.2015.07.071

19. Wang, B., Wu L.Z., Jin X., Du S.Y., Sun Y.G. ve Ma L. (2010) Experimental investigation of 3D sandwich structure with core reinforced by composite columns, *Materials & Design*, 31(1), 158-165. doi:10.1016/j.matdes.2009.06.039
20. Wang, P., Lai, C., Wang, F., Jin, F. ve Fan, H. (2016) Fabrication and mechanical behaviors of cementitious composites reinforced by 3D woven lattice sandwich fabrics, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 85,130-137. doi:10.1016/j.compositesa.2016.03.017
21. Wu, Z., Xiao, J., Zengand, J. ve Liu, J. (2014) Compression performance of integrated 3D composite sandwich structures, *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 16(1), 5–21. doi:10.1177/1099636213501927
22. Zhao, C., Li D., Ge T., Jiang L. ve Jiang N. (2014) Experimental study on the compression properties and failure mechanism of 3D integrated woven spacer composites, *Materials & Design*, 56, 50-59. doi:10.1016/j.matdes.2013.10.083
23. Zhao, L., Zheng Q., Fan H.L. ve Jin F.N. (2012) Hierarchical composite honeycombs, *Materials & Design*, 40, 124-129. doi:10.1016/j.matdes.2012.03.009