



Makale / Research Paper

Tabakalı Hibrit Kompozit Malzemelerin Yorulma Davranışlarının Analizi

Anıl İMAK¹, Murat Yavuz SOLMAZ² ve Tolga TOPKAYA³

¹Bingöl Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 12000, Bingöl/TÜRKİYE
aimak@bingol.edu.tr

²Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 23119, Elazığ/TÜRKİYE
mysolmaz@firat.edu.tr

³Batman Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 72080, Batman/TÜRKİYE
tolga.topkaya@batman.edu.tr

Özet: Endüstride geniş kullanım alanına sahip tabakalı kompozit malzemeler, kullanıldıkları alanlara bağlı olarak tekrarlı yüklerle maruz kalabilmektedirler. Bu nedenle malzemelerin tekrarlı yüklerle karşı dayanımı önemli bir parametredir. İzotropik malzemelerden farklı olarak kompozit malzemelerin yorulma davranışlarının tespiti daha zordur. Bunun sebebi kompozit malzemelerin tasarımı sırasında ele alınan parametrelerin sayısının fazlalığıdır. Gerçekleştirilen bu çalışmada tabakalı hibrit kompozit malzemelerin yorulma davranışları deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmada karbon ve cam olmak üzere üç farklı hibrit numune elle yatırma yöntemi ile epoksi reçine kullanılarak üretilmiştir. Elyafın reçine ile birleştirilmesinin ardından kompozit levhalara hidrolik sıcak pres uygulanmıştır. Yorulma deneylerinin yapılabilmesi için gerekli olan numuneler ASTM standartlarına uygun şekilde boyutlandırılmıştır. Deneyler sırasında gerilme oranı 0.1 ve frekans 10 Hz seçilmiştir. Deney sonucunda elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak grafikler halinde sunulmuştur.

Anahtar kelimeler: Kompozit Malzemeler, Tabakalı Hibrit Kompozit, Yorulma Deneyi, S-N eğrisi.

The Analysis Of Fatigue Behaviours Of The Laminated Hybrid Composite Materials

Abstract: Layered composite materials with a wide range of applications in industry, may be exposed to the cyclic load depending on the field used. So, resistance of the materials to cyclic loads is significant parameter. Unlike isotropic materials, detection of the fatigue behavior of the composite materials is more difficult. The reason for this are the more number of parameters considered during the design of the composite materials. Fatigue behavior of layered hybrid composite materials has been investigated experimentally in this study performed. In this study, three different hybrid samples including carbon and glass were produced with hand lay-up method using epoxy resin. Hydraulic hot press was applied to the composite plates after combining the fibers with the resin. Necessary samples to be made fatigue tests, were scaled up according to appropriate ASTM standards. Stretch ratio and frequency were selected 0.1 and 10 Hz respectively. The results obtained at the end of the experiment have been presented in graphics by comparing them.

Keywords: Composite Materials, Laminated Hybrid Composite, Fatigue Analysis, S-N Curve.

Bu makaleye atıf yapmak için

Imak, A., Solmaz, M.Y., Topkaya, T., "Tabakalı Hibrit Kompozit Malzemelerin Yorulma Davranışlarının Analizi" El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi 2016 3(3); 448-458.

How to cite this article

Imak, A., Solmaz, M.Y., Topkaya, T., "The Analysis Of Fatigue Behaviours Of The Laminated Hybrid Composite Materials" El-Cezeri Journal of Science and Engineering, 2016, 3(3); 448-458.

1. Giriş

Kompozit malzemeler yüksek elastik modül ve yüksek özgül mukavemet avantajlarından dolayı, havacılık ve gemi sanayisinde tercih sebebidir. Özellikle tekrarlı yüklere maruz kalan malzemelerin yorulma hasarı davranışı doğru tanımlanmalıdır. Kompozit malzemeler hasarı bünyelerinde depolarlar ve hasar her zaman makroskobik bir hasarla meydana gelmez. Fiber hasarı, ayrılma, ters yönlü tabaka çatlağı ve matris çatlağı gibi hasar türleri oluşabilmektedir. Bunun yanında kompozit malzemelerin yorulma davranışları konusunda çok sayıda çalışma yapılmıştır.

Karahan ve diğerleri 3 boyutlu dokuma karbon epoksi kompozit malzemelerin dinamik çekme yüklemesi altında yorulma davranışını incelemiştir. Yorulma yüklemesi altında kompozit malzeme içinde hasarın z-ipliklerinin atkı iplikleri ile kesiştiği kısımlarda başladığı ve buradan yayıldığı anlaşılmıştır. Üç boyutlu dokuma yapıda z-iplikleri iplik katmanlarını bir arada tuttuğu için, klasik iki boyutlu kompozitlerde meydana gelen delaminasyon hasarları meydana gelmemiştir [1]. Jen ve Lee eş yönlü karbon fiber takviyeli kompozit plakaların çekme-basma ve basma-basma durumunda yorulma davranışlarını $-\infty$, 5, 0, 0.2 gerilme genliği için araştırmıştır. Sonuçlar normalize edilmiş S-N diyagramının çekme-basma ve basma-basma durumunda belirgin farklılıklar göstermemiştir [2]. Colombo ve Vergani cam fiber takviyeli kompozit malzemelerin çok eksenli statik ve yorulma davranışını araştırmıştır. Fiber oryantasyon açısı olarak 0° , 30° , 45° , 90° kullanan araştırmacılar, en düşük yorulma mukavemetinin 0° oryantasyon açısına sahip numunelerde görüldüğünü belirtmiştir [3]. Tomita ve diğerleri uzun karbon fiber takviyeli epoksi kompozitlerin eğilme yorulmasını araştırmıştır. Fiber dizilimi olarak $0^\circ/0^\circ$, $0^\circ/90^\circ$, $0^\circ/\pm 45^\circ/90^\circ$ kullanan araştırmacılar plakalarda meydana gelen hasarın temel sebebinin 0° oryantasyon açısına sahip olan tabakada oluşan basınç hasarı olduğunu rapor etmiştir [4]. Kujawski tabakalı kompozit plakaların genişliğinin çekme mukavemetine ve yorulma davranışına etkisini deneysel olarak araştırmıştır. 6 farklı fiber oryantasyon açısı ve 5 farklı genişlik değeri kullanan Kujawski fiber oryantasyon açısının ve genişliğin artışının yorulma mukavemetini arttırdığını göstermiştir [5]. Vasconcellos wovnen fiber epoksi kompozit malzemenin çekme-çekme yorulma davranışını incelemiştir. Farklı teknikleri birleştirerek yaptıkları yorulma hasar analizleri sonucunda $[\pm 45]_7$ dizilimli kompozit malzemenin $[0,90]_7$ dizilimli olandan daha iyi yorulma dayanımı gösterdiğini tespit etmiştir [6]. Coronado ve ark. Farklı test sıcaklıklarında karbon fiber epoksi kompozit malzemelerin Mod I çatlak davranışı analiz edilmiştir. Malzemeler aynı yönlü karbon fiber ve farklı bir epoksiden üretilmiş. $[0^\circ]_{16/S}$, 20° , 0° , -30° , ve 60° sıcaklıklarda test edilmiş ve sıcaklık düşüğe malzemelerin daha kırılğan davranış sergiledikleri görülmüştür [7]. Sunulan bu çalışmada farklı malzeme, fiber dokuma ve oryantasyon açıları karbon ve cam elyafların birleşimiyle oluşturulmuş üç farklı tabakalı hibrit kompozit numunenin çekme-çekme yorulma davranışları incelenmiştir. Bu amaçla 6 tabaka cam ve 6 tabaka karbon elyaf olacak şekilde 12 tabakalı hibrit kompozit plakalar üretilmiştir. Numunelerin üretiminde elle yatırma yöntemi kullanılmıştır ve kompozit levhalara sıcak presleme yapılarak kürlenme işlemi gerçekleştirilmiştir. Yorulma deneyleri neticesinde en yüksek yorulma ömrüne sahip olan numunenin karbon twill/ cam twill dizilimli numune olduğu tespit edilmiştir.

2. Materyal ve Metod

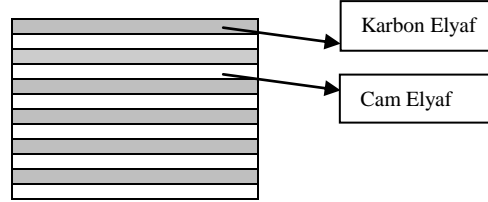
Tabakalı hibrit kompozit numunelerde takviye malzemesi olarak farklı oryantasyon açılarına sahip karbon ve cam elyaf matriks malzemesi olarak ise epoksi reçine kullanılmıştır. ASTM 3479 M standartlarına göre üretim ve deney aşamaları gerçekleştirilmiştir. Üretilen üç farklı numunede kullanılan malzeme ve elyaf oryantasyon açıları Tablo 1’ de verilmiştir.

Numunelerin üretim aşamasında öncelikli olarak kullanılacak olan elyaflar 200x250 mm boyutlarında kesilmiştir. Bütün numuneler 12 tabakalı olup hepsinde 6 tabaka karbon elyaf ve 6 tabaka cam elyaf kullanılmıştır. Karbon ve cam elyaflara sürülecek olan reçine miktarını belirlemek için elyaflar maksimum 510 gr ölçebilen Radwag marka hassas terazide ölçülmüştür. Elyafların

ağırlıklarının %20 si kadar reçine ve sertleştirici kullanılmıştır. . Numune dizilimleri şematik olarak Şekil 1’de gösterilmiştir.

Tablo 1. Numunelerde kullanılan elyafların oryantasyon açıları

Numune Numarası	1	2	3
Karbon Elyaf	Twill	Twill	45 ⁰
Cam Elyaf	Twill	0 ⁰	Twill



Şekil 1. Karbon ve cam elyafların dizilimlerinin şematik gösterimi

Üretime başlamadan önce numunelerin kalıptan daha iyi ve rahat çıkabilmesi için kalıp yüzeyine kalıp ayırıcı Wax- QV 5110 sürülüp yarım saat beklenmiştir. Karbon ve cam elyaf takviyeli kompozitler MGS Laminasyon Epoksi Reçine L285 ve MGS Laminasyon Epoksi Sertleştirici H285 kullanarak elle yatırma yöntemiyle Şekil 2’deki gösterildiği gibi birleştirilmiştir.



Şekil 1. Kullanılan kalıp ve reçine sürülmüş elyaflar

Birleştirme işlemi yapılan numuneler Şekil 3’te görüldüğü gibi; plakalar üzerinde elektrikli ısıtıcı ve pompa ünitesine sahip otomatik kontrollü hidrolik sıcak pres yardımıyla 30 bar basınçta bekletilmiştir. Kürleme işlemi ise sıcaklığın 30, 50, 70 ve 100 C^o ye kademeli olarak artırılması ile yapılmıştır.



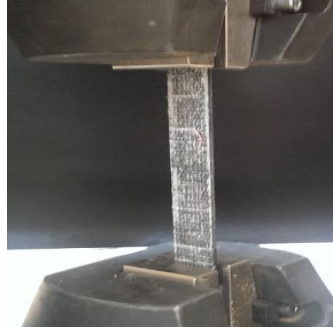
Şekil 2. Hidrolik Pompa, Hidrolik Sıcak Pres ve Kontrol Ünitesi

Tablo 1’de verilen dizilimlerde üretilen 3 farklı numune için kompozit plakalar ASTM 3479 M standartlarına göre 25x250 mm boyutlarında kesilmiş ve her numune için 15 adet olacak şekilde 45 numune elde edilmiştir. Çekme ve yorulma deneylerinde numunelerde eğilme meydana gelmemesi ve numunelerin çene kısmından ezilmemesi için numunelerin uç kısımlarına pabuç yapıştırılmıştır (Şekil 4).



Şekil 3. Deneysel olarak kullanılan numune örneği

Çekme ve yorulma deneyleri Batman Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü laboratuvarlarında yapılmıştır. Çekme deneylerinde kullanılan universal test cihazı 250 kN kapasiteye sahip ve çekme, eğilme, basma, burulma testlerinin yapılmasına imkân vermektedir. Şekil 5’te universal test cihazına bağlı bir numune görülmektedir. Yorulma testlerinde Scimadzu marka 100 kN kapasiteye sahip yorulma test cihazı kullanılmıştır. Testler sırasında $R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max} = 0.1$ ve frekans 10 Hz. olarak alınmıştır.



Şekil 4. Universal test cihazına bağlı numune görüntüsü

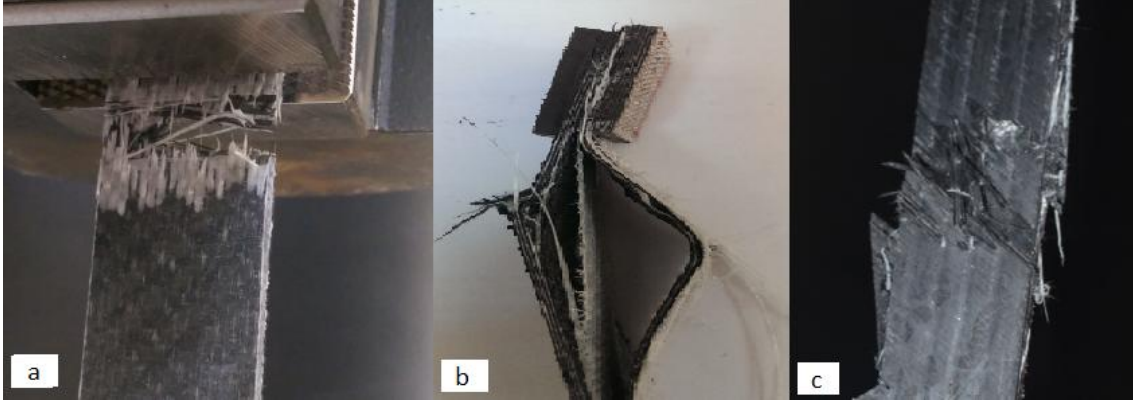
3. Sonuçlar

Yorulma testleri yapılmadan önce bütün numuneler çekme testine tabi tutularak maksimum çekme dayanımları tespit edilmiştir. Çekme deneyleri sonrasında üç numune için elde edilen maksimum gerilme değerleri Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Numunelerin maksimum çekme dayanımları

Numune Numarası	Tabaka Oryantasyonları	Maksimum Çekme Gerilmesi (MPa)
1	[Karbon twill (0°) ₆ / Cam twill (0°) ₆]	517
2	[Karbon twill (0°) ₆ / Cam tek yönlü (0°) ₆]	336
3	[Karbon tek yönlü (45°) ₆ / Cam twill (0°) ₆]	216

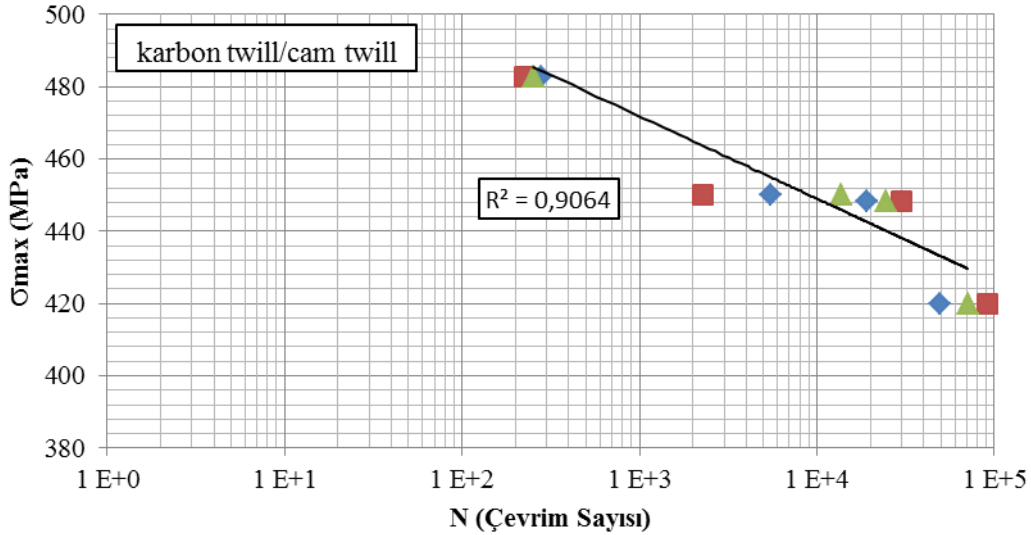
Numunelerde çekme sonrası oluşan hasarlar Şekil 6'da gösterilmiştir. Numunelerin hasar bölgeleri incelendiğinde kopan yüzeylerdeki hasarların tabaka oryantasyon açısıyla ilişkili olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 6. Çekme deneyi sonrası numune görüntüleri, a) karbon twill/cam twill, b) karbon twill/cam 0°, c) karbon 45°/ cam twill

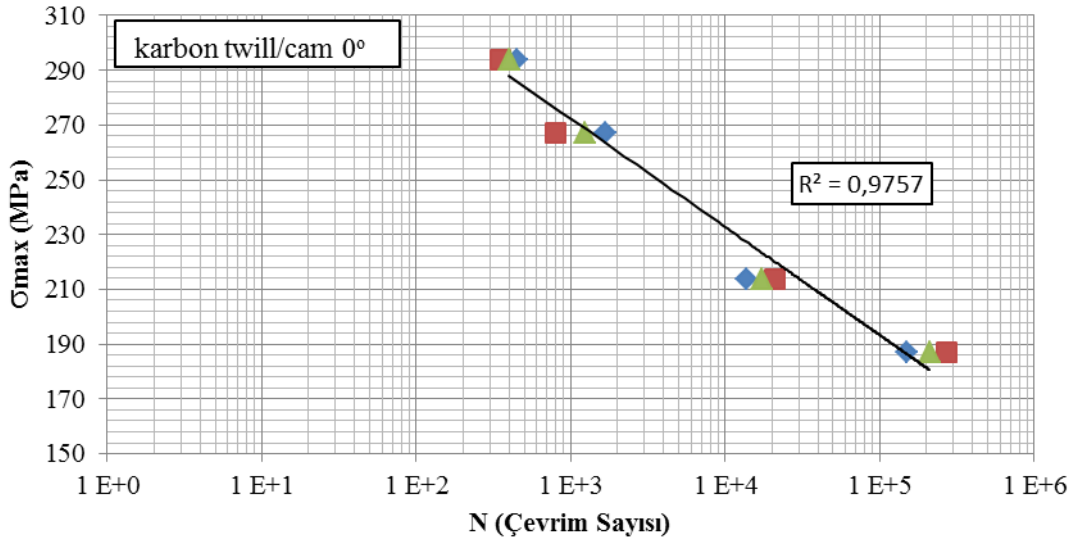
Kopma gerilmeleri tespit edilen numuneler yorulma testine tabi tutulmuştur. Yorulma deneylerinde numunelere uygulanan maksimum gerilme statik hasar yükünün %80, %75, %70 ve %65'ine denk gelecek şekilde seçilmiştir. Böylece numunelerin aynı oranda yüklenmesi sağlanmıştır. 3 numune için elde edilen gerilme-çevrim sayısı grafikleri aşağıda verilmiştir.

1 nolu numune için elde edilen gerilme-ömür grafiği Şekil 7'de verilmiştir. 483 MPa maksimum gerilme için çevrim sayısı ortalaması 252, 448 MPa maksimum gerilme için 24647, 420 MPa maksimum gerilme için 70800, 450 MPa maksimum gerilme için 13850 olmuştur. 10000 üzeri çevrim sayısı nedeniyle yüksek çevrimlidir [8].



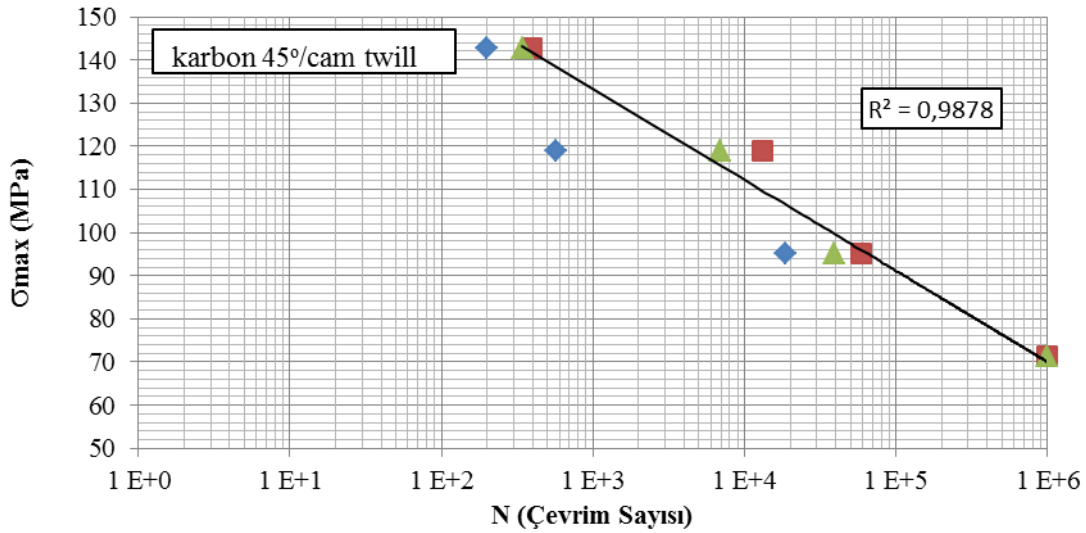
Şekil 7. 1 nolu numunenin gerilme-ömür grafiği

2 nolu numunenin gerilme-ömür grafiği Şekil 8'dedir. 294 MPa maksimum gerilme için çevrim sayısı ortalaması 399, 267 MPa maksimum gerilme için 1233, 214 MPa maksimum gerilme için 17259, 187 MPa maksimum gerilme için 211395 olmuştur. 2 nolu numune de yüksek çevrimlidir [8].



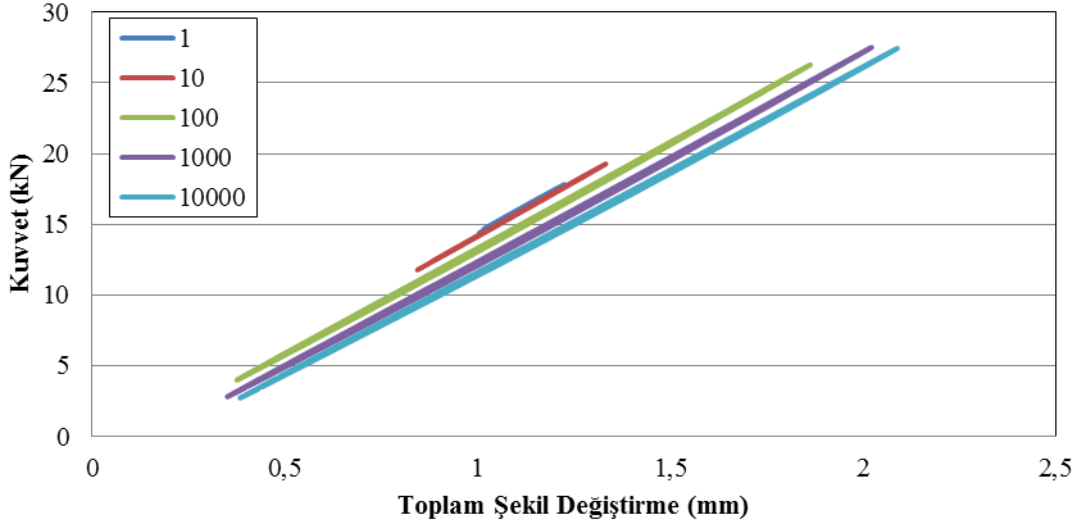
Şekil 8. 2 nolu numunenin gerilme-ömür grafiği

3 nolu numune için elde edilen gerilme-ömür grafiği Şekil 9'da verilmiştir. 143 MPa maksimum gerilme için çevrim sayısı ortalaması 341, 119 MPa maksimum gerilme için 6921, 95 MPa maksimum gerilme için 38838, 71 MPa maksimum gerilme için 1000000 olmuştur. 3 nolu numunede sonsuz ömür elde edilmiştir [8].



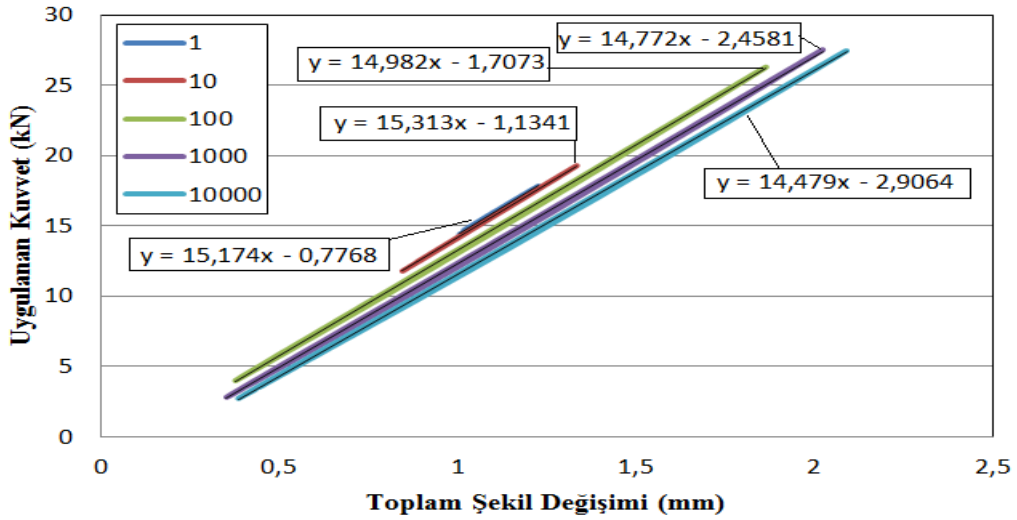
Şekil 9. 3 nolu numunenin gerilme-ömür grafiği

1 nolu numuneye ait kuvvet-şekil değişimi (hysteresis) eğrisi farklı çevrim sayıları için Şekil 10'da verilmiştir. Bu numunede çevrim sayısı arttıkça kuvvet-şekil değişimi eğrisinin arasında kalan alanın azaldığı görülmektedir.



Şekil 10. 1 nolu numunenin farklı çevrim sayıları için kuvvet-şekil değişimi eğrileri

Çevrim sayısı arttıkça eğrilerin eğimlerinde azalma meydana gelmektedir. Bu eğim azalmasının nedeni ise malzemenin modül özelliklerinde azalma ve fiber kopmaların gerçekleşmesidir [1]. Şekil 11’de 1 nolu numunenin eğri denklemleri gösterilmiştir. Eğri denklemlerinden hareketle çevrim sayısına karşılık gelen eğim açısı hesaplanmıştır.



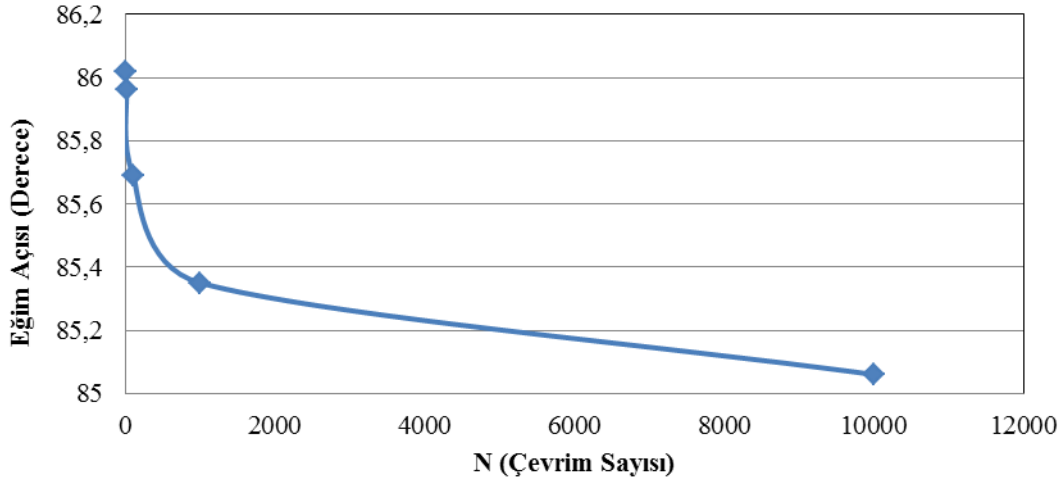
Şekil 11. 1 nolu numunenin çevrim sayısına karşı gelen eğrilerinin denklemleri

Şekil 11’de gösterilen histerezis eğrilerin, denklemleri ve eğimleri Tablo 3’te birlikte verilmiştir.

Tablo 3. 1 nolu numunenin eğri denklemlerinin eğimi

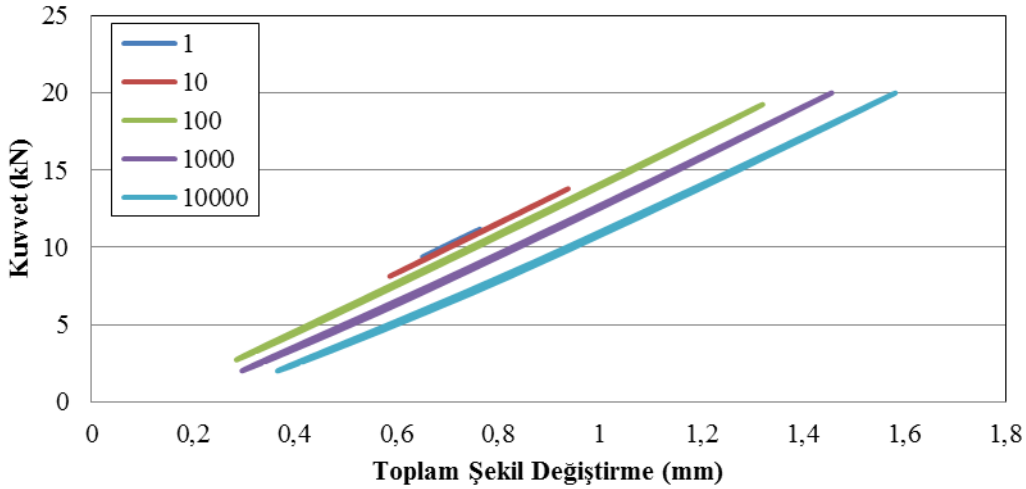
N (Çevrim Sayısı)	Eğrinin Denklemi	Eğrinin Eğimi
1	$y = 15,174x - 0,7768$	86.02°
10	$y = 15,313x - 1,1341$	85.96°
100	$y = 14,982x - 1,7073$	85.69°
1000	$y = 14,772x - 2,4581$	85.35°
10000	$y = 14,479x - 2,9064$	85.06°

Şekil 12’de, 1 nolu numune için çevrim sayısı ile histerezis eğrisinin eğimi arasındaki ilişki verilmiştir. Çevrim sayısı arttıkça eğimin azaldığı açık bir şekilde görülmektedir.



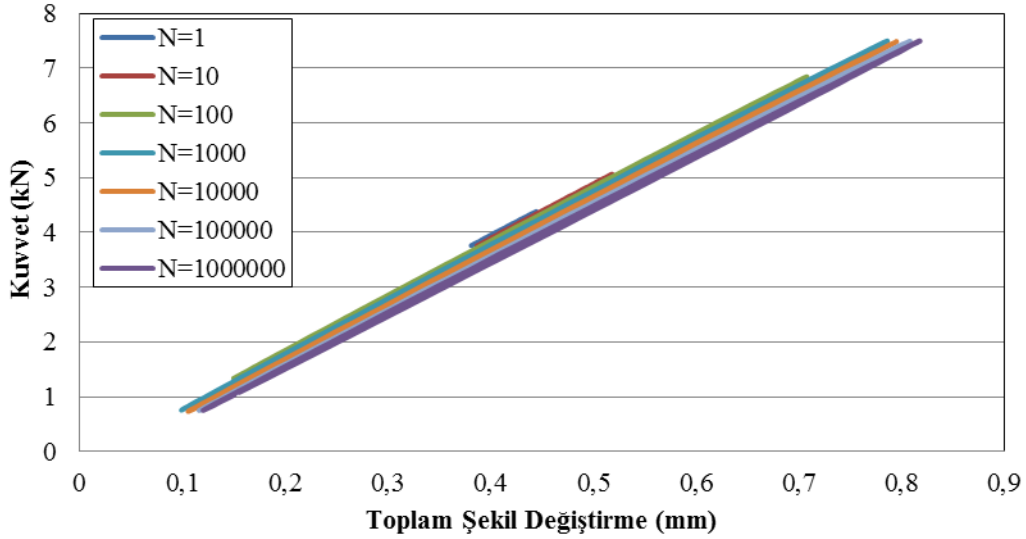
Şekil 12. 1 nolu numunenin çevrim sayısına karşı gelen eğim açıları

2 nolu numuneye ait kuvvet-şekil değişimi eğrisi farklı çevrim sayıları için Şekil 13’te verilmiştir. Bu numunede çevrim sayısı arttıkça kuvvet-şekil değişimi eğrisinin arasında kalan alan ve eğri eğimleri azalmıştır.



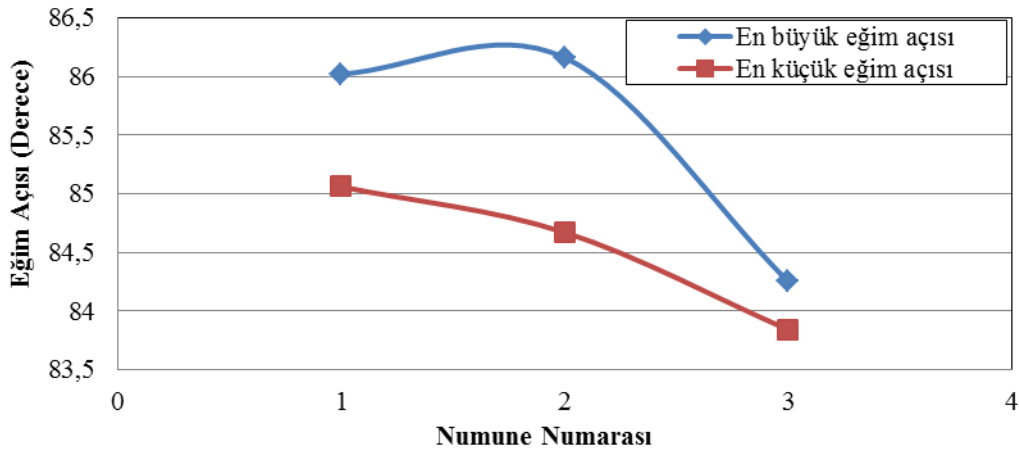
Şekil 13. 2 nolu numunenin farklı çevrim sayıları için kuvvet-şekil değişimi eğrileri

3 nolu numuneye ait kuvvet-şekil değişimi eğrisi farklı çevrim sayıları için Şekil 14’te verilmiştir. Bu numunede çevrim sayısı arttıkça kuvvet-şekil değişimi eğrisinin arasında kalan alanın azaldığı görülmektedir. Çevrim sayıları arasındaki fark daha az belirgin ve sık olarak görülmektedir. 3 nolu numune diğer numunelere göre daha rijit bir yapı sergilemiştir. Çevrim sayısı arttıkça eğri eğimleri azalmıştır.



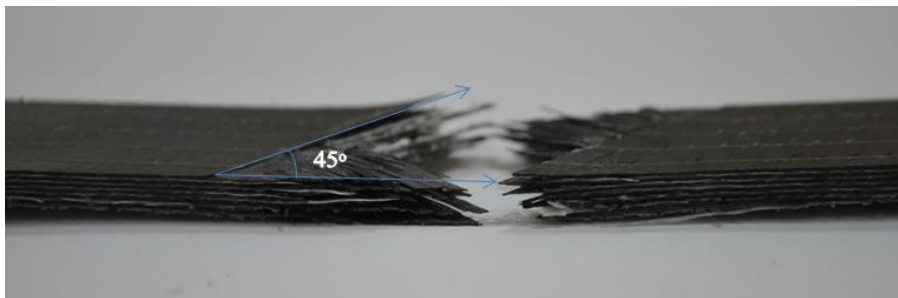
Şekil 14. 3 nolu numunenin farklı çevrim sayıları için kuvvet-şekil değişimi eğrileri

Şekil 15'te üç numunenin histerezis eğrilerinden elde edilen eğim açılarının en yüksek ve en düşük değerleri tek grafik üzerinde gösterilmiştir. Grafikte görüldüğü gibi en yüksek ve en düşük eğim açıları paralel doğrultuda olmuştur. En büyük eğim açısı 2 nolu numunede $86,16^\circ$, en düşük eğim açısı 3 nolu numunede $83,84^\circ$ dir.



Şekil 15. Numune eğim açılarının tek grafikte gösterimi

Histerezis eğrileri arasındaki alan azaldıkça malzemenin rijitliği artmaktadır [1]. Bu ifadeden yararlanıldığında üç numune içerisinde en rijit yapı Şekil 16'da hasar durumu gösterilen 3 nolu numune olarak değerlendirilmiştir. Malzemenin rijitliği ile orantılı olarak tabakalar birlikte çalışmış ve tabakalar arasında oluşan delaminasyon miktarı diğer numunelere oranla daha düşük olmuştur. Yorulma testleri neticesinde karbon 45° /cam twill dizilimine sahip bu numunenin ömrü sonsuza gitmiştir. Hasar oryantasyon açısıyla ilişkili 45° fiber açısında gerçekleşmiştir.



Şekil 16. 3 nolu numunenin yorulma deneyi sonrası görüntüsü

4. Değerlendirme

Gerçekleştirilen çalışmada farklı malzeme, fiber dokuma ve oryantasyon açılarında üretilmiş olan tabakalı hibrit kompozit malzemelerin yorulma davranışları deneysel olarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar ışığında yapılan değerlendirmeler aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- Yapılan çekme deneyleri neticesinde en yüksek gerilme karbon twill/ cam twill dizilimli numunede 517 MPa, en düşük gerilme ise karbon 45°/ cam twill dizilimli numunede 216 MPa olarak elde edilmiştir.
- En yüksek yorulma gerilmesi karbon twill/ cam twill dizilimli numunede 483 MPa, en düşük yorulma gerilmesi karbon 45°/ cam twill dizilimli numunede 143 MPa olarak elde edilmiştir. Bu durum fiber takviyeli kompozitlerin mekanik özelliklerinin fiber yönüne bağlı olarak değişkenlik göstermesindedir.
- Elyaf-matris arasında oluşan bağın iyi olmaması, elyaf mekanik özelliklerinin üniform olmaması, elyafın matris içerisinde üniform dağılmaması gibi nedenlerden dolayı aynı oryantasyon ve aynı dizilime sahip numunelerin mekanik özelliklerinde farklılıklar gözlemlenmiştir [9].
- Üç numunenin de çevrim sayıları 10000 üzerinde çıktığı için yüksek çevrimlidirler.
- Karbon 45°/ cam twill dizilimli numunenin çevrim sayısı 1000000 tespit edilmiştir. Bu durum numunenin sonsuz ömürlü olduğunu göstermektedir.
- Histerezis eğrileri incelendiğinde karbon 45°/ cam twill dizilimli numune diğer iki numuneye göre daha rijit bir yapı sergilemiştir.
- Histerezis eğrilerinde çevrim sayısı arttıkça eğimlerinde azalış meydana gelmiştir. Bunun nedeni ise modül özelliklerinde azalmanın meydana gelmesi ve fiber kopmaların gerçekleşmesindedir [1].
- Yapılan deneyler neticesinde bazı numunelerde gözle görülür tabakalar arası ayrışma tespit edilmiştir. Bu durumun, numune imalatı sırasında elyaflar arasına reçinenin tam nüfuz etmemesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.
- Genel olarak test sonuçları; dokuma fiberlerin alansal yoğunluğundan, fiber yönünden, elle yatırma yöntemi parametrelerinden, fiberlerin reçine geçirgenliğinden, fiberlerin tam ıslanıp ıslanamamasından etkilenmiştir [10].

Kaynaklar

- [1] M. Karahan, S.V. Lomov, A.E. Bogdanovich, I. Verpoest, *3-Boyutlu Karbon-Epoksi Kompozit Malzemelerde Yorulma Davranışı*, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, Cilt 19, Sayı 7, doi: 10.5505/pajes.2013.87587.
- [2] Jen M.H.R., Lee C. H., (1998). Strength and life in thermoplastic composite laminates under static and fatigue loads, Part I Experimental, *Journal of Fatigue*, 20, 605-615.
- [3] Colombo C., Vergani L., (2011). Multi-axial fatigue life estimation of unidirectional GFRP composite, *International Journal of Fatigue*, 33, 1032-1039.
- [4] Tomita Y., Morioka K., Iwasa M., (2001). Bending fatigue of long fiber reinforced epoxy composites, *Materials Science and Engineering*, A319-321, 679-682.
- [5] Kujawski D., (1998). Width effects on the tensile strength and fatigue behavior of angle-ply laminates, *International Journal of Fatigue*, 20, 575-580.
- [6] D.S. de Vasconcellos, F. Tauchard, L. Choconski-Arnault, (2014). *Tension-Tension Fatigue Behaviour of Woven Hemp Fibre Reinforced Epoxy Composite: A Multi-Instrumented Damage Analysis*, *International Journal of Fatigue*, 159-169.

- [7] P. Cornado, A. Argüelles, J. Vina, I. Vina, (2014) .Influence of low Temperatures on the Phenomenon of Delamination of Mode I Fracture in Carbon-Fibre/Epoxy Composites Under Fatigue Loading, Composite Structures,188-193.
- [8] A. Karcı,(2009). Uçak Yapısal Parçalarında Kullanılan Karbon/Epoksi Kompozit Malzemelerin Yorulma Davranışı, Doktora Tezi, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [9] Karacaer Y., (2009). Cam kumaş takviyeli delikli SMC kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [10] Sakin, R.,(2004). Bilgisayar destekli çok numuneli eğilme yorulması test cihazı tasarımı ve cam-fiber takviyeli polyester kompozitlerde eğilme yorulması davranışının incelenmesi, Doktora Tezi, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir.