

Increasing the Strength of Bolted Sandwich Composite Joints with Carbon Fiber Inserts

Tolga TOPKAYA 

Batman University Faculty of Engineering and Architecture, Department of Mechanical Engineering, 72100, BATMAN

Graphical/Tabular Abstract

In this study, the Joint performance of sandwich composites with carbon fiber reinforced composite face sheet investigated. Sandwich composite specimens were produced for different face sheet thickness, core material height, joint hole diameter parameters. Carbon fiber reinforced composite inserts used to increase the joint strength of specimens.

Article Info:

Research article

Received: 02/10/2020

Revision: 24/11/2020

Accepted: 01/12/2020

Highlights

- Sandwich Composites
- CFRP Insert
- Joint Design
- Tensile Test

Keywords

Carbon Fiber Composite
 Sandwich Composite
 Materials
 Lap Joint

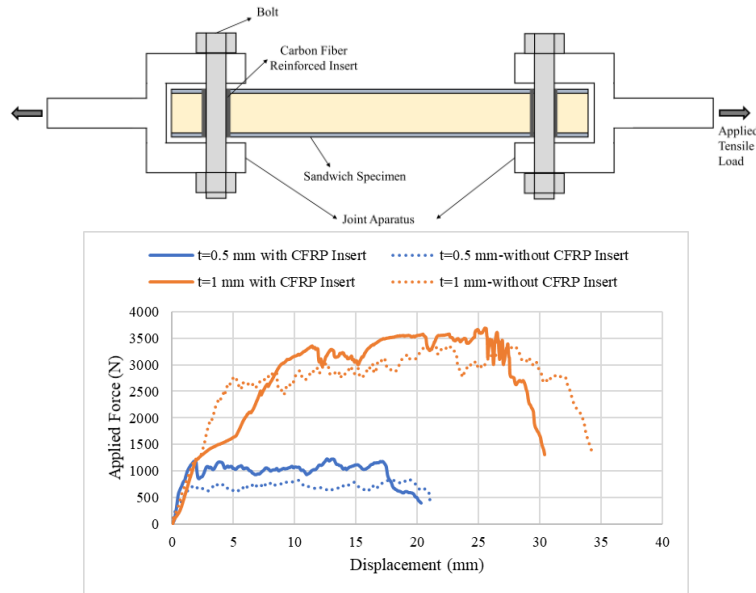


Figure A. Experimental test setup and effect of CFRP insert

Purpose: In this study, it is aimed to increase the bond strength of sandwich composites by using carbon fiber reinforced insert material. Honeycomb sandwich composite samples with carbon fiber reinforced composite face sheet, which is frequently preferred in aviation, were produced.

Theory and Methods: Carbon fiber-reinforced composite materials were used as face sheets. Face sheet thickness was chosen as 0.5 mm and 1 mm and Aluminum honeycomb core cell size was 6.35 mm. core height was chosen as 10 mm, 15 mm, and 20 mm. Produced sandwich specimens joined with one and two serial bolts. The tensile load was applied to joints for calculating the tensile strength. Carbon fiber-reinforced inserts were located in the bolt holes for increasing the joint strength.

Results: The results have shown that using carbon fiber reinforced insert increased tensile strength of sandwich composite joints. Using carbon fiber reinforced inserts, for increasing the joint strength caused a %91 increase in joint strength of samples with 0.5 mm face sheet thickness.

Conclusion: As a result of the experimental study carried out, in the case of using carbon fiber reinforced insert material, the highest strength increase was seen in samples with having 0.5 mm face sheet material. If the connection was made with two bolts instead of one bolt, the strength increases in the samples using 8 mm bolts was higher than the samples using 10 mm bolts. Shear damage occurred in all samples.



Cıvata ile Birleştirilmiş Sandviç Kompozitlerin Bağlantı Mukavemetinin Karbon Fiber Takviye Kullanılarak Arttırılması

Tolga TOPKAYA

Batman Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 72100, BATMAN

Öz

Sandviç kompozit malzemeler düşük ağırlıkla birlikte sundukları yüksek mukavemet sayesinde birçok mühendislik uygulamasında tercih edilir. Gerçekleştirilen çalışmada cıvata ile birleştirilen karbon fiber yüzey malzemesi ve alüminyum bal peteği çekirdeğe sahip sandviç kompozitlerin çekme yüklemesi durumunda davranışları incelenmiştir. Farklı yüzey malzemesi kalınlığı, hücre yüksekliği, cıvata sayısı ve cıvata çaplarında numuneler üretilmiştir. Belirtilen parametrelere ek olarak cıvata bağlantısı için sandviç kompozit numunelere açılan delikler karbon fiber takviyeli kompozit malzeme ile takviye edilmiş ve bağlantıların çekme davranışı takviyesiz malzeme ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar yüzey malzemesi kalınlığını artmasının bağlantı mukavemetini %91 oranında arttırdığını ancak buna karşın çekirdek malzemesi kalınlığının artmasının bağlantı mukavemetini düşürdüğünü göstermiştir. Sandviç numunelerde açılan delikleri takviye etmek için karbon fiber takviyeli kompozit kullanılması 0.5 mm yüzey malzemesi kalınlığına sahip numunelerde bağlantı mukavemetini %48 arttırmıştır. Özellikle en ince yüzey malzemesi kalınlığı değeri olan 0.5 mm için bağlantı mukavemetindeki artış daha belirgin olmuştur.

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 02/10/2020
Düzeltilme: 24/11/2020
Kabul: 01/12/2020

Anahtar Kelimeler

Karbon Fiber Kompozit
Sandviç Kompozit
Malzeme
Bindirmeli Bağlantı

Keywords

Carbon Fiber Composite
Sandwich Composite
Materials
Lap Joint

Increasing the Strength of Bolted Sandwich Composite Joints with Carbon Fiber Inserts

Abstract

Sandwich composite materials are preferred in many engineering applications thanks to having the high strength they offer together with low weight. In this study, the tensile loading behavior of sandwich composites produced with carbon fiber face sheet material and aluminum honeycomb core joined with bolts was investigated. Samples were produced with different surface material thickness, cell height, bolt number and bolt diameters. In addition to the specified parameters, the holes drilled into the sandwich composite specimens for bolt connection were reinforced with carbon fiber reinforced composite material and the tensile behavior of the connections was compared with the non-reinforced material. The results showed that joint strength increased about 91% with increasing the thickness of the face sheet material, whereas increasing the core material thickness decreased the joint strength. The use of carbon fiber-reinforced composite to reinforce the drilled holes in the sandwich samples increased the joint strength 48% for 0.5 mm face sheet used samples. Especially for the thinnest surface material thickness value of 0.5 mm, the increase in bond strength was more pronounced.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Sandviç kompozitler havacılık, uzay uygulamaları, denizcilik ve otomobil gibi mühendislik alanlarının hemen hepsinde geniş kullanım alanına sahiptir. Yüksek özgül mukavemet ve yüksek enerji sönümlenme gibi özellikleri sayesinde kullanım alanları giderek artmaktadır [1,2]. Sandviç kompozitler üretilirken rijit ve yüksek mukavemetli yüzey plakalarının arasına daha hafif ve yapısal olarak daha zayıf çekirdek malzemesi yerleştirilir. Yüzey malzemesi olarak genellikle fiber takviyeli kompozit ve Alüminyum (Al) alaşımları tercih edilirken çekirdek malzemesi olarak bal peteği ve köpük en sık kullanılanlardır [3, 4].

Kullanım alanına göre ihtiyaçlara cevap vermesi amacıyla sandviç kompozitlerin mekanik özellikleri ve tasarım parametreleri üzerine birçok araştırma yapılmıştır. Balıkoğlu ve diğ. Yaptıkları çalışmada

denizcilikte kullanılan cam fiber takviyeli kompozit yüzey malzemesine ve polivinil klorid köpük çekirdek malzemesine sahip sandviç kompozitlerin mekanik performansını araştırmıştır. Numune mukavemetinin artması için kullanılan reçine pimler eğilme mukavemetini arttırmıştır [5]. Baba yaptığı çalışmada kavisli sandviç kompozit malzemelerin darbe davranışını deneysel olarak araştırmıştır. Kavisli sandviç kompozit numuneler oluşturulurken üç farklı hücre malzemesi kullanılmış ve sonuçlar farklı özelliklerde çekirdek malzemelerinin birlikte kullanılmasının darbe mukavemetini arttırdığı görülmüştür [1]. Çağdaş ve Aliyev köpük çekirdek ve metal yüzey malzemesine sahip sandviç kompozitlerde numune boyunun titreşim frekansına etkisini deneysel ve sayısal hesaplamalarla incelemiştir. Sonuçlar artan numune uzunluğunun sönüm oranını azalttığını göstermiştir [6].

Bütün mühendislik yapıları daha küçük malzemelerin birleştirilmesi ile elde edilir. Bu birleştirme cıvata ve pim kullanılarak mekanik olarak gerçekleştirilebileceği gibi yapıştırıcı kullanılarak da sağlanabilir [7]. Sandviç kompozitlerin düşük mukavemetli çekirdek malzemesi cıvata ve perçinle birleştirilirken istenilen bağlantı mukavemetinin sağlanamamasına sebep olur [8]. Bu nedenle gerçekleştirilen bağlantı mukavemetinin artırılması amacıyla farklı takviye malzemeleri kullanılmaktadır. Heimbs ve Pein bal peteği sandviç köşe bağlantılarda takviye kullanılmasının bağlantı mukavemetine etkisini araştırmıştır. Mekanik testler kayma testi, eğilme testi şeklinde uygulanmıştır ayrıca cıvatalı bağlantılarda kesme testleri yapılmıştır. Takviye çekme testlerinde çekirdek kayma hasarları takviye malzemesi hasarından önce gelişmiştir [9]. Qi ve diğerleri piramidal kafes çekirdeğe sahip kiriş sandviç kompozitlerin hibrit takviye malzemeleri kullanılarak birleştirilmesini araştırmıştır. Statik çekme test sonuçları numunelerin kayma davranışının belirgin bir biçimde arttığını ve takviye malzemesinin pozisyonunun önemli olduğunu göstermiştir [10]. Cao ve Grenestedt denizcilik uygulamalarında kullanılan sandviç kompozit/çelik bağlantıların tasarım ve test edilmesi üzerine çalışmıştır. Yapıştırıcı ve cıvatanın birlikte kullanıldığı hibrit bağlantı türü ve çelik malzemede delikler açılarak sandviç kompozit ile birlikte kurlleştirilmiş bağlantı türü eğilme ve kayma yüklemesi durumları için karşılaştırılmıştır. İki yükleme türü için de birlikte kurlleştirilmiş bağlantı türü daha yüksek mukavemet sunmuştur. Birlikte kurlleştirme işleminin üretim kolaylığı ve hafifliği de önemli avantajları olarak öne çıkmıştır [11].

Gerçekleştirilen çalışmada Al çekirdek ve karbon fiber takviyeli kompozit yüzey malzemesine sahip sandviç kompozitlerin cıvata birleştirilmesi durumunda bağlantı mukavemetinin artırılması amacıyla karbon fiber takviye malzemesi kullanılmıştır. Farklı hücre yüksekliği, delik çapı, yüzey malzemesi kalınlığı ve cıvata sayısı için testler gerçekleştirilmiştir.

2. MALZEME VE METOT (MATERIAL AND METHOD)

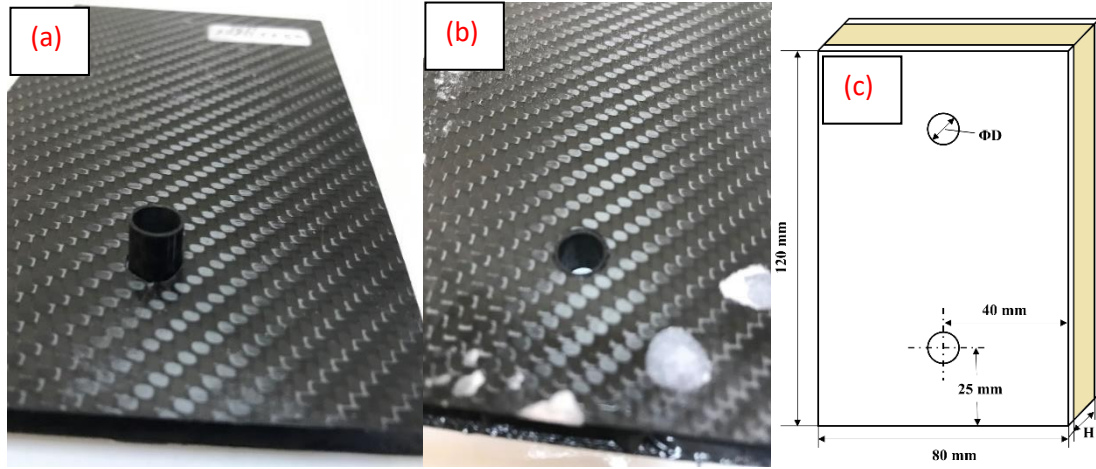
Çekirdek malzemesi olarak Al3003 alaşımından üretilmiş 6.35 mm hücre boyutuna sahip bal peteği kullanılmıştır. Yüzey malzemesi olarak örgü karbon fiber takviyeli kompozit kullanılmıştır. Kullanılan yüzey malzemesinin mekanik özellikleri Tablo 1’de verilmiştir. Tablo 1’de verilen E1 ve E2 sırasıyla çekme doğrultusunda ve çekme doğrultusuna dik doğrultuda elastisite modülünü, ν_{12} poisson oranını ve G12 kayma modülünü tanımlamak için verilmiştir. Bal peteği çekirdek malzemesi ile yüzey malzemesi arasındaki bağlantı epoksi esaslı 3M dP460 yapısal yapıştırıcı ile sağlanmıştır. Kullanılan yapıştırıcı malzemenin elastisite modülü 2077 MPa ve poisson oranı 0.38’dir [12].

Tablo 1. Karbon fiber yüzey malzemesinin mekanik özellikleri [13]

Malzeme	E ₁ (GPa)	E ₂ (GPa)	ν_{12}	G ₁₂ (GPa)
Karbon Fiber Takviyeli Kompozit	83.4	83.5	0.05	6.8

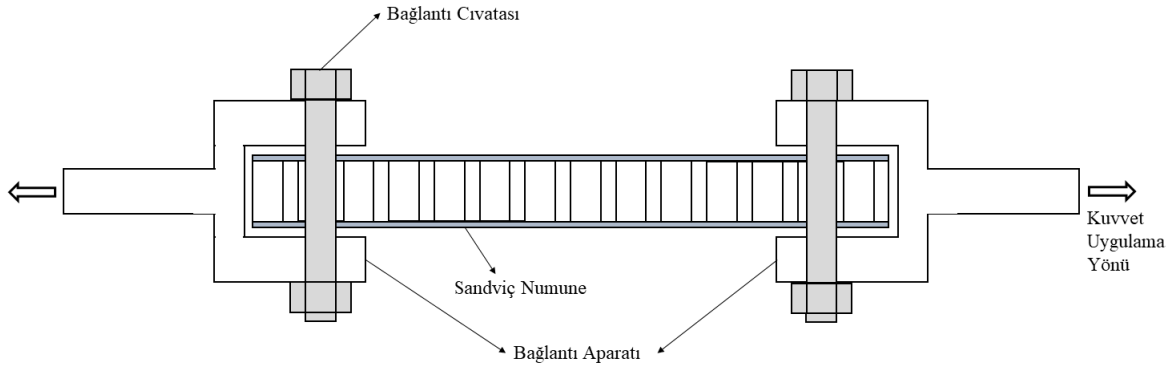
Üretimi tamamlanan sandviç kompozitler 80 mm x 120 mm ölçülerinde kesilmiştir. Bağlantı mukavemetine etkisini incelemek amacıyla 8 mm ve 10 mm olmak üzere iki farklı cıvata delik çapı, 0.5 mm ve 1 mm olmak üzere iki farklı yüzey malzemesi kalınlığı, 10 mm, 15 mm ve 20 mm kalınlığa sahip üç farklı hücre yüksekliği ve bir ve iki olmak üzere iki farklı cıvata sayısına sahip numuneler üretilmiştir. Cıvata sayısına ve delik çapına uygun delikler matkap kullanılarak açılmıştır. Bağlantı mukavemetini arttırmak için

kullanılan karbon fiber takviye malzemeleri açılan deliklere yerleştirilmiş ve 3M DP460 yapıştırıcı ile yapıştırılmıştır. Belirlenen ölçüde açılan cıvata deliğine takviye malzemesinin yerleştirilmesi Şekil 1’de verilmiştir.



Şekil 2. Takviye malzemesi kullanılarak numunelerin hazırlanması (a. Delik açılmış numuneye takviye malzemesinin hizalanması, b. Takviye malzemesinin yapıştırılması sonrası görüntüsü, c. Numune Boyutları)

Hazırlanan takviyeli numuneler ile referans olarak kullanılan takviyesiz numuneler cıvatalardan uygulanan çekme testine tabi tutulmuştur. Şekil 2’de test numunelerine yükün uygulanış şekli verilmiştir.



Şekil 3. Test şeması ve test yükünün numunelere uygulanması

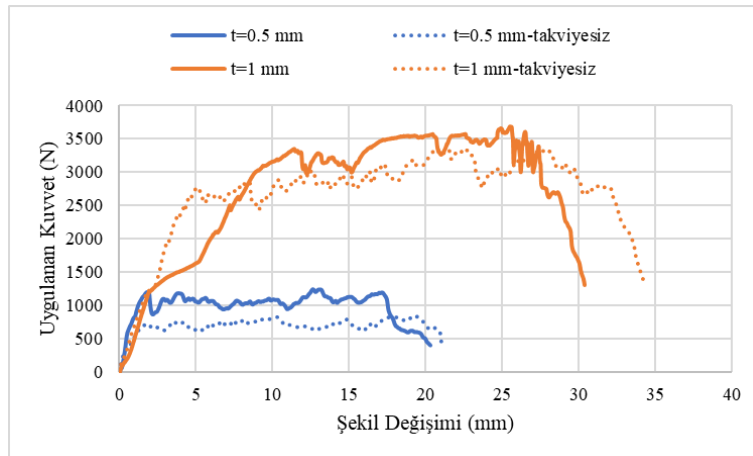
Testler 250 kN yük hücresine sahip Shimadzu marka universal test cihazı ile 1 mm/dk ilerleme hızında gerçekleştirilmiştir. Bütün testler 3’er kere tekrarlanmış ve ortalamaları alınarak verilmiştir. Universal test cihazına bağlanmış bir test numunesi Şekil 3’te verilmiştir.



Şekil 4. Universal test cihazına bağlanmış iki cıvatalı test numunesi

3. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

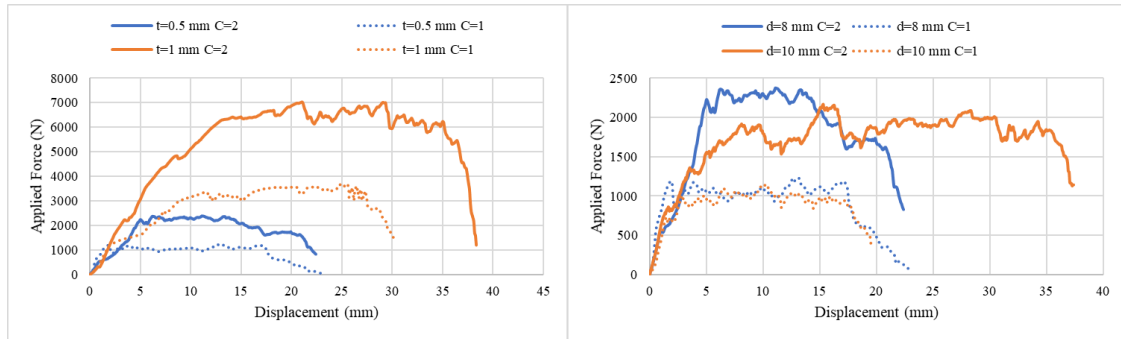
Yüzey malzemesi kalınlığının ve takviye malzemesi kullanılmasının çekme mukavemeti eğrileri Şekil 4'te verilmiştir. Şekildeki değerler 8 mm delik çapına, 10 mm hücre yüksekliğine sahip tek cıvatalı numuneler için verilmiştir. 0.5 mm yüzey malzemesi kalınlığına sahip takviyesiz numunenin hasar kuvveti 835.94 N iken takviye malzemesi kullanılan numunenin hasar kuvveti %48 artışla 1234.4 N değerini almıştır. 1 mm yüzey malzemesi kalınlığına sahip takviyesiz numunenin hasar kuvveti 3398.4 N iken takviye malzemesi kullanılması hasar kuvvetini %9 arttırmış ve 3689.8 N hasar yükü tespit edilmiştir. Sandviç kompozit bağlantı çekme yüklemesinde cıvataların iletmediği yükü yüzey malzemesi çekirdek malzemesine nazaran daha fazla miktarda taşır. Yüzey malzemesi kalınlığının artması ortaya çıkan gerilmeyi düşürerek daha fazla yükün taşınmasını sağlayacaktır [14]. Elde edilen sonuçlar bu durumu destekler niteliktedir. Takviye malzemesi kullanılması test numunelerinin ağırlığını arttırmasına karşın numunenin taşıdığı yükte de artış sağlamıştır [15]. Yüzey malzemesi ince olan numunelerde cıvata tarafından iletilen yükün daha az alana etkimesi takviye malzemesi kullanımı ile önlenmiştir. Bu sayede takviye malzemesi kullanılan ince yüzey malzemesine sahip numunelerde hasar yükü artışı daha fazla olmuştur.



Şekil 5. Takviye malzemesi kullanılmasının numunelerin uygulanan kuvvet – şekil değişimi grafiğine etkisi

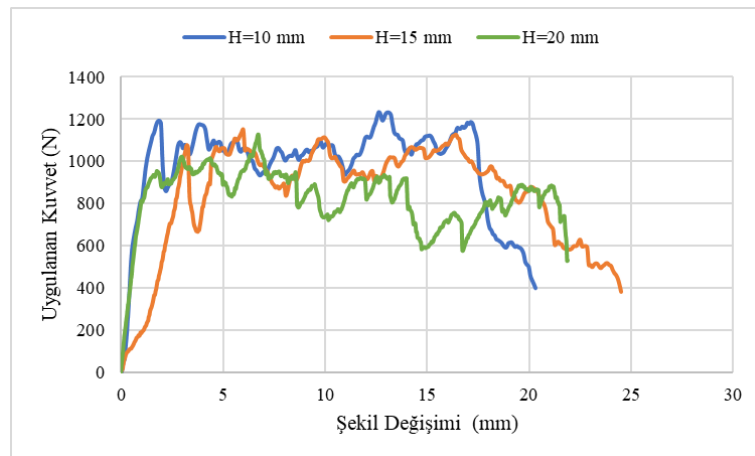
Bağlantıları oluşturmak için kullanılan cıvata sayısının yüzey malzemesi kalınlığı ve delik çapı ile birlikte hasar yüküne etkisi 10 mm hücre yüksekliğine sahip numuneler için Şekil 5'te verilmiştir. 0.5 mm yüzey malzemesine sahip tek cıvatalı modelin hasar yükü 1234.4 N iken bağlantının iki cıvata ile gerçekleştirilmesi durumunda hasar yükü 2376.6 N olarak tespit edilmiştir. Yüzey malzemesi kalınlığının 1 mm olduğu numunelerde tek cıvatalı modelin hasar yükü 3689.8 N iken iki cıvatalı modelin hasar yükü % 91 artışla 7041.4 N olmuştur. 8 mm delik çapına sahip numune için cıvata sayısının birden ikiye çıkarılması hasar yükünde %93 artışa sebep olmuştur. 0.5 mm yüzey malzemesi kalınlığı için delik çapının 10 mm olduğu numunelerden tek cıvata ile birleştirilen numunenin hasar yükü 1148.4 N olarak belirlenirken cıvata sayısının ikiye çıkarılması hasar yükünü %89 arttırmış ve 2165.6 N değerini almıştır.

Bağlantı mukavemetini arttırmak için kullanılan cıvata sayısını arttırmak tercih edilen yöntemlerden biridir. Numune genişliğinin yeterli olduğu numunelerde paralel cıvatalar tercih edilir [14, 15]. Numune genişliği yeterli olmayan numuneler için çoklu cıvata uygulamaları seri yerleşim şeklinde seçilmektedir [18]. Gerçekleştirilen çalışmada iki cıvata kullanılan numunelerin daha fazla yük taşıması literatürle uyum göstermektedir.



Şekil 6. Cıvata sayısının çekme davranışına etkisi (a. Yüzey malzemesi kalınlığı ile cıvata sayısı ilişkisi b. Delik çapı ile cıvata sayısı ilişkisi)

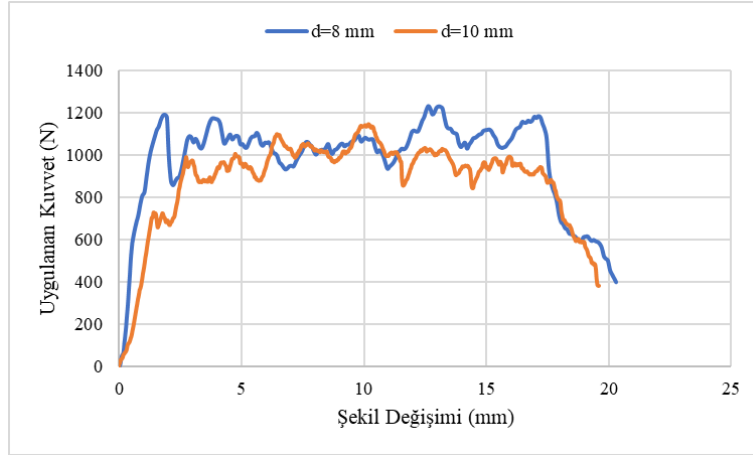
Şekil 6'da hücre yüksekliğinin 8 mm çapına delik içeren numunelerin uygulanan kuvvet – şekil değişimi davranışına etkisi verilmiştir. Hücre yüksekliğinin artması numune hasar yükünün düşmesine sebep olmuştur. 10 mm hücre yüksekliğine sahip numunenin hasar yükü 1234.4 N, 15 mm hücre yüksekliğine sahip numunenin hasar yükü 1151.6 N ve 20 mm hücre yüksekliğine sahip numunenin hasar yükü 1129.7 N değerini almıştır.



Şekil 7. Hücre yüksekliğinin uygulanan kuvvet – şekil değişimi davranışına etkisi

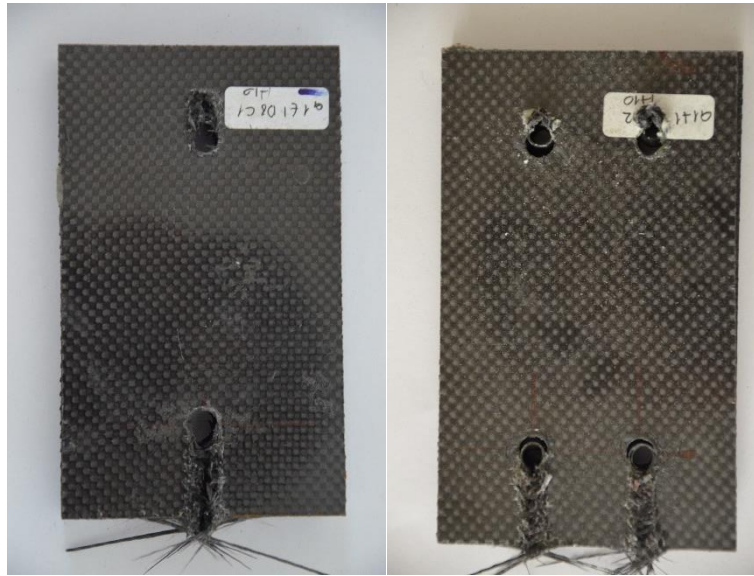
10 mm hücre yüksekliği, 0.5 mm yüzey malzemesi kalınlığına sahip tek cıvata içeren numunelerde delik çapının karbon fiber takviye malzemesi içeren numunelerin hasar yüküne etkisi Şekil 7'de verilmiştir. Delik çapının artması numune hasar yükünü düşürmüştür. 8 mm çapında delik içeren numune için 1234.4 N

olarak belirlenen hasar yükü delik çapının 10 mm'ye çıkması durumunda %7.5 düşükle 1148.4 N değerini almıştır.



Şekil 8. Delik çapının uygulanan kuvvet – şekil değişimi davranışı

Şekil 8’de tek ve iki cıvata ile birleştirilmiş numunelerin çekme testi sonrası hasara uğramış görüntüleri yer almaktadır. Belirlenen parametrelere göre üretilen numunelerin tamamında görülen hasar tipi kayma hasarı şeklindedir. Tek ve iki cıvatalı modellerin ikisinde de karbon fiber takviye malzemeleri çekme yükünün uygulandığı yönde hasara uğramıştır. Numunelerin hiçbirinde çekme hasarı, yataklama hasarı ve cıvata hasarı görülmemiştir. Numunelerde meydana gelen hasar tipini belirleyen temel etken bağlantı tasarımıdır. Hazırlanan numunelerde çekme yönüne paralel serbest kenar ile cıvata deliği merkezi arasındaki mesafenin fazla olması hasar tipinin kayma hasarı şeklinde ortaya çıkmasına sebep olmuştur [19].



Şekil 9. 1 mm yüzey malzemesi kalınlığına sahip takviye malzemesi kullanılan numunelerin hasar sonrası görüntüsü (a. Bir cıvatalı model b. İki cıvatalı model)

4. SONUÇ (CONCLUSION)

Gerçekleştirilen çalışmada Al 3003 bal peteği ve karbon fiber yüzey malzemesine sahip sandviç kompozitlerin cıvata ile birleştirilmesi durumunda yüzey malzemesi kalınlığı, cıvata çapı, cıvata sayısı, çekirdek malzemesi yüksekliği ve cıvata deliklerinin karbon fiber takviye malzemesi ile güçlendirilmesinin bağlantı mukavemetine etkisi araştırılmıştır. Yapılan deneysel çalışma sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- Karbon fiber takviye malzemesi kullanılması durumunda en yüksek mukavemet artışı %91 ile 0.5 mm kalınlığında yüzey malzemesi kullanılan numunelerde görülmüştür.
- Bağlantının bir cıvata yerine iki cıvata ile gerçekleştirilmesi durumunda 8 mm cıvata kullanılan numunelerde %93, 10 mm cıvata kullanılan numunelerde %89 mukavemet artışı değerleri tespit edilmiştir.
- Hücre yüksekliğinin 10 mm'den 15 mm ve 20 mm'ye çıkması bağlantı mukavemetinin düşmesine sebep olmuştur.
- Bağlantı için kullanılan cıvata çapının artması tek cıvatalı numunelerde bağlantı mukavemetinin %7, iki cıvatalı numunelerde bağlantı mukavemetinin %9 düşmesine sebep olmuştur.
- Test edilen bütün numunelerde kayma hasarı meydana gelmiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] B. O. Baba, "Curved sandwich composites with layer-wise graded cores under impact loads," *Compos. Struct.*, vol. 159, pp. 1–11, 2017, doi: 10.1016/j.compstruct.2016.09.054.
- [2] A. Quispitupa, C. Berggreen, and L. A. Carlsson, "Face/core interface fracture characterization of mixed mode bending sandwich specimens," *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.*, vol. 34, no. 11, pp. 839–853, 2011, doi: 10.1111/j.1460-2695.2011.01551.x.
- [3] F. P. Yang, Q. Y. Lin, and J. J. Jiang, "Experimental study on fatigue failure and damage of sandwich structure with PMI foam core," *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.*, vol. 38, no. 4, pp. 456–465, 2015, doi: 10.1111/ffe.12246.
- [4] M. Aslan, O. Güler, and Ü. Alver, "The Investigation of the Mechanical Properties of Sandwich Panel Composites with Different Surface and Core Materials," *Pamukkale Univ. J. Eng. Sci.*, vol. 24, no. 6, pp. 1062–1068, 2018, doi: 10.5505/pajes.2018.37605.
- [5] F. Balıkoğlu, T. K. Demircioğlu, M. Yıldız, N. Arslan, and A. Ataş, "Mechanical performance of marine sandwich composites subjected to flatwise compression and flexural loading: Effect of resin pins," *J. Sandw. Struct. Mater.*, vol. 22, no. 6, pp. 2030–2048, 2020, doi: 10.1177/1099636218792671.
- [6] İ. U. Çağdaş and R. Aliyev, "Metal Yüzlü Sandviç Konsol Kirişlerde Numune Boyunun Ölçülen Temel Titreşim Frekansına Etkisi," *Gazi Üniversitesi Fen Bilim. Derg. Part C Tasarım ve Teknol.*, vol. 8, no. 2, pp. 237–244, 2020, doi: 10.29109/gujsc.591724.
- [7] M. Y. Solmaz and T. Topkaya, "Progressive failure analysis in adhesively, riveted, and hybrid bonded double-lap joints," *J. Adhes.*, vol. 89, no. 11, 2013, doi: 10.1080/00218464.2013.765800.
- [8] K. Il Song, J. Y. Choi, J. H. Kweon, J. H. Choi, and K. S. Kim, "An experimental study of the insert joint strength of composite sandwich structures," *Compos. Struct.*, vol. 86, no. 1–3, pp. 107–113, 2008, doi: 10.1016/j.compstruct.2008.03.027.
- [9] S. Heimbs and M. Pein, "Failure behaviour of honeycomb sandwich corner joints and inserts," *Compos. Struct.*, vol. 89, no. 4, pp. 575–588, 2009, doi: 10.1016/j.compstruct.2008.11.013.
- [10] G. Qi, Y. L. Chen, P. Richert, L. Ma, and K. U. Schröder, "A hybrid joining insert for sandwich panels with pyramidal lattice truss cores," *Compos. Struct.*, vol. 241, no. January, 2020, doi: 10.1016/j.compstruct.2020.112123.
- [11] J. Cao and J. L. Grenestedt, "Design and testing of joints for composite sandwich/steel hybrid ship hulls," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 35, no. 9, pp. 1091–1105, 2004, doi: 10.1016/j.compositesa.2004.02.010.

- [12] S. Akpınar, M. D. Aydın, Ş. Temiz, and A. Özel, “3-D non-linear stress analysis on the adhesively bonded T-joints with embedded supports,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 53, pp. 314–323, Oct. 2013, doi: 10.1016/j.compositesb.2013.04.049.
- [13] T. Topkaya and M. Y. Solmaz, “Investigation of low velocity impact behaviors of honeycomb sandwich composites,” *J. Mech. Sci. Technol.*, vol. 32, no. 7, pp. 3161–3167, 2018, doi: 10.1007/s12206-018-0619-5.
- [14] P. Lopez-Cruz, J. Laliberté, and L. Lessard, “Investigation of bolted/bonded composite joint behaviour using design of experiments,” *Compos. Struct.*, vol. 170, pp. 192–201, 2017, doi: 10.1016/j.compstruct.2017.02.084.
- [15] J. W. Lim and D. G. Lee, “Development of the hybrid insert for composite sandwich satellite structures,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 42, no. 8, pp. 1040–1048, 2011, doi: 10.1016/j.compositesa.2011.04.008.
- [16] M. Attar, S. M. Ahmadpour, S. S. Banisadr, A. Mohammadi, S. Z. Mirmoradi, and Z. Shirazi, “The effect of Al₂O₃ nano additions on failure of GFRP plate with two parallel pin loaded holes,” *J. Mech. Sci. Technol.*, vol. 33, no. 6, pp. 2769–2776, 2019, doi: 10.1007/s12206-019-0523-7.
- [17] A. Ataş, N. Arslan, and F. Sen, “Failure analysis of laminated composite plates with two parallel pin-loaded holes,” *J. Reinf. Plast. Compos.*, vol. 28, no. 10, pp. 1265–1276, 2009, doi: 10.1177/0731684408089493.
- [18] R. Karakuzu, C. R. Çalışkan, M. Aktaş, and B. M. İçten, “Failure behavior of laminated composite plates with two serial pin-loaded holes,” *Compos. Struct.*, vol. 82, no. 2, pp. 225–234, 2008, doi: 10.1016/j.compstruct.2007.01.002.
- [19] F. Gamdani, R. Boukhili, and A. Vadean, “Tensile behavior of hybrid multi-bolted/bonded joints in composite laminates,” *Int. J. Adhes. Adhes.*, vol. 95, no. August, p. 102426, 2019, doi: 10.1016/j.ijadhadh.2019.102426.