



Analysis of fatigue behavior of jute fiber reinforced hybrid composite prepreg materials

Hayri Şen^{1*}, Tamer Özben²

¹Department of Textile Technology, Trakya University, 22180 Edirne, Türkiye

²Trakya University, Faculty of Engineering, Mechanical Engineering, 22180, Edirne, Türkiye

Highlights:

- Jute, carbon and glass prepreg composites are produced by hand lay-up method
- Samples consisting of 6 layers with symmetric, asymmetric and random arrangement; It is cut at an angle of 30°, 45°, 60°
- It has been determined that the results obtained with the multiplicity of the number of experiments increase the tendency to approach the real values

Keywords:

- Prepreg Material
- Layered Hybrid Composite
- Tensile Test
- Fatigue Test
- Wöhler curve
- SEM images

Article Info:

Research Article

Received: 14.02.2023

Accepted: 15.09.2024

DOI:

10.17341/gazimmfd.1250223

Acknowledgement:

This study was supported by Trakya University Scientific Research Projects Coordination Unit with TÜBAP-2019/282 project number.

Correspondence:

Author: Hayri Şen
e-mail:
hayrisen@trakya.edu.tr
phone: +90 284 224 0283 /
1040

Graphical/Tabular Abstract

Samples type, the maximum stress obtained as a result of the tensile test of each sample was determined for fatigue tests. As a result of the fatigue tests, the deformations on the composite plate samples emerged by delamination from the outer surface to the inner surface and close to the shoe parts of the samples, as seen in Figure A.



Figure A. Deformations of composite plates as a result of fatigue strength test

Purpose: 18 samples were created from surfaces obtained from jute, glass and carbon fibers with the same reinforcement and matrix material, but with the same number of layers with different alignments and orientations; Prepreg composite materials were subjected to fatigue test with load ratio $R=0.10$ and 10 Hz cycle frequency in accordance with ASTM D3479, ASTM D3479M – 19 standards. For each sample, the value at which the lowest tensile force is realized separately is accepted as the base, and the fatigue loads are chosen as 90% of the load and reduced by 10%; It continued at 90%, 80%, 70%, 60% load levels. By examining the fatigue behavior of rectangular cross-section samples; It is aimed to predict fatigue behavior and to extract S-N curves. The optimal S-N curve and corresponding limits for prepreg composites are thus based on a sufficient number of experiments and a 95% confidence interval.

Theory and Methods: Tensile, fatigue tests, SEM imaging and FTIR analyzes with samples of dimensions obtained in experimental standards. Samples consisting of 6 layers with symmetric, asymmetric and random arrangement; It is cut at an angle of 30°, 45°, 60°. Jute, carbon and glass prepreg composite materials were produced by hand lay-up method.

Results: Among the 18 samples; Composite plates produced with symmetrical, asymmetrical and random arrangement have high strength values against tensile loads as well as the desired stiffness; It was determined that as the deformation rate increased, their strength increased and they increased the tensile graphs. In the tensile strength comparison, the highest tensile strength value was 218.40 MPa, among the flat bar samples with asymmetrical arrangement. The lowest tensile strength of 74.96 MPa is among the asymmetrically arranged samples with Ø10 mm hole in the middle. As a result of the fatigue tests, it was determined that the samples with the highest cycles came out of the asymmetrical array samples.

Conclusion: It is seen that the fatigue life changes as a result of the application of orientation and alignment differences. The most important point to note here is that the number of cycles decreased with the effect of cracking and delamination. As a result of our experiments; It has been determined that the results obtained with the multiplicity of the number of experiments increase the tendency to approach the real values. For this reason, the importance of repetition frequency for experiments emerges.



Jüt lifi takviyeli hibrit kompozit prepreg malzemelerin yorulma davranışlarının analizi

Hayri Şen^{1*}, Tamer Özben²

¹Trakya Üniversitesi, Edirne Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Tekstil, Giyim, Ayakkabı ve Deri Bölümü, 22180 Edirne, Türkiye

²Trakya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği, 22180 Edirne, Türkiye.

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Jüt, karbon ve cam prepreg kompozitler el yatırma yöntemi ile üretilmiştir
- Simetrik, asimetrik ve rastgele dizilim ile 6 katmandan meydana gelen numuneler; 30⁰, 45⁰, 60⁰ açı ile kesilmiştir
- Deney tekrar çokluğu ile gerçek değerlere yaklaşma eğilimini artırdığı tespit edilmiştir

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 14.02.2023

Kabul: 15.09.2024

DOI:

10.17341/gazimmfd.1250223

Anahtar Kelimeler:

Prepreg malzeme,
tabakalı hibrit kompozit,
çekme deneyi,
yorulma deneyi,
wöhler eğrisi,
SEM görüntüleri

Ö Z

Günümüzde hızlı bir şekilde gelişen ve gelişmeye devam eden kompozit malzemelerin kullanım alanları ve kullanılan malzeme çeşitliliği ilişkilendirildiğinde mekanik özelliklerinin farklılıkları ön plana çıkmaktadır. Bu sebeple kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin incelenmesi önemli bir parametredir. Bu çalışmada tabakalı hibrit kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini belirlemek için birim kütle tayini, çekme testi, akabinde elde edilen veriler ile yorulma dayanımı testi ve SEM görüntüleme ile görüntü analizleri ile FTIR analizi incelenmiştir. Çalışmada 250 mm x 250 mm boyutlarında simetrik, asimetrik ve rastgele dizilim ile 6 katmandan meydana gelen; 30⁰ açı ile ikinci ve dokuzuncu numunede cam, beşinci ve onikinci numunede jüt prepreg malzeme, 45⁰ açı ile üçüncü ve onuncu numunede cam, altıncı ve onüçüncü numunede jüt prepreg malzeme, 60⁰ açı ile dördüncü ve onbirinci numunede cam, yedinci ve ondördüncü numunede jüt prepreg malzeme kesilerek tabakaya yerleştirilen jüt, karbon ve cam prepreg malzeme kullanılmıştır. Bu kompozit prepreg malzemeler ısıtma presi vasıtasıyla 40Bar basınç altında kademeli bir şekilde ısıtılıp, 120°C sıcaklıkta 45 dakika sabit sıcaklığa maruz bırakılıp akabinde pres altında oda sıcaklığına gelene kadar soğuması sağlanarak kompozit plakaların üretimi gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen tüm deneyler ASTM standartlarına uygun şekilde gerçekleştirilmiştir. Deneylerden elde edilen veriler grafikler ile desteklenip çalışma içinde sunulmuştur.

Analysis of fatigue behavior of jute fiber reinforced hybrid composite prepreg materials

H I G H L I G H T S

- Jute, carbon and glass prepreg composites are produced by hand lay-up method
- Samples consisting of 6 layers with symmetric, asymmetric and random arrangement; It is cut at an angle of 30⁰, 45⁰, 60⁰
- It has been determined that the tendency to approach the real values increases with the number of experiment repetitions

Article Info

Research Article

Received: 14.02.2023

Accepted: 15.09.2024

DOI:

10.17341/gazimmfd.1250223

Keywords:

Prepreg material,
layered hybrid composite,
tensile test,
fatigue test,
wöhler curve,
SEM images

ABSTRACT

When the usage areas of composite materials, which are rapidly developing and continuing to develop today, and the variety of materials used are related, the differences in their mechanical properties come to the fore. For this reason, examining the mechanical properties of composite materials is an important parameter. In this study, to determine the mechanical properties of layered hybrid composite materials, unit mass determination, tensile test, subsequent fatigue strength test with the data obtained, SEM imaging, image analysis and FTIR analysis were examined. In the study, it consists of 6 layers with symmetrical, asymmetrical and random arrangements, with dimensions of 250 mm x 250 mm; Glass in the second and ninth samples with an angle of 30⁰, jute prepreg material in the fifth and twelfth samples, glass in the third and tenth samples with an angle of 45⁰, jute prepreg material in the sixth and thirteenth samples, glass in the fourth and eleventh samples with an angle of 60⁰, jute prepreg material in the seventh and fourteenth samples. Jute, carbon and glass prepreg materials were used, which were cut and placed on the sheet. Composite plates were produced by gradually heating these composite prepreg materials under 40 Bar pressure through a heating press, exposing them to a constant temperature of 120°C for 45 minutes, and then allowing them to cool under the press until they reached room temperature. All experiments performed were carried out in accordance with ASTM standards. The data obtained from the experiments are supported with graphics and presented in the study.

*Sorumlu Yazar/Yazarlar / Corresponding Author/Authors : *hayrisen@trakya.edu.tr, tamerozben@trakya.edu.tr /

Tel: +90 284 224 0283 / 1040

1. Giriş (Introduction)

Kompozit malzemeler, genel bir tanım ile tarif edilmeye çalışılırsa; takviye elemanlarının (kısa ya da uzun lifler, vd.) uygun bir yöntem ve teknik yardımıyla, matris malzemesiyle karışması sonucu ortaya çıkan spesifik uygulama ve kullanım alanlarında kullanılan karma ve çok fazlı malzemeler şeklinde tanımlanabilir. Günümüz koşullarında modern malzemelerin öneminin gitgide artması ve rağbet görmesi ile kompozit malzemelere verilen önem de artmaktadır. Kompozit malzemelerin önemi, uygulama ve kullanım alanlarının sınırlarının genişlemesi ile birlikte daha da artmıştır. Bu da kompozit malzemelerin üretim tekniklerinin konvansiyonel yöntemlerden kurtulmasına ve özelliklerinin artırılmasını sağlamıştır.

Tepahan vd. [1] çalışmalarında; karbon fiber ve cam fiber takviyeli hibrit tabakalı bir kompozit plaka arasına eklenmiş alüminyum alaşımının yapı üzerindeki etkilerini üç boyutlu sonlu elemanlar yönteminden faydalanarak çarpışma analizi uygulanmışlardır. Bu analiz sonucundan sac levhanın ve yapılan kompozit diziliminin etkileri ve ideal dizilimler tespit edilmiştir. Yang vd. [2] çalışmalarında; odun unu/yüksek yoğunluklu polietilen kompozitlerin eğilme yorulma davranışlarını karakterize etmişlerdir. Liang vd. [3] yaptıkları çalışmada; keten ve cam kumaşlar ile güçlendirilmiş epoksi matrisli kompozitlerin yorulma dayanımlarını karşılaştırmışlardır. 0, 90 ve 45 derece elyaf yönlenme açısı ile numunelerin yorulma dayanımları incelenmiştir. Deneyler sırasında frekans 5 Hz seçilmiştir. S-N eğrilerine göre, cam takviyeli kompozitlerin keten takviyeli kompozitlere kıyasla daha yüksek yorulma özelliği göstermektedir. Cam takviyeli kompozitler, keten takviyeli kompozitlere kıyasla yorulmaya karşı direnci 64 MPa'dan daha yüksek ancak bu seviyenin altındaki stres seviyeleri için keten takviyeli kompozitlere göre daha yüksek yorulma özelliği göstermektedir. Doan vd. [4] yaptıkları çalışmada; jüt elyaf takviyeli epoksi matrisli kompozitlerin yüzey özellikleri ve arayüz etkileşimi üzerinde durmuşlardır. Fotouh vd. [5] çalışmalarında; Kenevir lifi takviyeli yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) kompozitlerin yorulma davranışlarını, farklı lif hacmi fraksiyonlarındaki yorulma ömürlerini (S - N) eğrilerini kullanılarak araştırmışlardır. Hüner [6] çalışmasında; doğal ve yapay takviyeli PP ve YYPE termoplastikleri esas malzemeler seçilerek kompozit malzemelerin çeşitli kompozit üretim yöntemleri kullanarak elde ettiği malzemelere mekanik testler uygulanmıştır. Malzemelerin iç yapı ve fiziksel özelliklerini de çalışma içerisinde inceleyip, doğal ve yapay takviyeler arasında ki farkları ortaya koymuştur. Graceraç vd. [7] çalışmalarında; biyo-kompozitlerin yapısal uygulamalar için özellikleri yüksek mukavemet ve elyaf takviyesi ile kompozitlerin anizotropik doğası nedeniyle yüksek sertlik gerektirmektedir. Bu çalışma içerisinde, bileşim parametrelerini optimize etmek için yeni geliştirilen jüt lifi takviyeli hibrid polimer kompozitlerin yorulma hasarları analiz edilmiştir. Hibrid polimer, geliştirilen kompozitin biyo uyumluluğunun artırılması için kaju fıstığı kabuğu sıvısı (CNSL) reçinesi ve polyester reçinesi karışımı ile hazırlanmıştır. İmak vd. [8] çalışmalarında; tabakalı kompozit malzemelerin, kullanım alanlarına bağlı tekrarlı yüklere maruz kalabildiklerinden; tekrarlı yüklere karşı dayanımları, izotropik malzemelerden farklı olarak anizotropik malzemelerin yorulma davranışlarının tespiti çok daha zor tespit edildiğini belirtmişlerdir. Bu çalışma içerisinde; karbon ve cam olmak üzere üç farklı hibrit numune elle yatırma yöntemi ile epoksi reçine kullanılarak üretilmiştir. Tabakalı hibrit kompozit malzemeler ASTM D3479, ASTM D3479M - 19 standartlarına göre 25 mm x 250 mm boyutlarında kesilmiş ve her numune için 15 adet, toplamda 45 numune için gerilme oranı 0,1 Hz. ve frekans 10 Hz. seçilerek yorulma davranışları deneysel bir şekilde incelenmiştir. Wu vd. [9] çalışmalarında; dokuma elyaf takviyeli kompozitlerin çok yüksek devirli yorulması için doğal bir frekans modeli üzerinde durmuşlardır.

Eğilme yorulma testi tasarlanmış ve çok yüksek devirli titreşim yüklemesine maruz kalan dokuma kumaş kompozitin doğal frekans bozulmasını incelemek için teorik bir model önermişlerdir. İlhan vd. [10] çalışmalarında; sisal, jüt, kenaf vb. farklı doğal elyaf takviyesi ve cam kürecik, grafit, alümina vb. farklı dolgu maddesi kullanımının cam takviyeli polimer (CTP) kompozit malzemelerin özelliklerine etkisi incelemektedir. Doğal elyafların ve dolgu maddelerinin farklı üretim yöntemleriyle CTP kompozit malzemelere başarıyla dahil edebildikleri, malzeme özelliklerini iyileştirici etki ortaya koyduğu ve maliyetleri düşürebildiklerini tespit etmişlerdir. Öktem vd. [11] çalışmalarında; jüt kumaş/epoksiden ve jüt kumaş/polyesterden meydana getirilmiş kompozit levhalar ile kürlenmemiş jüt elyaf kumaşlar ile kürlenmiş kompozit levhaların çeşitli özelliklerini incelemişlerdir. NaOH kullanılarak yapılan kimyasal işlemin jüt liflerinin boyutlarını arttırdığı, asetik asit kullanılarak yapılan kimyasal işlemin ise liflerin boyutlarını azalttığı sonucunu elde etmişlerdir. Çetin vd. [12] çalışmalarında; karbonize edilmiş Antep fıstığı kabuğu atığını ağırlıkça %5-50 arasında değişen oranlarda dolgu maddesi ilave ederek esnek iletken polimer kompozitler üretilmiştir. Elektriksel karakterizasyon yanında, morfolojik ve mekanik karakterizasyonlarını incelemişlerdir. Hem morfolojik hem de elastik modül, kopma gerilimleri, gerilim-uzama eğrileri gibi mekanik özelliklerin dolgu konsantrasyonları arttıkça etkilediğini tespit etmişlerdir. Bulut vd. [13] çalışmalarında; epoksi matris sistemine katılan nano kil (NK) ağırlıkça farklı konsantrasyonlar (%0,0, %0,5, %1,0, %1,5, %2,0 ve %3,0) içeren bazalt elyaf takviyeli tabakalı kompozit plakalar eksel ve yan basma yüklemelerine tabi tutularak, burkulma özelliklerinin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Numunelerin SEM görüntüleri analiz ederek incelemişlerdir. Toparlı [14] çalışmasında; tungsten karbür-kobalt (WC-Co) sertmetal malzemelere bilyalı dövme işlemi uygulamıştır. Malzeme karakterizasyon testleri sonrası yorulma ömürleri ve sertlik değerleri üzerinde durmuştur. Yüzey pürüzlülük ölçümleri sonucunda, bilyalı dövme işlemi sonrası malzeme Ra ve Rz değerlerinde sırasıyla %113 ve %83'lük artışlar gözlemlenmiştir. Numunelerin kırılma yüzeyleri yorulma testleri sonrasında taramalı elektron mikroskobu ile incelemiştir. Çiğdem vd. [15] çalışmalarında; ısıl işlem uygulanmış ve fenol formaldehit (FF) tutkalı kullanılarak karbon ve cam elyaf ile güçlendirilmiş kayın (Fagus orientalis Lipsky) ağacından elde edilen lamine kompozit örneklerin bazı fiziksel ve mekanik özellikleri araştırılmıştır. karbon fiber ile güçlendirilmiş deney örneklerin MOR ve MOE değerleri, cam elyaf ile güçlendirilmiş örneklerden daha yüksek, CS// ve SS değerleri ise daha düşük belirlenmiştir. Kaveloğlu vd. [16] çalışmalarında; üç farklı hücre genişliği ve hücre duvar kalınlığındaki (6_0,8mm, 9_1,2mm ve 12_1,6mm) bal peteği geometrileri kullanılarak 3 boyutlu yazıcıda polilaktik asit (PLA) filamentten üretilen çekirdeklerin alt ve üst yüzeyleri karbon fiber takviyeli kompozit plakalarla (CFRP) yapıştırıcı ile birleştirilen sandviç kompozitlerin düşük hızda darbe performanslarını beş farklı enerji seviyelerinde (30J, 40J, 60J, 80J ve 100J) düşük hızda darbe testleri araştırılmışlardır. 100J darbe enerjisinde sandviç kompozitler tamamen delinmiştir. Öztemiz vd. [17] çalışmalarında; sandviç panel kompozit malzemesi, üst ve alt levha paslanmaz çelik-316, çekirdek malzemesi alüminyum 1050A-0 ve bağlayıcı eleman DP-8405 akrilik yapıştırıcı ile yapıştırılarak; eğilme davranışları, üç nokta eğilme testleri ve sonlu eleman modelleri ile incelenmiştir. Er vd. [18] çalışmalarında; PLA filament ve yaklaşık olarak ağırlıkça %80 oranında 410L çelik tozu katkısına sahip PLA-Çelik filament malzemeler darbe dayanımı, çekme dayanımı ve termal iletkenlik özellikleri açısından karşılaştırmışlardır. Deney numunelerinin üretiminde dolgu oranı, baskı sıcaklığı, baskı hızı ve katman kalınlığı baskı parametrelerinin farklı seviyeleri kullanılmıştır. Bu baskı parametrelerinin darbe ve çekme dayanımı değerlerine olan etkisi incelenmiştir. Baskı parametrelerinin etkileri ANOVA analizi sonuçları ile ortaya konmuştur. Ayrıca malzemelerin mikroyapısı

SEM görüntüleri incelenmişlerdir. Bu çalışma ile karbon, jüt ve cam liflerden dokunan prepeg malzemelerin, oryantasyon açısı verilen jüt ve cam elyafların birleşimiyle onsekiz farklı tabakalı hibrit kompozit numunenin ASTM standartlarına uygun birim kütle tayini, çekme, yorulma, davranışları ve SEM görüntü analizleri incelenmiştir. Bu amaçla 2 tabakası cam, 2 tabakası jüt ve 2 tabakası karbon elyaftan meydana getirilen prepeg malzemelerden simetrik, asimetrik ve rastgele dizilim 6 tabakalı hibrit kompozit plakalar el yatırma yöntemi ile sıcak presleme yapılarak 250 mm x 250 mm boyutlarında kompozit levhalar üretilmiştir. Deneyleri neticesinde en yüksek ve en düşük çekme verilerine ve yorulma ömrüne sahip numuneler tespit edilip; jüt lifi takviyeli prepeg malzemelerin bitkisel esaslı liflerin sentetik lifler ile kullanıldığında sunduğu mekanik özelliklerinin incelenmesi ve elde edilen SEM görüntüleri ile hasar analizleri tespit edilmiştir. Deneylerden elde edilen veriler grafikler ile desteklenip çalışma içinde sunulmuştur.

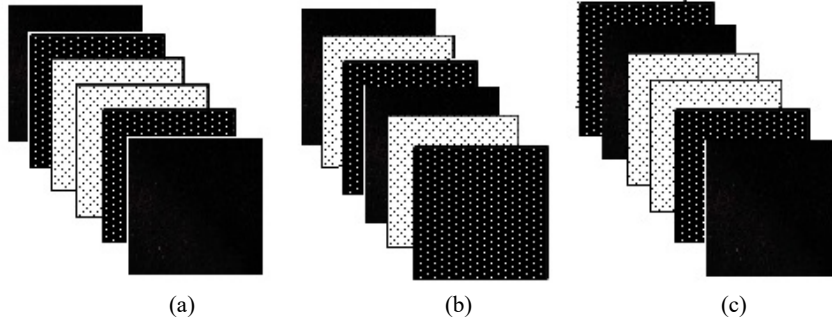
2. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

Tabakalı hibrit kompozit numunelerin üretimi için jüt, karbon ve cam prepeg malzemeler 250 mm x 250 mm boyutlarında; 30° açı ile ikinci ve dokuzuncu numunede cam, beşinci ve onikinci numunede jüt prepeg malzeme, 45° açı ile üçüncü ve onuncu numunede cam, altıncı ve onüçüncü numunede jüt prepeg malzeme, 60° açı ile dördüncü ve onbirinci numunede cam, yedinci ve onördüncü numunede jüt prepeg malzeme kesilerek tabakaya yerleştirilen jüt, karbon ve cam prepeg malzemeler; simetrik, asimetrik ve rastgele dizilim ile 6 katmandan meydana gelecek şekilde malzemelerin gösterdiği ve sergilediği davranışlar tespit edilmeye çalışılması amacıyla tabakalandırılmıştır. Tabakalı hibrit kompozit numunelerin takviye malzemesinin ağırlıklarının %20'si kadar reçine ve sertleştirici kullanılmıştır. Kompozit levhalar 6 katmandan meydana gelmiştir. Şekil 1'de görüldüğü üzere simetrik, asimetrik ve rastgele dizilim ile tabakalandırılmıştır.

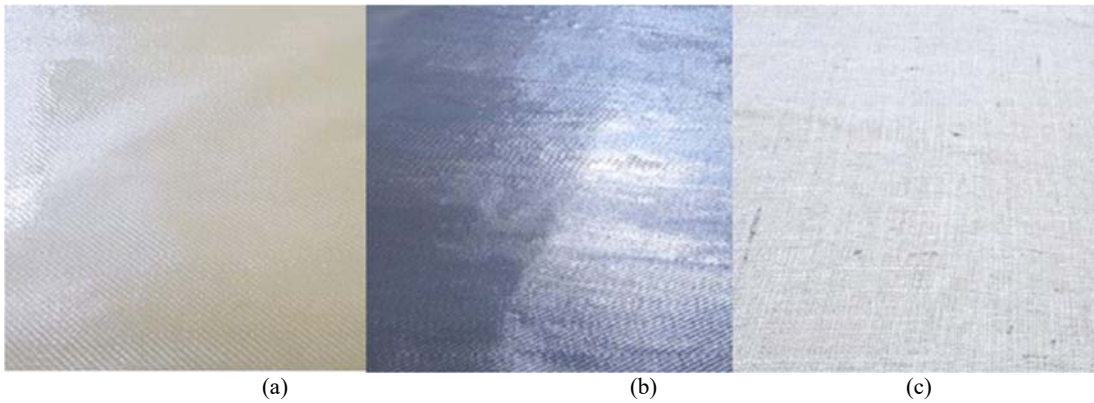
Üretilen jüt, cam, karbon takviyeli tabakalı hibrit kompozit plakalar su jeti kesim yöntemiyle 0,76 mm çapında nozuldan 4000 Bar basınçla dakikada yaklaşık 600- 935 m hız ile 350 gr kumlama yaparak suyun çok yüksek kuvvetle geçmesiyle yapılan deney ve testler doğrultusunda standartlarda belirtilen boyutlarda 0,1 mm toleransla kesilmiştir. Bu boyutlar çekme ve yorulma testleri için 250 mm x 25 mm'dir. Delikli kompozit numunelere uygulanan gerilme dayanımı test işlemi ASTM D 5766/D 5766M-02a standardına [23] uygun şekilde oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. 6 katmandan meydana gelecek onsekiz farklı tabakalı hibrit kompozit malzemelere geometrik şekil verildiğinde elde edilecek verileri nasıl etkileyebileceğini tespit etmek amacıyla tam ortasında Ø10 mm delikli ve her iki yanının ortasında Ø10 mm çaplı yarım daire delikli çubuk numunelerde üretilmiştir. Bu sayede Şekil 2'de görülen cam, karbon ve jüt prepeg malzemeler 250 mm x 250 mm boyutlarında kompozit haline getirilip bu plakalardan mekanik testler için gerekli numuneler su jeti yardımı ile kesilerek elde edildi.

Deney numunelerinin uç kısımlarına çekme ve yorulma deneyleri için çift taraflı yaklaşık 25 mm x 30 mm boyutlarında pabuç giydirme işlemi yapılmıştır. Çekme ve yorulma deneyleri esnasında numunelerin çenelerden kaymaması, çenelere tam oturması amacı ile pabuç giydirme işlemi, üretimi gerçekleştirilen kompozit malzemelerden yapılmıştır. 25 mm x 250 mm boyutlarındaki deney numunelerinin uç kısımlarına çift taraflı, ön ve arka yüzüne gelecek şekilde 502 süper sıvı yapıştırıcı ile yapıştırılmıştır.

Jüt, karbon ve cam lifli prepeg malzemeler Fibermak Mühendislik Makina Kalıp Kompozit Sanayi ve Ticaret Limited Şirketi tarafından temin edilmiştir. Prepeg malzemelere uygulanan matris malzemesi F-RES 21/F-HARD 22'dir. Prepeg kompozit uygulamalarında solvent tipi prepeg reçine uygulanmıştır. 2 tabakası cam, 2 tabakası jüt ve 2 tabakası karbon elyaftan meydana getirilen prepeg malzemelerden simetrik, asimetrik ve rastgele dizilim 6 tabakalı hibrit



Şekil 1. (a) Simetrik, (b) asimetrik, (c) rastgele prepeg dizilimi ((a) Symmetrical, (b) asymmetrical, (c) random prepeg arrangement)



Şekil 2. (a) Cam, (b) karbon ve (c) jüt prepeg ((a) Glass, (b) carbon and (c) jute prepeg)

kompozit plakalar el yatırma yöntemi ile Tablo 1-Tablo 3'te belirtilen dizilim ile 6 katmandan meydana gelen plakalar; 1.-7. numuneler Simetrik prepreg malzeme dizilimli, 8.-14. numuneler asimetrik prepreg malzeme dizilimli, 15.-18. numuneler rastgele prepreg malzeme dizilimli farklı tabakalı hibrit kompozit malzemelere ısıtma presinde 40Bar basınç altında kademeli bir şekilde 20 dakika ısıtılarak, 120°C sıcaklıkta 45 dakika sabit sıcaklık uygulanmıştır. Kompozit plakalar pres altında oda sıcaklığına gelene kadar soğumaya bırakılmıştır. Kompozit plakaların mekanik özelliklerini belirlemek için; birim kütle tayini, 3 tekrarlı çekme testi, 5 tekrarlı yorulma dayanımı testleri yapılmıştır. Ayrıca; SEM görüntüleme ile görüntü analizleri yapılarak FTIR analizi incelenmesi yapılmıştır.

Karbon, jüt ve cam prepreg malzemeler ile kompozit plakaların birim kütle tayinleri, 250 mm x 250 mm boyutlarındaki malzemelerin m²'ye düşen ağırlığı yani alan kütlesi hassas terazide tartılması vasıtasıyla gerçekleştirilmiştir. Çalışmada üretilen kompozit malzemelerin gerilme dayanımı ve elastikiyet modülü özellikleri Batman Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Laboratuvarında Shimadzu marka çekme test makinasında gerçekleştirilmiştir. Çekme deneylerinde kullanılan üniversal test cihazı 250 kN kapasiteye sahip ve çekme, eğilme, basma, burulma testlerinin yapılmasına imkân vermektedir. Kompozit numunelere uygulanan gerilme dayanımı test işlemi ASTM D3039/D3039M-07 standardına [20] uygun şekilde oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Analiz işleminde kullanılan çekme çubukları Şekil 3'te görüldüğü üzere uzunluğu 250 mm, eni 25±1 mm numunedir. Test gerçekleştirilme hızı ise 2 mm/dk'dır. Çekme deneyi ile simetrik, asimetrik, rastgele dizilimli kompozit numunelerin gerilme dayanımları, kopma uzamaları incelenmiştir. Çekme testi sonucunda elde edilen veriler ile yorulma testleri her numune için ayrı ayrı en düşük çekme kuvvetinin gerçekleştiği değer taban kabul edilerek yorulma yükleri, yükün %90'ı seçilmiş ve %10 azaltılarak; %90, %80, %70, %60 yükleme tipleri ile gerçekleştirilmiştir. Gerilme dayanımı test cihazı ve çekme testi numune örneği aşağıdaki Şekil 3'te gösterilmektedir.



Şekil 3. Shimadzu çekme test makinası ve çekme testi numune örneği; 25 mm x 250 mm (Shimadzu tensile testing machine and tensile test sample; 25mm x 250mm)

Bu çalışma içerisinde dikdörtgen kesitli numunelerin yorulma davranışları incelenerek S-N eğrilerinin çıkarılması hedeflenmiştir. Kompozitler için en uygun S-N eğrisi ve karşılık gelen sınırları yaklaşık %95 güven aralığına dayanmaktadır. Çalışmada üretilen kompozit plakaların yorulma deneyleri Batman Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Laboratuvarında Shimadzu marka yorulma test makinasında gerçekleştirilmiştir. Kompozit numunelere ASTM D3479, ASTM D3479M – 19 standartlarına [21-22] uygun şekilde oda sıcaklığında, yük oranı R= 0,10 ve 10 Hz. çevrim frekansında yorulma testine tabi tutulmuştur. Her numune için ayrı ayrı en düşük çekme kuvvetinin gerçekleştiği değer taban kabul edilerek yorulma yükleri, yükün %90'ı seçilmiş ve %10 azaltılarak; %90, %80, %70, %60 yük seviyesinde devam edilmiştir.

Tablo 1. Simetrik prepreg malzeme dizilimi (Symmetrical prepreg material arrangement)

N01 S0	N02 S30	N03 S45	N04 S60	N05 S30	N06 S45	N07 S60
Karbon	Karbon	Karbon	Karbon	Karbon	Karbon	Karbon
Jüt	Jüt	Jüt	Jüt	Jüt -30°	Jüt -45°	Jüt -60°
Cam	Cam-30°	Cam-45°	Cam-60°	Cam	Cam	Cam
Cam	Cam-30°	Cam-45°	Cam-60°	Cam	Cam	Cam
Jüt	Jüt	Jüt	Jüt	Jüt -30°	Jüt -45°	Jüt -60°
Karbon	Karbon	Karbon	Karbon	Karbon	Karbon	Karbon

Tablo 2. Asimetrik prepreg malzeme dizilimi (Asymmetrical prepreg material arrangement)

N08 AS0	N09 AS30	N10 AS45	N11 AS60	N12 AS30	N13 AS45	N14 AS60
Karbon	Karbon	Karbon	Karbon	Karbon	Karbon	Karbon
Jüt	Jüt	Jüt	Jüt	Jüt- 30°	Jüt- 45°	Jüt- 60°
Cam	Cam-30°	Cam-45°	Cam-60°	Cam	Cam	Cam
Karbon	Karbon	Karbon	Karbon	Karbon	Karbon	Karbon
Jüt	Jüt	Jüt	Jüt	Jüt- 30°	Jüt- 45°	Jüt- 60°
Cam	Cam-30°	Cam-45°	Cam-60°	Cam	Cam	Cam

Tablo 3. Rastgele prepreg malzeme dizilimi (Random prepreg material arrangement)

N15 R0	N16 R0	N17 R0	N18 R0
Karbon	Cam	Karbon	Cam
Jüt	Jüt	Cam	Karbon
Cam	Karbon	Jüt	Jüt
Karbon	Jüt	Cam	Jüt
Cam	Karbon	Jüt	Cam
Jüt	Cam	Karbon	Karbon

Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi yönteminin kullanılması ile kompozit numuneler üzerinde nanopartikül yüzeyler bulunmadığından sadece polimerler arasındaki bağlanma ve kompozit malzeme cinsinin kontrol tespiti Trakya Üniversitesi Teknoloji Araştırma ve Geliştirme Uygulama ve Araştırma Merkezi Laboratuvarında Şekil 3’de gösterilen Perkin-Elmer Frontier 95029 seri numaralı FTIR spektrometre cihazında yapılmıştır. Çalışmada 4000-450 cm⁻¹ spektral sınırlar alınmıştır. Kompozit plakalı numunelere ait tüm spektral bölgenin FTIR spektrumları 30’da gösterilmiştir. Bu grafikte farklı tepe noktaları elde edilmiştir. Elde edilen spektrumların yapıları korelasyon çizelgeleri ve frekans çizelgeleri kullanılarak kompozit prepreğlerin molekül yapısındaki fonksiyonel gruplar belirlenmeye çalışılmıştır.

3. Sonuçlar ve Tartışmalar (Results and Discussions)

3.1. Birim Kütle Tayini (Determination of Unit Mass)

Jüt, karbon, cam prepreğler kullanılarak elde edilen simetrik, asimetrik ve rastgele diziliimli kompozit plakalar 250 mm x 250 mm boyutlarında üretilmiştir. Kompozit malzemelerin gramajları g/m² cinsinden ifade edilmiştir. Tablo 4, Tablo 5’te elde edilen sonuçlar verilmiştir.

Değişim katsayısı (% CV) değerlerinin hesaplanması için; elde edilen verilerin her biri (X) için ortalama (Xort) Eş. 1 numaralı formüle göre, standart sapma (S) Eş. 2 numaralı formüle göre elde edilerek Eş. 3 numaralı formüle göre % CV değerleri hesaplanmıştır.

$$X_{ort} = \sum X/n \quad (1)$$

$$S = \sqrt{\sum (X - X_{ort})^2 / n - 1} \quad (2)$$

$$\% CV = (S / X_{ort}) \times 100 \quad (3)$$

3.2. Çekme Testi (Tensile Test)

Çekme deneyi sonucunda elde edilen numunelerin hasar kısımları incelendiğinde kopan yüzeylerdeki hasarların tabaka oryantasyon açısıyla ilişkili bulunduğu tespit edilmiştir [8].

Simetrik dizilim ile üretilen kompozit plakaların; düz, tam ortasında Ø10 mm delikli ve her iki yanının ortasında Ø10 mm çaplı yarım daire delikli çubuk numuneleri için çekme dayanımı test sonuçları, düz çubuk numuneler, tam ortasında Ø10 mm delikli numunelere ve her iki yanının ortasında Ø10 mm çaplı yarım daire delikli numunelere kıyasla maksimum uzama ve en iyi çekme dayanımını ortalama 151 MPa gerilme dayanımı ve %22 birim uzama performansı ile elde edilmiştir. Simetrik dizilim ile üretilen kompozit plakalar arasında %23,9’luk en iyi birim uzama performansı; N05 S30 plakalı düz çubuk numunede, minimum uzama ise N06 S45 plakalı tam ortasında Ø10 mm delikli numunede %8,8’lik birim uzama meydana gelmiştir.

Asimetrik dizilim ile üretilen kompozit plakaların; düz, tam ortasında Ø10 mm delikli ve her iki yanının ortasında Ø10 mm çaplı yarım daire delikli çubuk numuneleri için çekme dayanımı test sonuçları; asimetrik dizilim ile üretilen kompozit plakaların; düz çubuk numuneler, tam ortasında Ø10 mm delikli numunelere ve her iki yanının ortasında Ø10 mm çaplı yarım daire delikli numunelere kıyasla maksimum uzama ve en iyi çekme dayanımını ortalama 154 MPa gerilme dayanımı ve % 22,6 birim uzama performansı ile elde edilmiştir. Asimetrik dizilim ile üretilen kompozit plakalar arasında %28,6’lık en iyi birim uzama performansı ile N12 AS30 plakalı düz çubuk numunede, minimum uzama ise N14 AS60 plakalı tam ortasında Ø10 mm delikli numunede %8’lik birim uzama meydana gelmiştir.

Rastgele dizilim ile üretilen kompozit plakaların; düz, tam ortasında Ø10 mm delikli ve her iki yanının ortasında Ø10 mm çaplı yarım daire delikli çubuk numuneleri için çekme dayanımı test sonuçları, her iki yanının ortasında Ø10 mm çaplı yarım daire delikli numuneler, düz çubuk numunelere ve tam ortasında Ø10 mm delikli numunelere kıyasla maksimum uzama ve en iyi çekme dayanımını ortalama 153 MPa gerilme dayanımı ve %21,5 birim uzama performansı ile elde edilmiştir. Rastgele dizilim ile üretilen kompozit plakalar arasında %23,4’lük en iyi birim uzama performansı ile N17 R0 plakalı düz çubuk numunede, minimum uzama aynı serinin tam ortasında Ø10 mm delikli numunede %9,6’lık birim uzama meydana gelmiştir.

Tablo 4. Prepreg malzemelerin gramajları (Weights of prepreg materials.)

Prepreg Adı	Karbon Fiber Prepreg	Jüt Fiber Prepreg	Cam Fiber Prepreg
Ağırlığı (g/m ²)	245 g/m ² (±5%)	284 gr/m ² (±5%)	300 g/m ² (±5%)

Tablo 5. Kompozit plakaların gramajları (Weights of composite plates.)

Numune Kodu	1.Numune	2. Numune	3. Numune	4. Numune	Ortalama g/m2 (±5%)	% CV
N01 S0	165,5	173,3	175,6	175,1	2758	2,720
N02 S30	174,7	189,3	170,7	171,3	2824	4,937
N03 S45	184,6	160,5	165,1	165,8	2704	6,309
N04 S60	188,4	171,6	164,1	166,5	2762,4	6,346
N05 S30	179,5	172,6	164,8	166,9	2735,2	3,851
N06 S45	179,9	170,5	167,9	171,6	2759,6	3,008
N07 S60	170,1	167	167,2	166,4	2682,8	0,985
N08 AS0	172,5	177,5	166,7	166,7	2733,6	3,049
N09 AS30	168,1	170,4	167,9	178,1	2738	2,797
N10 AS45	188,2	179,1	172,2	160,5	2800	6,673
N11 AS60	175,3	182,1	168,5	162,6	2754	4,901
N12 AS30	180,6	175,6	169,5	175,4	2804,4	2,590
N13 AS45	167,5	171,5	164,6	169,1	2690,8	1,722
N14 AS60	172,8	165,7	172,5	169,9	2723,6	1,930
N15 RO	179,2	162,6	159,5	175,1	2705,6	5,635
N16 RO	165,1	186,4	184,1	161,2	2787,2	7,401
N17 RO	166,5	169,1	167,1	164,3	2668	1,185
N18 RO	155,9	164,7	158,1	163,2	2567,6	2,59

Şekil 4'te bulunan grafiğe göre N01 S0-N18 R0 arasındaki; simetrik, asimetrik, rastgele dizilim ile üretilen kompozit plakalardan istenen rijitliklerinin yanında çekme yüklemeleri karşısında yüksek mukavemet değerlerine sahip bulunmaları ile birlikte; deformasyon hızı arttıkça mukavemetlerinin arttığı buna bağlı olarak çekme grafiklerini yukarı taşıdıkları saptanmıştır. Çekme dayanımı kıyaslamasında en yüksek çekme dayanımı değeri 218,40 MPa ile asimetrik dizilimli düz çubuk numuneler arasında yer alan N12 AS30 plakasında, en düşük çekme dayanımı da 74,96 MPa ile asimetrik dizilimli tam ortasında Ø10 mm delikli numuneler arasında yer alan N09 AS30 plakasında görülmektedir.

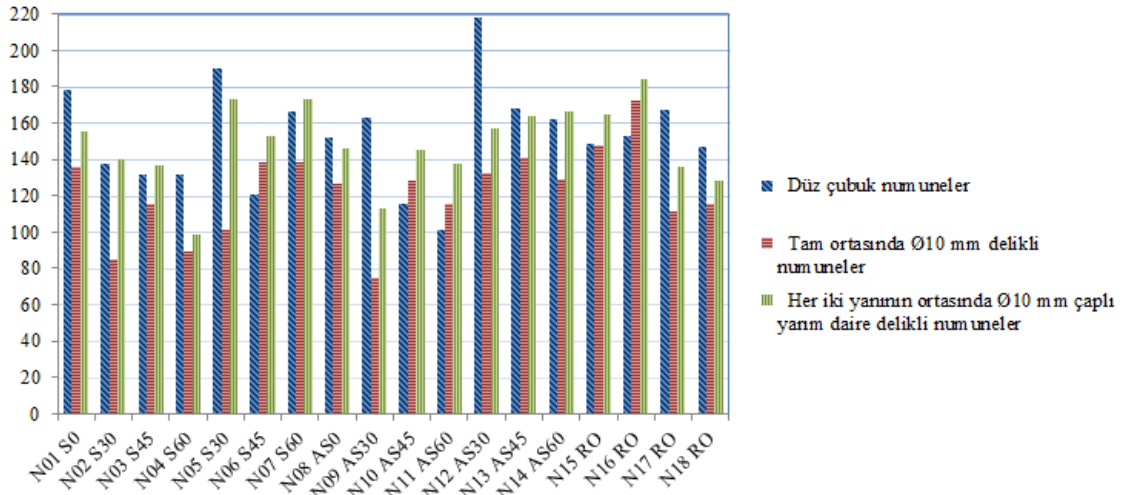
Şekil 5'te bulunan grafiğe göre N01 S0-N18 R0 arasındaki simetrik, asimetrik, rastgele dizilim ile üretilen kompozit plakalardan maksimum uzama 7,166 mm ile asimetrik dizilimli düz çubuk numuneler arasında yer alan N12 AS30 plakasında, minimum uzama 2,016 mm ile asimetrik dizilimli tam ortasında Ø10 mm delikli numuneler arasında yer alan N14 AS60 plakasında görülmektedir. Bu numuneler üzerinde kopma uzaması değerleri diğer numunelere göre en düşük değerlere sahiptir.

Simetrik, asimetrik, rastgele dizilim ile üretilen kompozit plakalar arasındaki maksimum çekme dayanımı jüt katmanda 30° oryantasyona sahip N12 AS30 plakasında, asimetrik dizilimli düz çubuk numunede meydana gelmiştir. Bu da malzemenin dokuma çeşidinden etkilenerek bağlanmayı ve matris tutunmasını etkilemiştir.

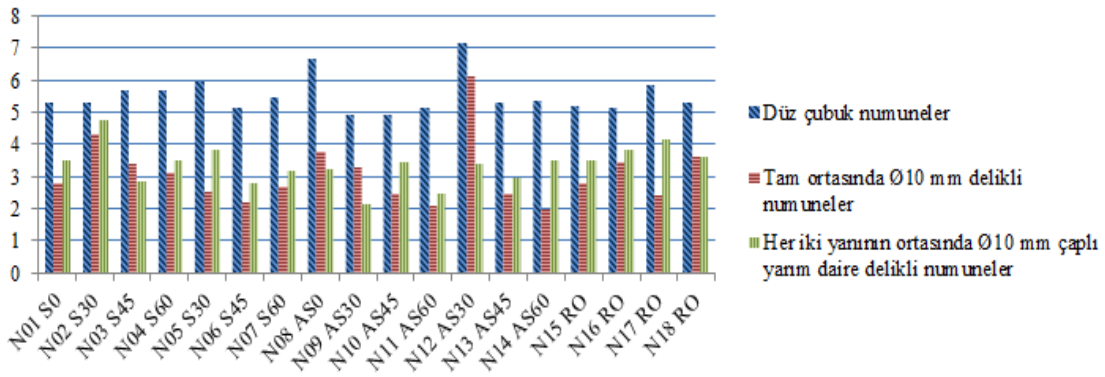
Minimum çekme dayanımı ise asimetrik dizilimli, tam ortasında Ø10 mm delikli numuneler arasından cam prepreg malzemeye 30° oryantasyon verilerek elde edilen N09 AS30 plakasında meydana gelmiştir. Buna sebep olarak malzemenin diki dokunmasından etkilenerek bağlanma yüzeyinin çekme yönünde azalmasından kaynaklanmıştır. Çekme testlerinin sonuçlarından anlaşılacağı üzere kompozit numuneler arasındaki tabakaların dizilimi, hacimsel yoğunluk, prepreglerin oryantasyonu, matris ve takviye malzemesinin bağlanması ile birlikte farklı malzemelerden elde edilmeleri sonuçları etkilenmektedir. Bununla birlikte; numunelerin farklı oryantasyon açılarıyla dizilimleri test sonuçlarını doğrudan etkilemektedir. Bu sebeple maksimum ve minimum değerler arasındaki en büyük fark asimetrik dizilim plakalar arasında bulunmaktadır.

3.3. Yorulma Testi (Fatigue Test)

Plakalı kompozit malzemelere yapılan testler sonucunda meydana gelen elyaf kırılması, matris çatlaması, tabaka ayrılması, elyaf-matris ara yüzey ayrılması gibi hasar tipleri başlangıçta hızlı bir şekilde meydana gelmiştir. Kompozit plakalarda yorulma hasarları üç aşamada meydana gelmiştir. İlk aşamada genel bir şekilde matris çatlaklarından kaynaklı hasarlar meydana gelmiştir. İkinci aşamada elyaf matris ara yüzey ayrılması, tabakalar arası ayrılma gibi birçok hasar tipi görülmektedir. Hasarın ilerlemesi bu aşamada ilk aşamaya göre çok yavaştır. Son aşamada ise hasar hızlı bir şekilde ilerler ve parça kırılır [19].



Şekil 4. Simetrik, asimetrik, rastgele dizilimli kompozit plakaların çekme dayanımı grafiği (Tensile strength graph of symmetrical, asymmetrical, randomly arrangement composite plates)



Şekil 5. Simetrik, asimetrik, rastgele dizilimli plakaların uzama eğrisi (Extension curve of symmetrical, asymmetrical, randomly arranged)

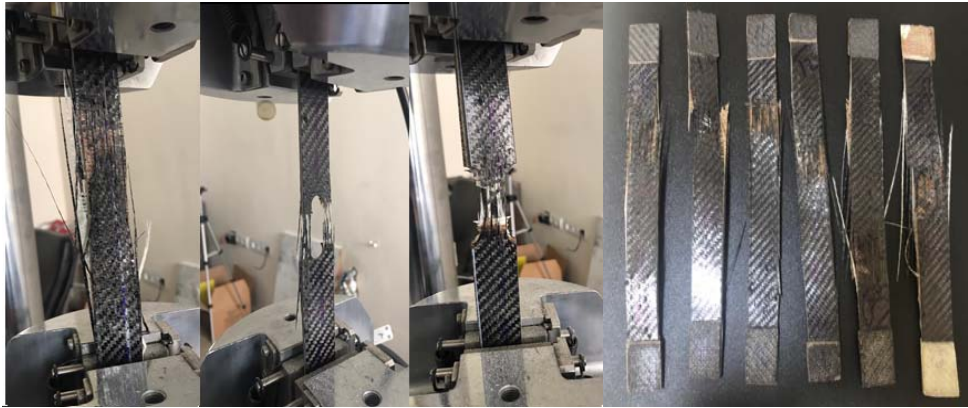
Simetrik, asimetrik ve rastgele dizilimli kompozit plakalardan elde edilen çekme testleri verilerinin değerleri göz önüne alındığında; yorulma testleri için düz çubuk numuneler için maksimum çekme dayanımı 100 MPa, tam ortasında Ø10 mm delikli numuneler için maksimum çekme dayanımı 85 MPa, her iki yanının ortasında Ø10 mm çaplı yarım daire delikli numuneler için maksimum çekme dayanımı 99 MPa, yük oranı $R=0,10$ (minimum yükün; maksimum yüke oranı) ve 10 Hz çevrim frekansında aynı takviye ve matris malzemesine sahip, fakat dizilim ve oryantasyonları farklı katman sayıları aynı bulunan 18 numune yorulma testine tabi tutulmuştur. Her numune için en düşük çekme kuvvetinin gerçekleştiği değer taban kabul edilerek yorulma yükleri, yükün %90'ı seçilmiş ve %10 azaltılarak; maksimum gerilme, statik hasar yükünün %90, %80, %70, %60 ve %50'si oranlarında yükleme yapılmıştır. Bu sayede numunelerin aynı oranda yüklenmesi sağlanmıştır.

Ayrıca; her bir numune çeşidi simetrik, asimetrik ve rasgele gruplandırılmasının yanında yorulma deneyleri için her numunenin çekme deneyi sonucunda elde edilen maksimum gerilmesi ayrı ayrı belirlenerek işlem yapılmıştır. Bu sayede de gerilme-çevrim sayısı grafikleri (S-N eğrileri) net bir şekilde ortaya çıkmıştır. Yorulma testleri sonucunda kompozit plakalar üzerinde meydana gelen hasarlanmalar Şekil 6'da görüldüğü üzere dış yüzeyden iç yüzeye doğru ve numunelerin pabuç kısımlarına yakın yerlerde delaminasyon yaparak ortaya çıkmıştır.

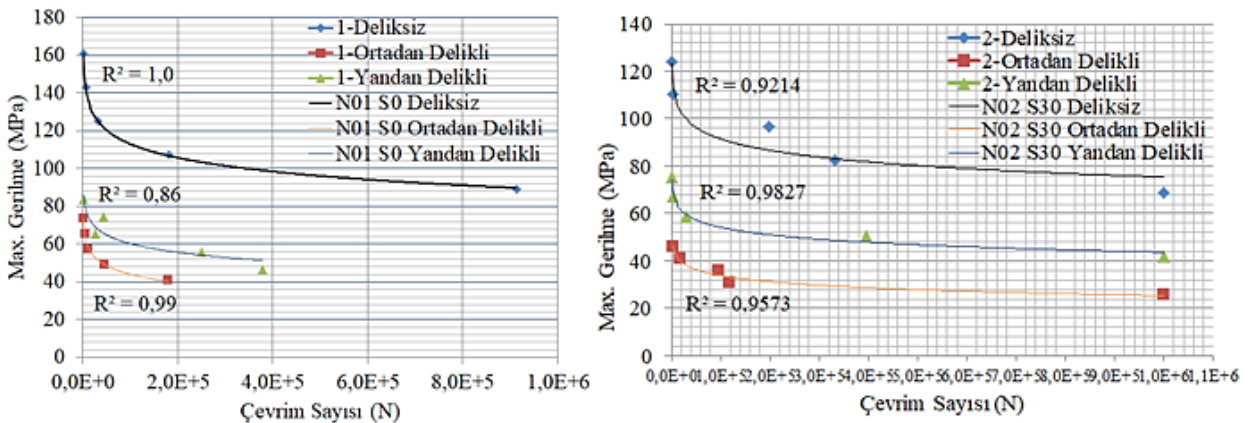
Simetrik dizilimli kompozit plakalı malzemeler için Şekil 7-Şekil 10'de Wöhler eğrileri çizilmiştir.

Simetrik dizilimli N01 S0 kompozit plakalı malzemenin yorulma davranışı incelendiğinde; dokuma kumaş takviyesine oryantasyon verilmeden meydana getirilmesi matris ve takviye malzemesi arasındaki kimyasal bağların tutunmasını arttırmıştır. Bu sayede simetrik numuneler arasında maksimum gerilme bu numune elde edilmiştir. Bunun en önemli etken faktörlerinden biri de jüt ve cam prepreg malzemelere göre karbon prepreg daha rijittir. Ortadan delikli numune ile orta kenarlarından yarım dairesel delikli numune kıyaslandığında ortadan delikli numune üzerinde elyaf kırılmaları, küçük çatlaklar ve deformasyonlar meydana geldiğinden malzemenin tokluğunun azalmasına ve tabaka ayrılması, lif kopmaları spesifik enerji sönmülmesine etki ettiğinden ana gövdesine ortadan delik açılan numunenin yorulma ömrünün diğer numunelere göre daha fazla azalmasına sebebiyet vermiştir.

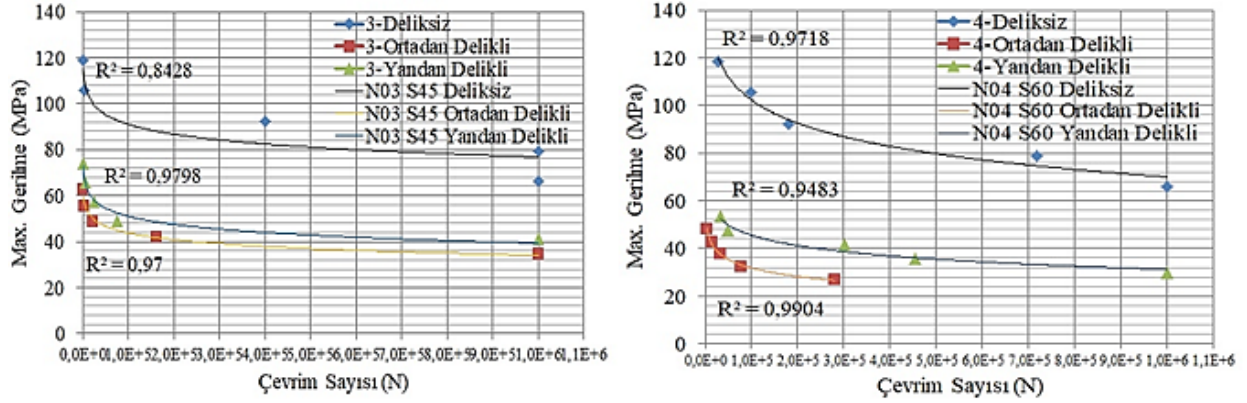
Simetrik dizilimli N02 S30 kompozit plakalı malzemenin yorulma davranışı incelendiğinde; matris ve takviye malzemesi arasında hava kabarcıklarının bulunmaması ve kimyasal bağların iyi tutunmasına rağmen plakanın ara tabakasında yer alan cam dokuma kumaşa 30^0 açı verilmesi matris tutunmasını azaltmıştır. Kumaş özelliği göz önünde bulundurulduğunda cam kumaşın dokumasından kaynaklı açının 30^0 verilmesi yorulma ömründe düşüşlerin yaşanacağı elde edilen verilerde görülmektedir. Ortadan delik açılarak geometrik şekil verilen numune üzerinde elyaf kopmaları, kırılmaları, deformasyonlar meydana geldiğinden ve ayrıca 30^0 açı dokuma kumaşa deney esnasında ipliklerin matris malzemesinden daha kolay çözümlerine, bu da kompozit numune kopmalara ve delaminasyonların meydana gelmesine sebep olmaktadır.



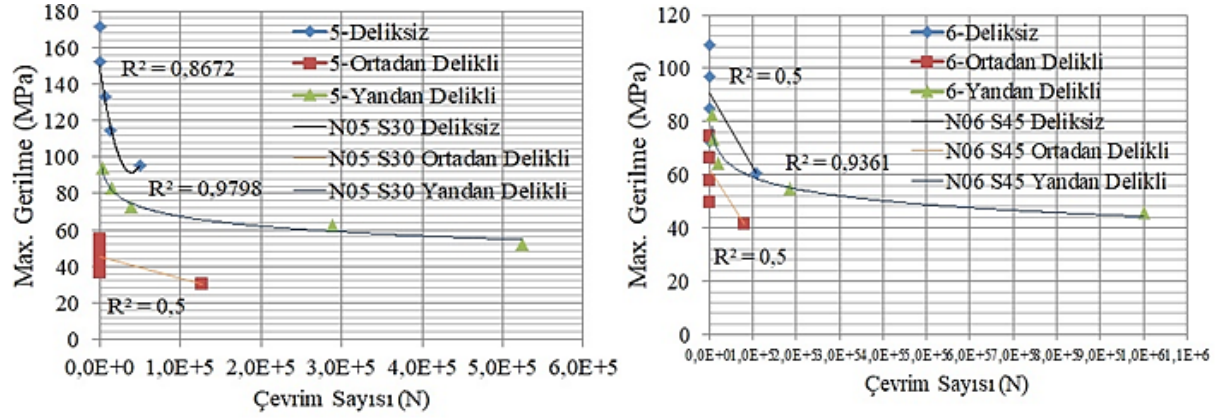
Şekil 6. Plakaların yorulma dayanımı testi sonucundaki şekil değişimleri (Deformations of plates as a result of fatigue strength test)



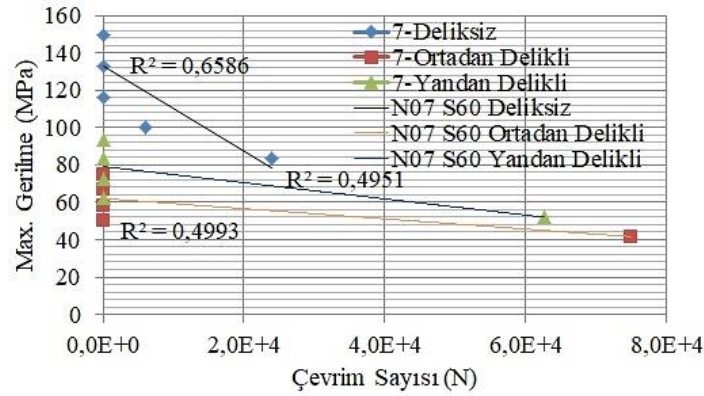
Şekil 7. N01 S0-N02 S30 Kompozit plakalı numunenin gerilme-çevrim sayısı (N01 S0-N02 S30 Stress-cycle number graph of composite plate sample)



Şekil 8. N03 S45-N04 S60 Kompozit plakalı numunenin gerilme-çevrim sayısı (N03 S45-N04 S60 Stress-cycle number of composite plate sample)



Şekil 9. N05 S30-N06 S45 Kompozit plakalı numunenin gerilme-çevrim sayısı (N05 S30-N06 S45 Stress-cycle number graph of composite plate sample)



Şekil 10. N07 S60 Kompozit plakalı numunenin gerilme-çevrim sayısı (N07 S60 Stress-cycle number graph of composite plate sample)

Simetrik dizimli N03 S45 kompozit plakalı malzemenin yorulma davranışı incelendiğinde; cam dokuma kumaş takviyesine 45° açı verilmesinden ve dimi örgüsü ile dokunan cam kumaşın dokuma yönünün açısı 45° verilmesinden 90° oryantasyon açısına sahip numunelerden elde edilen en yakın veriler elde edilmiştir. Kimyasal bağlarının iyi tutunmasına rağmen plakanın ara tabakasında yer alan cam dokuma kumaşa 45° açı verilmesi dokumanın sağladığı tutunmayı azaltmıştır. Bununla birlikte ortadan delikli numune ile orta kenarlarından yarım dairesel delikli numune kıyaslandığında ortadan delik açılarak geometrik şekil verilen numune üzerinde dimi örgüsü

çeşidinden ve ayrıca suni oryantasyon verilmesi sebebiyle; elyaf koptmaları ve ardışık lif kırılmaları çok daha hızlı meydana geldiğinden ortadan delikli numunelerde daha hızlı hasar meydana gelmiştir.

Simetrik dizimli N04 S60 kompozit plakalı malzemenin yorulma davranışı incelendiğinde; plakanın ara tabakasında yer alan cam dokuma kumaş takviyesine 60° açı verilmiştir. Simetrik dizimli numuneler arasında cam dokuma kumaş takviyesine açı verilen numuneler arasında en az çevrim sayısına ve gerilme değerlerine

sahiptir. Bunun en büyük etken faktörü 60⁰lik oryantasyonun lif çekilmelerine ve ardışık lif kırılmalarına sebebiyet vermesidir. Bu nedenle de numune üzerinde daha hızlı deformasyon meydana gelmiştir.

Simetrik dizimli N05 S30 kompozit plakalı malzemenin yorulma davranışı incelendiğinde; jüt dokuma kumaş takviyesine 30⁰ açı verilmesiyle birlikte, jüt dokuma kumaşın bir dolu bir boş örgü ile dokunmasından kaynaklı ve jüt kumaşın dış tabakadan bir önceki tabakada bulunması, kimyasal bağlarının iyi tutunmasına rağmen, kompozit plakanın ara tabakasında bulunan cam lifi takviyeli plakaya da açı uygulanması sebebiyle yorulma değerlerini etkilemiştir. Bu sebeple; düz numuneler ile ortadan delikli numuneler arasında çevrim alınmayan numunelere sebebiyet vermiştir. Ortadan delikli plakada demet halinde lif kırılmaları meydana geldiğinden orta kenarlarından yarım dairesel delikli plakaya göre; bu plakada daha hızlı kopmalar meydana gelmiştir.

Simetrik dizimli N06 S45 kompozit plakasının yorulma davranışını; jüt prepreglere 45⁰ açı verilmesi düz numuneler ile ortadan delikli numunelerde çevrim alınmayan numunelerle karşılaştırılmıştır. Jüt prepreg dış tabakaya yakın yerleştirilmesi ve bezayağı örgü çehidi ile dokunmuş jüt prepreg kompozitin bu plakada açısının artırılması yorulma ömründe düşüşlere sebebiyet vermiştir.

Simetrik dizimli N07 S60 kompozit plakalı malzemenin; jüt dokuma kumaş takviyesine 60⁰ açı verilmesi jüt kumaşın dış tabakadan bir önceki tabakaya yerleştirilmesi sebebiyle yorulma ömründe düşüşler ve düz numuneler ile ortadan delikli numuneler arasında çevrim

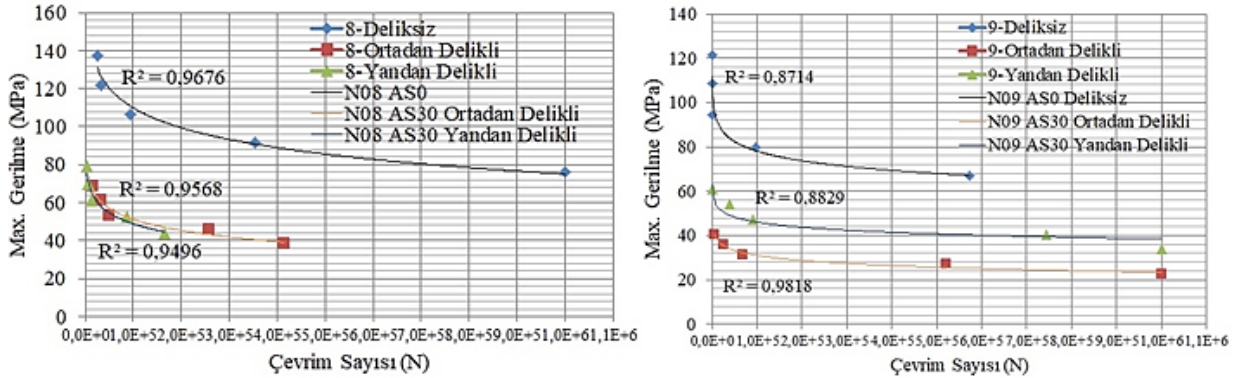
alınmayan numunelere sebebiyet vermiştir. Jüt dokuma kumaşa 60⁰ verilen açı yorulma değerlerinde düşüş meydana getirmiştir.

Asimetrik dizimli kompozit plakalı malzemeler için; Şekil 11-Şekil 14’de grafik üzerinde S-N eğrileri çizilmiştir.

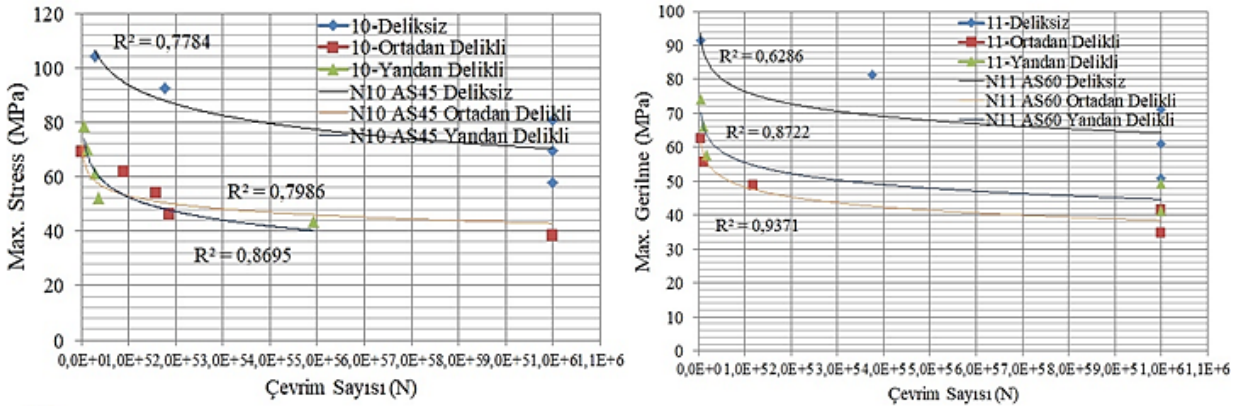
Asimetrik dizimli N08 AS0 kompozit plakalı malzemenin yorulma davranışı incelendiğinde; jüt, cam ve karbon dokuma kumaş takviyesine oryantasyon verilmeden ve asimetrik bir dizim ile karbon-jüt-cam-karbon-jüt-cam sıralaması ile meydana getirilmesi sebebiyle jüt ve cam prepreg hasar gördükten sonra numune üzerinde çatlaklar, delaminasyon ve deformasyonlar meydana gelmiştir. Bu sebeple kimyasal bağlarının iyi tutunmasına rağmen burada hava boşluklarına ve küçük gözeneklere rastlanmıştır.

Asimetrik dizimli N09 AS30 kompozit plakalı malzemenin yorulma davranışı incelendiğinde; cam dokuma kumaş takviyesine 30⁰ açı verilmesi ve jüt kumaşın dış tabakadan bir önceki tabakaya yerleştirilmesi sebebiyle açı verilen prepreg malzemenin liflerinin daha hızlı aşındığı tespit edilmiştir.

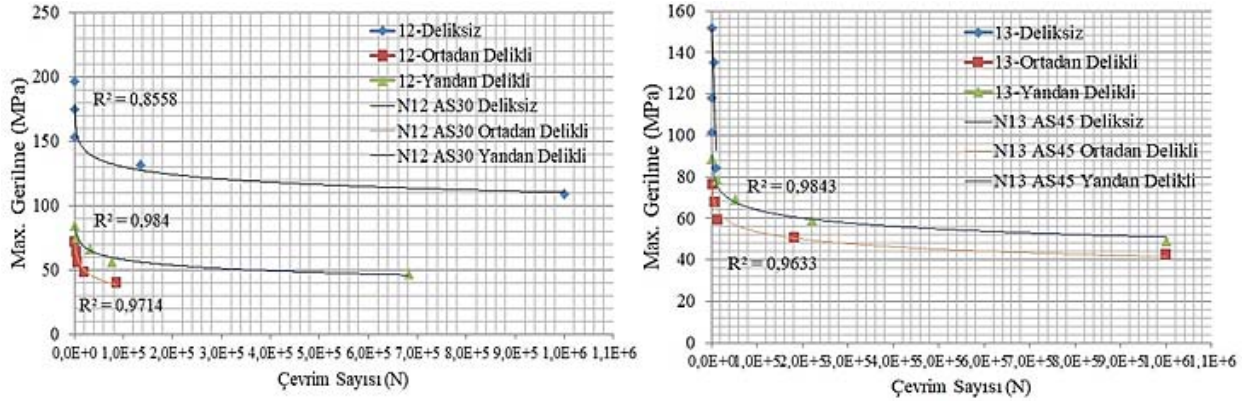
Asimetrik dizimli N10 AS45 kompozit plakalı malzemenin yorulma davranışı incelendiğinde; cam dokuma kumaş takviyesine 45⁰ açı verilmesi ve dimi dokumanın 45⁰ suni açı sağlanması sebebiyle; açı uygulanmamış numuneler gibi davranış sergilemektedir. Üzerinde süreksizlik meydana getirilen bu numunelerde; lif kırılmaları, lif kopmaları, farklı noktalardan kırılan liflere sebebiyet vermiştir. Asimetrik dizimli N11 AS60 kompozit plakalı malzemenin yorulma davranışı incelendiğinde; cam dokuma kumaş takviyesine 60⁰ açı



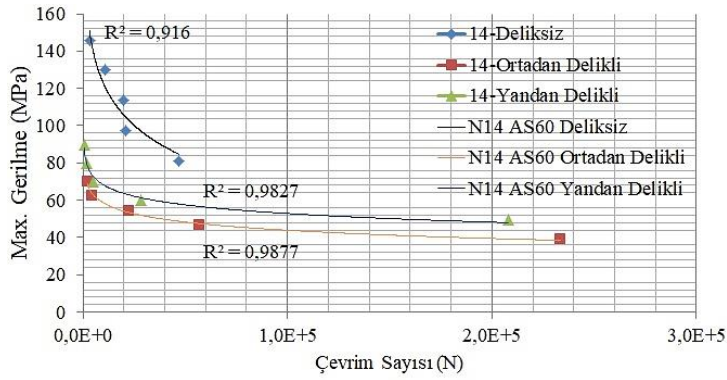
Şekil 11. N08 AS0-N09 AS30 Kompozit plakalı numunenin gerilme-çevrim sayısı (N08 AS0-N09 AS30 Stress-cycle number of composite plate specimen)



Şekil 12. N10 AS45-N11 AS60 Kompozit plakalı numunenin gerilme-çevrim sayısı (N10 AS45-N11 AS60 Stress-cycle number of composite plate specimen)



Şekil 13. N12 AS30-N13 AS45 Kompozit plakalı numunenin gerilme-çevrim sayısı (N12 AS30-N13 AS45 Stress-cycle number of composite plate specimen)



Şekil 14. N14 AS60 Kompozit plakalı numunenin gerilme-çevrim sayısı (N14 AS60 Stress-cycle number of composite plate specimen)

verilmesi takviye ve matris malzemesi arasındaki bağların zayıflamasına, açılı verilen kumaşın liflerinin arayüz lif ayrılmalarına ve meydana gelen çatlakların hızlı ilerlemesine sebebiyet vermiştir.

Asimetrik dizilimli N12 AS30 kompozit plakalı malzemenin yorulma davranışı incelendiğinde; jüt kumaşın dış tabakadan bir önceki tabakaya yerleştirilmesi, jüt dokuma kumaş takviyesine 30° açı verilmesi sebebiyle; asimetrik numuneler arasında en yüksek çevrim sayısına düz numunelerden meydana gelmiştir.

Asimetrik dizilimli N13 AS45 kompozit plakalı malzemede jüt tabakanın dış tabakadan bir önceki tabakaya yerleştirilmesi, jüt dokuma kumaş takviyesine 45° açı verilmesi sebebiyle ve bezayağı dokumanın verdiği boşluklu doku sebebiyle özellikle düz çubuk kompozit numunelerde hava boşlukları, içi boş çukurlar meydana getirmiştir.

Asimetrik dizilimli N14 AS60 kompozit plakalı malzemenin yorulma davranışı incelendiğinde; jüt dokuma kumaş takviyesine 60° açı verilmesi ve dizilimin de etkisi ile birlikte; lifler arasında kırılmalara, bu da çatlak açılmalarına ve farklı noktalardan lif kırılmalarına sebebiyet vermiştir. Bu numunede verilen gerilme değerlerine göre; orta kenarlarından yarım dairesel delikli ve ortadan delikli numuneler arasında birbirine yakın çevrim sayıları elde edilmiştir.

Rastgele dizilimli kompozit plakalı malzemeler için Şekil 15, Şekil 16'de grafiği üzerinde S-N eğrileri çizilmiştir.

Rastgele dizilimli N15 R0 kompozit plakalı malzemenin yorulma davranışı incelendiğinde; karbon-jüt-cam-karbon-cam-jüt dizilimi ile karbon lifli prepreg malzemenin dış ve orta tabakaya, doğal

elyaflardan elde edilen jüt kumaşın alt ve üstten bir önceki tabakaya yerleştirilmesi, plakalara açılı verilmemesi sebebiyle düz numuneler arasında hava boşlukları meydana gelmesinden ve yüzeye çıkmış cam liflerinin kolay kırılması sebebiyle çevrim sayıları çok düşüktür.

Rastgele dizilimli N16 R0 kompozit plakalı malzemenin yorulma davranışı incelendiğinde; cam-jüt-karbon-jüt-karbon-cam dizilimi ile madensel esaslı cam lifli prepreg malzemenin dış tabakaya yerleştirilmesi ve dokuma kumaş takviyelerine açılı verilmesi sebebiyle düz, ortadan delikli ve orta kenarlarından yarım dairesel delikli numuneler arasında çok yakın çevrim değerleri elde edilmiştir.

Rastgele dizilimli N17 R0 kompozit plakalı malzemenin yorulma davranışı incelendiğinde; karbon-cam-jüt-cam-jüt-karbon dizilimi sebebiyle matris hava boşlukları meydana gelmiştir. Tabaka yüzeyine çıkmaya çalışan cam liflerinin farklı noktalardan kırılması sebebiyle rastgele dizilimli numuneler arasında yakın çevrim sayıları elde edilememiştir.

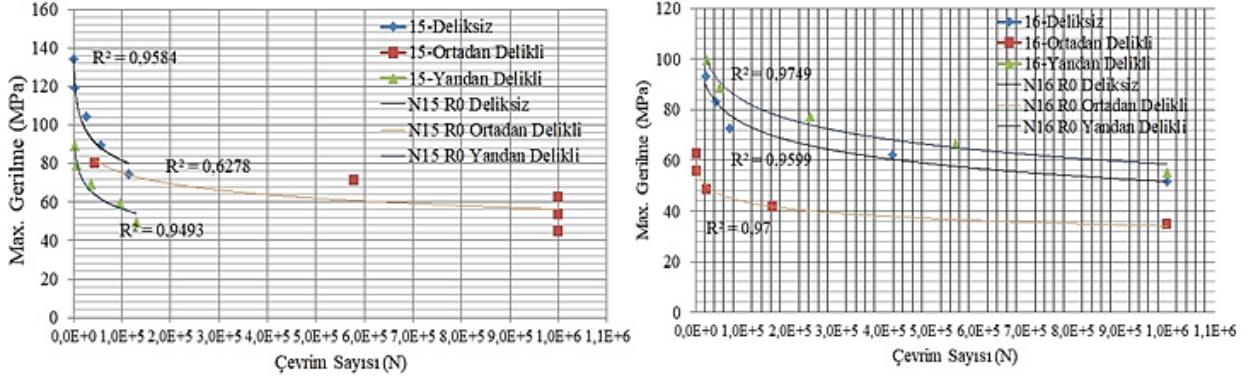
Rastgele dizilimli N18 R0 kompozit plakalı malzemenin yorulma davranışı incelendiğinde; cam-karbon-jüt-jüt-cam-karbon dizilimi ile jüt lifli prepreg malzemenin tam ortada yer alması dokuma çeşidinin verdiği boşluklu yapı sebebiyle küçük ve büyük çökmelere, hava boşluklarının meydana geldiği tespit edilmiştir. Düz numunelere verilen gerilme değerlerine göre ortadan ve orta kenarlarından yarım dairesel delikli numuneler daha iyi bir performans sergilemiştir.

3.4. SEM Görüntülerinin İncelenmesi (Examination of SEM Images)

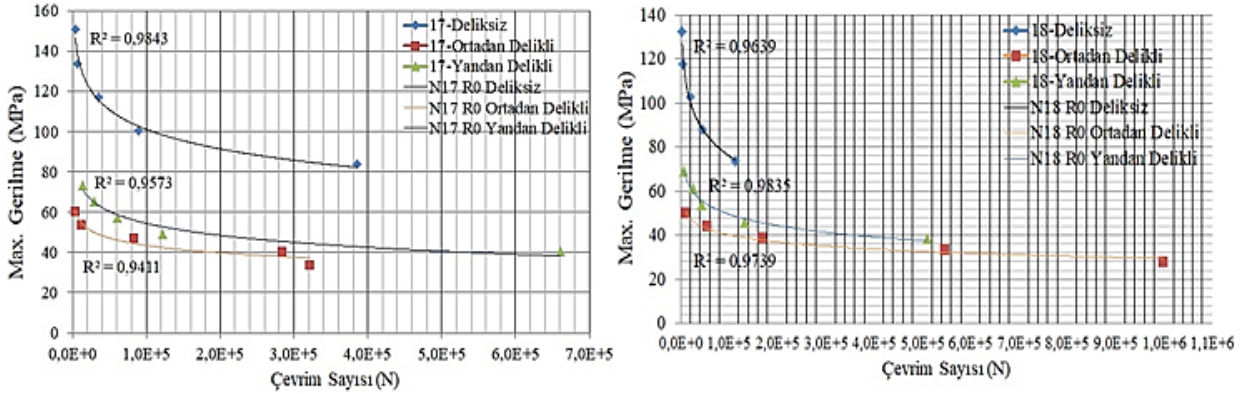
SEM görüntüleme analizleri ile kompozit plakaların hem genel kompozit yapısını karakterize edilebilecek şekilde numune ve kesit

görüntüleri hem de mekanik testler sonrası hasarlı kısımlarının görüntülemesi yapılmıştır. Kompozit plaka numunelerinin SEM görüntülemesi için Zeuss Evo LS 10 marka elektron mikroskobu 45x-2500x büyütme oranlarında, 20 kV'lık gerilme altında düşük vakumda inceleme yapılarak görüntüler elde edilmiştir. Kompozit plakaların morfolojik yapıları ortaya konulmuştur. İletkenlik özelliği bulunmayan numuneler için Agar Supetter Coater kaplama cihazı ile görüntü alınabilecek seviyede istenen kaplama kalınlığında altın/paladyum (Au/Pd) ile kaplanmaları; Trakya Üniversitesi Teknoloji Araştırma ve Geliştirme Uygulama ve Araştırma Merkezi

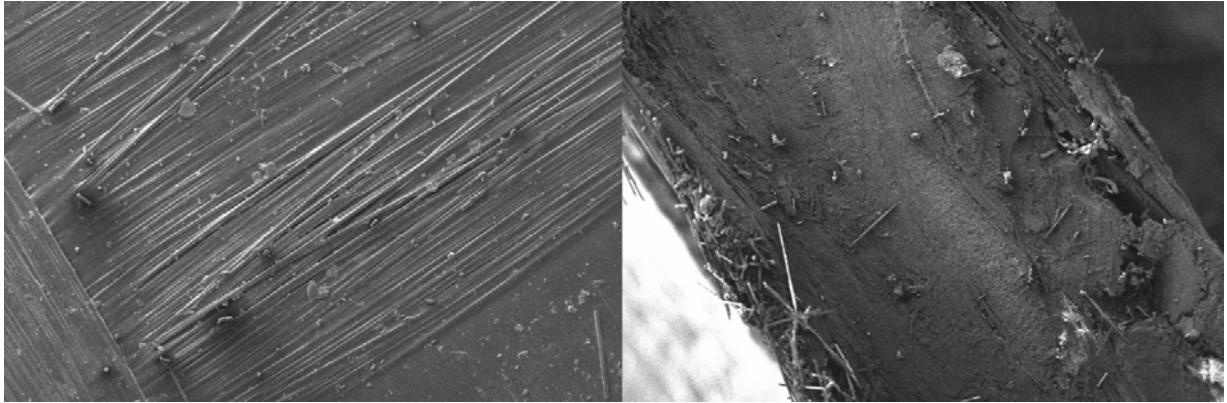
Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Simetrik dizilime sahip N01 S0 numunesinin; 200x büyütme altında dış yüzey SEM görüntüsü Şekil 17a'da verilmiştir. 200x büyütme ile karbon prepeg yüzeyi lif demeti çözüğü yönünde ve atkı yönünde net bir şekilde görülmektedir. 100x büyütme altında enine kesit SEM görüntüsü Şekil 17b'de verilmiştir. 100x büyütme ile numune üzerindeki büyük çukurlar, büyük gözenekler, tanecikler lif kalıntıları ve lif kırılmaları görülmektedir. Elyaf matris arasındaki bağların iyi tutunabilmesi için matris malzemesinin iyi dağılması ve daha rijit özellik gösterilmesi kompozit plakalı malzemelerden yüksek oranda çevrim sayısı elde edilmiştir.



Şekil 15. N15 R0-N16 R0 Kompozit plakalı numunenin gerilme-çevrim sayısı (N15 R0-N16 R0 Stress-cycle number graph of composite plate sample)



Şekil 16. N17 R0-N18 R0 Kompozit plakalı numunenin gerilme-çevrim sayısı (N17 R0-N18 R0 Stress-cycle number graph of composite plate sample)



(a)

(b)

Şekil 17. Simetrik dizimli N01 S0 numunesinin; (a)200x büyütme altında dış yüzey, (b)100x büyütme altında enine kesit (Symmetrically arrangement N01 S0 sample; (a)Outer surface with 200x magnification, (b)cross section with 100x magnification)

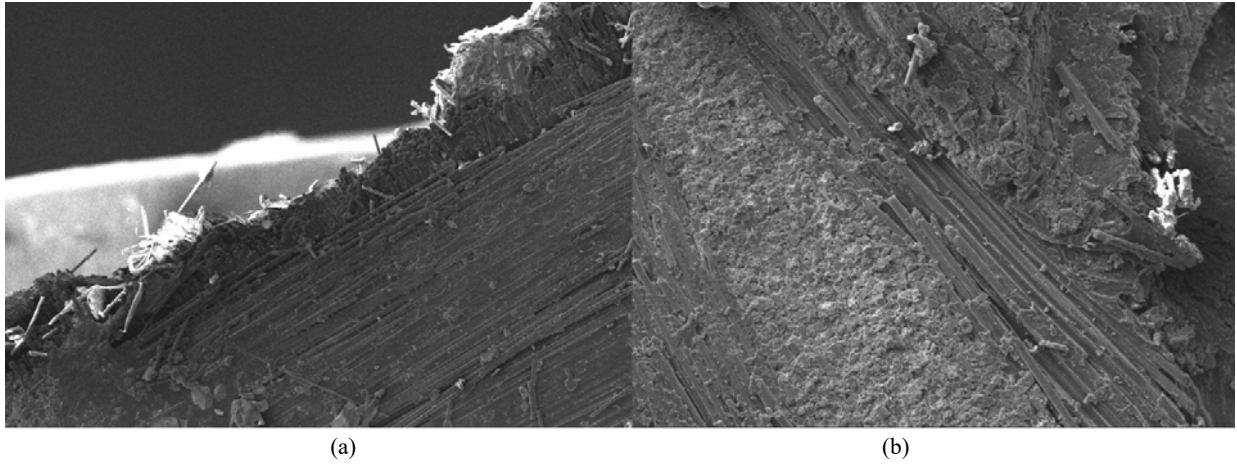
Numunelerin çevrim sayılarındaki değişimler ise prepreg malzemelere uygulanan farklı oryantasyon açılarından, dizilim farklılıklarından, kompozit malzeme üzerinde meydana gelen hasarlardan kaynaklanmaktadır.

Simetrik dizilime sahip N01 S0 numunesinin; 200x büyütme altında enine kesit SEM görüntüsü Şekil 18a'da verilmiştir. Enine kesit yüzeyi, 200x büyütme ile numune üzerindeki lif doğrultuları, matris malzeme kalıntıları, lif kırılmaları görülmektedir. 500x büyütme altında enine kesit SEM görüntüsü Şekil 18b'de verilmiştir. 500x büyütme ile numune üzerindeki matris kalıntıları, bir lifin kısmen aşınması, lif çekilmesi, ardışık lif kırılması, elyaf ayrılması görülmektedir.

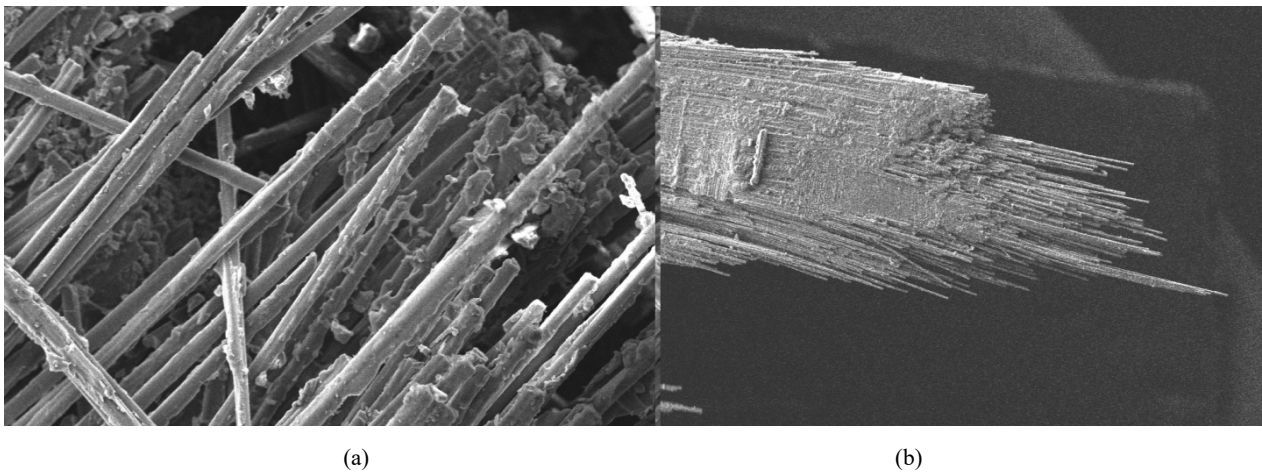
Simetrik dizilime sahip N01 S0 numunesinin; 1000x büyütme altında dış yüzey ve alt katmanların SEM görüntüsü Şekil 19a'da verilmiştir. Dış yüzey ve alt katmanların yüzeyi, 1000x büyütme ile numune üzerindeki lif hataları, lif kırılmaları, hava boşlukları sebebiyle yapışma gelişmiş lifler görülmektedir. Hasarlı prepreg kompozit numunenin lifler arasındaki farklı noktalardaki kopmaların SEM görüntüsü Şekil 19b'de verilmiştir. 131x büyütme ile numune üzerindeki lif çekilmeleri, küçük arayüz ayrılması, demet halinde lif kırılmaları, kırılma yüzeyi, lif çekilmeleri, arayüz lif açılmaları net bir şekilde görülmektedir.

Asimetrik dizilime sahip N08 AS0 numunesinin 250x büyütme altında prepreg kompozit numunenin dış yüzeyinin farklı noktalarındaki kopmalarının SEM görüntüsü Şekil 20a'da verilmiştir. Kompozit yüzey üzerinde aşınma yönü, içi boş çukurlar, pul ve tanecikler, hava boşlukları ile birlikte karbon lifleri net bir şekilde görülmektedir. 2500x büyütme altında prepreg kompozit numunenin dış yüzeyinin farklı noktalarındaki kopmalarının SEM görüntüsü Şekil 20b'de verilmiştir. Kompozit yüzey üzerinde lif kırıkları, matris kalıntısı, makro ve mikro matris kalıntıları, çatlak açılmaları görülmektedir. Bu sebeplerle; çevrim sayısı arttıkça kompozit plakalı malzemeler üzerinde tahribatlar, kopmalar, parçalanmalar ve gözle görülür seviyede delaminasyonlar meydana gelmiştir. Delaminasyonun meydana gelmesinin sebepleri arasında da matris malzemesinin prepreg malzemeye tam ve yeterli emdirilmemesi ve uygulanan basıncın delaminasyonun başlangıç noktasında yeterli uygulanmaması gösterilebilir. Anlaşılacağı üzere elle yatırma yönteminde dikkat edilmesi gereken en önemli parametre liflerin matris malzemesini geçirgenliğidir. Wöhler eğrilerine göre de çevrim sayısı arttıkça eğimlerinde azalış meydana gelmiştir.

Asimetrik dizilime sahip N08 AS0 nolu prepreg kompozit numunesinin enine kesit ve dış yüzey SEM görüntüleri incelendiğinde ham numunenin hasarsız yüzeyi üzerinde aşınma yönü, içi boş çukurlar, pul ve tanecikler, hava boşlukları net bir şekilde



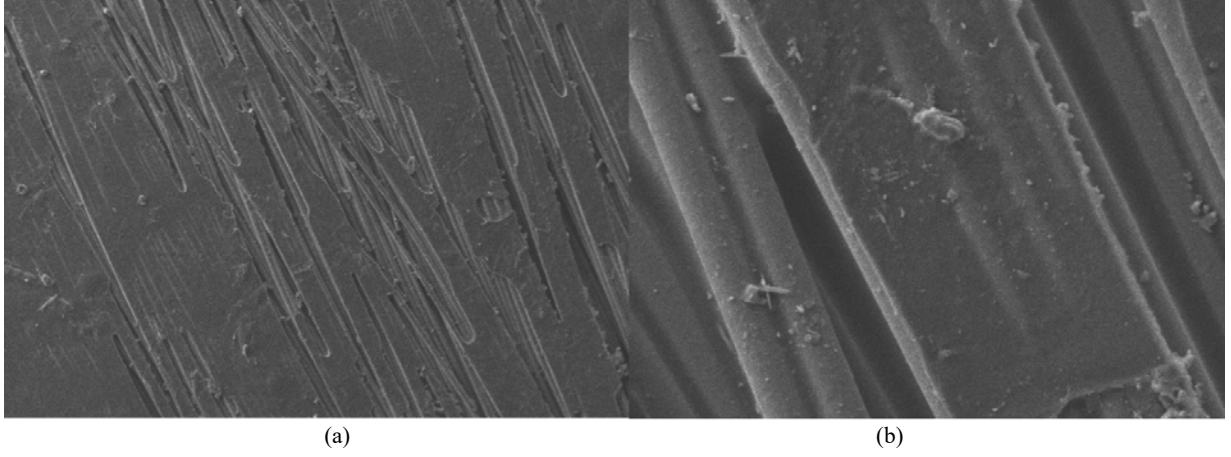
Şekil 18. Simetrik N01 S0 numunesinin;(a)200x büyütme altında enine kesit SEM görüntüsü, (b) 500x büyütme altında hasarlı kesit (Symmetrically N01 S0 sample; (a) Cross-sectional SEM image under 200x magnification, (b) Damaged section under 500x magnification)



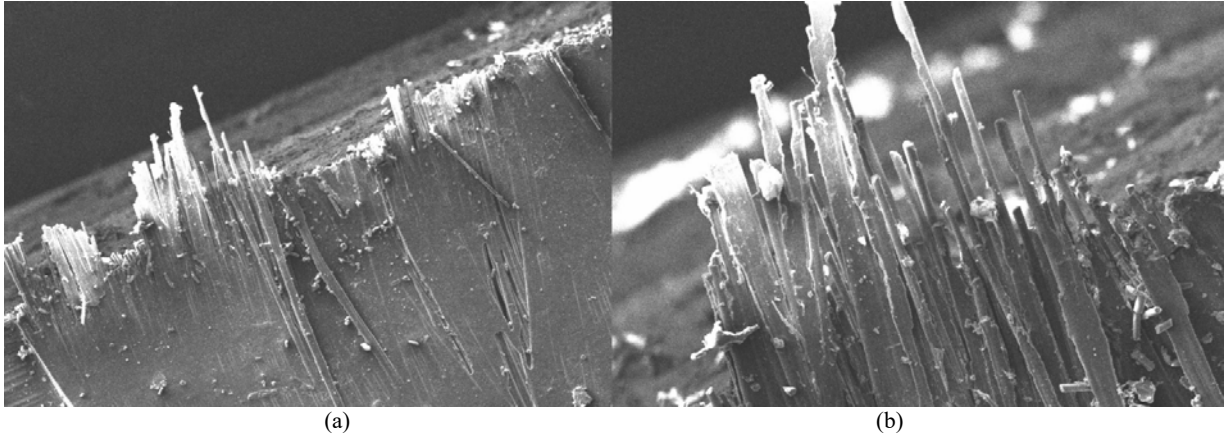
Şekil 19. Simetrik N01 S0 numunesinin; (a)1000x büyütme altında alt katmanların, (b) 131x büyütme altında hasarlı kesit (Symmetrically N01 S0 sample; (a) sublayers under 1000x magnification, (b)damaged section under 131x magnification)

gözenmiştir. Şekil 21a'da 173x büyütme altında prepreg kompozit numunenin dış kenar SEM görüntüsünde; lif kırılmaları, matris boşlukları, makro ve mikro matris kalıntıları ile enine kesilmiş kesit görülmektedir. Şekil 21b'de 500x büyütme ile dış kenarının su jeti kesimi sonucu farklı noktalardan kırılan karbon liflerinin SEM görüntüsü görülmektedir.

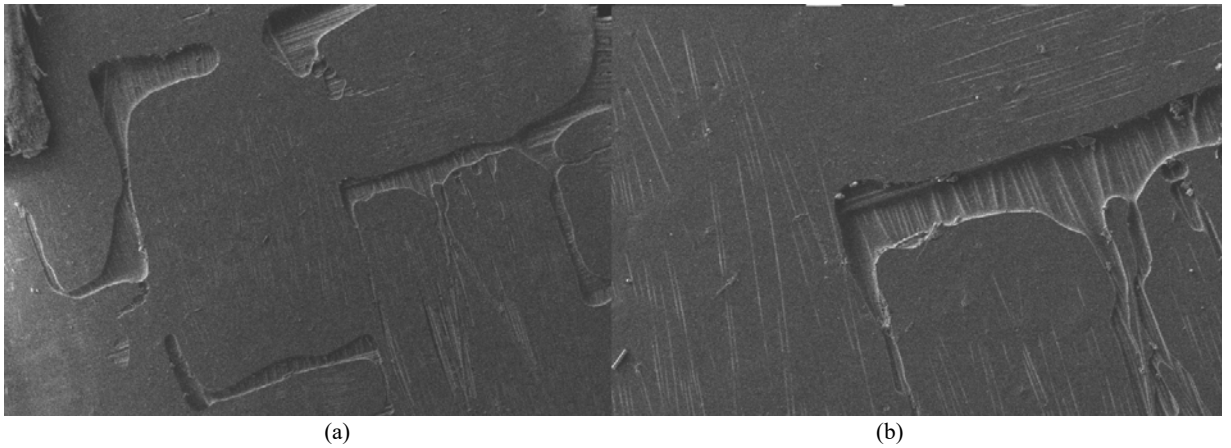
Rastgele dizilime sahip N16 R0 nolu numunesinin; 65x büyütme altında prepreg kompozit numunenin dış kenar SEM görüntüsü Şekil 22a'da kompozit yüzey üzerinde matris hava boşlukları net bir biçimde görülmektedir. 300x büyütme altında prepreg kompozit numunenin dış yüzey takviye matris birleşimi SEM görüntüsü Şekil 22b'de yüzeye çıkmış cam lifleri, cam fiber kırığı, jüt lifleri, matris



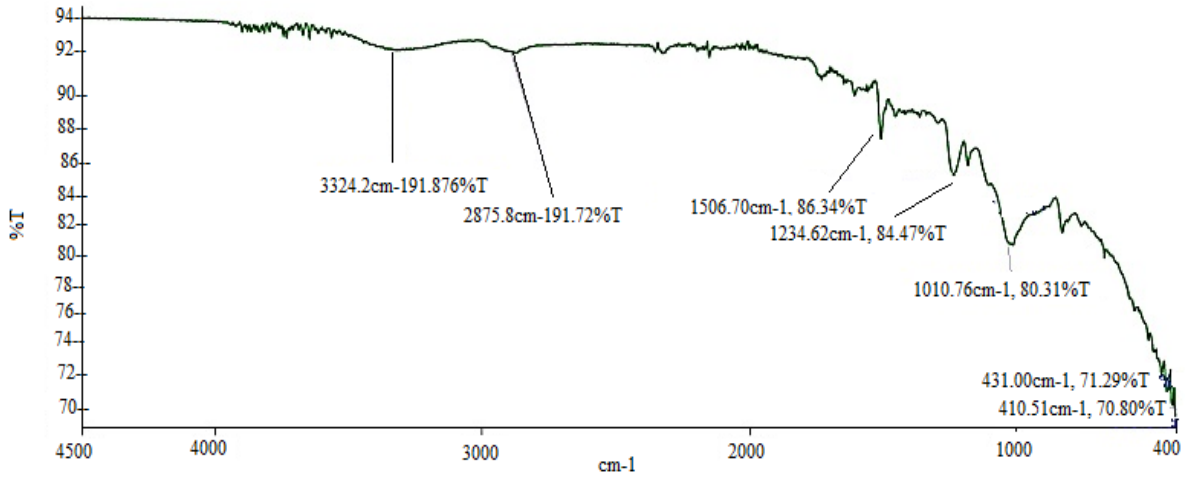
Şekil 20. Asimetrik dizimli N08 AS0 nolu numunenin; (a)250x büyütme ile dış yüzeyi, (b)2500x ile dış yüzey görüntüsü (Asymmetrically arrangement sample N08 AS0; (a) Its outer surface with 250x magnification, (b) Exterior view with 2500x)



Şekil 21. Asimetrik dizimli N08 AS0 nolu prepreg kompozit numunenin; (a) 173x büyütme ile dış kenar, (b) 500x büyütme ile dış kenarının su jeti kesimi sonucu farklı noktalardan kırılan karbon liflerinin SEM görüntüsü (Asymmetrically arrangement prepreg composite sample N08 AS0; (a) Outer edge with 173x magnification, (b) SEM image of carbon fibers broken at different points as a result of waterjet cutting of the outer edge with 500x magnification)



Şekil 22. Rastgele dizimli N16 R0 nolu numunenin; (a)65x büyütme ile dış yüzey. (b)300x büyütme ile dış yüzey görüntüsü



Şekil 23. FTIR spektrometre analizi grafiği (FTIR spectrometer analysis graph)

hava boşlukları görülmektedir. SEM görüntülerinden tespit edildiği üzere jüt, karbon ve cam prepreg malzemelerden elde edilen kompozit plakaların katmanları arasında herhangi bir farklılık bulunmadan bağlanmanın sağlandığı görülmektedir. Belirli kısımlarda meydana gelen, üretim aşaması, kesim aşaması gibi süreçlerden kaynaklı kısmi hatalar mevcuttur. Karbon prepreg malzemenin dış tabakada, cam ve jüt prepreg malzemelerin iç tabakalarda bulunması ile gerçekleştirilen katman dizilimi; yüzeyler arasında bağlanmayı arttırmaktadır. Aynı zamanda jüt lifinin diğer liflerdeki gibi epoksi matris malzemesi ile çok iyi bir bağlanma sağladı görüntülenmiştir.

3.5. FTIR Analizi (FTIR Analysis)

3400-2800 cm^{-1} aralığında; 3324,4 cm^{-1} dalga sayısında 3350-3310 cm^{-1} orta kısımda; N-H gerilmesine ait bandı; maddenin sekonder amin yani alifatik-aromatik (karışık) aminden meydana geldiğini belirlemektedir. 2875,8 cm^{-1} dalga sayısında 3000-2840 cm^{-1} orta kısımda; C-H gerilmesine ait bandı; maddenin alkan diğer bir deyişle parafin yani sadece (C) ve (H) elementlerinin bulunduğu ve bu elementlerin birbirleriyle tekli bağ yaptığı organik bileşiklerin bulunduğunu belirlemektedir. Doymuş hidrokarbonlardan meydana gelen alkanlar, $\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$, $n=1,2,3$, genel formülüne sahiptir. Burada "n" 3 veya 3'ten büyük bulunması halinde sikloalkan denilen halkalı yapılar meydana gelebilmektedir.

FTIR spektrometre analizi grafiği Şekil 23'te verildiği üzere; 1510-1000 cm^{-1} aralığında; 1506,7 cm^{-1} dalga sayısında maksimum 1550 cm^{-1} şiddetli kısımda; N – O gerilmesine ait bandı; maddenin nitro bileşiği yani bir veya daha fazla nitro fonksiyonel grubu ($-\text{NO}_2$) içeren organik bileşiklerden meydana geldiğini belirlemektedir. 1234,62 cm^{-1} dalga sayısında 1250 – 1020 cm^{-1} orta kısımda; C-N gerilmesine ait bandı; maddenin amin yani alifatik-aromatik (karışık) aminden meydana geldiğini belirlemektedir. 1275-1200 şiddetli kısımda; C-O gerilmesine ait bandı; maddenin alkil aril eter organik bileşiklerden meydana geldiğini belirlemektedir.

4. Sonuçlar (Conclusions)

Bu çalışmada üretimi gerçekleştirilen jüt takviyeli kompozit plakalı malzemeler; fiber karbon, cam ve jüt elyafların işlenmesi ve dokunması ile elde edilmiş prepreg malzemelerin birleşmesiyle üç farklı dizilimli, altı katmanlı ve oryantasyonları farklı 250 x 250 mm boyutlarında kare kesitli plakalardan deney standartlarında elde edilen boyutlardaki numuneler ile çekme, yorulma testleri, SEM görüntüleme ve FTIR analizleri gerçekleştirilmiştir.

Çalışmada kompozit malzemelerin meydana getirilmesinde kullanılan karbon, cam ve jüt prepreg malzemelere uygulanan oryantasyon ve tabakalardaki dizilim farklılıkları sebebiyle; kompozit numunelere uygulanan mekanik testler sonucunda elde edilen veriler özellikle çekme ve yorulma dayanımı farklılıklarını ortaya koymuştur. Kompozit plakalı malzemelere uygulanan mekanik testler ve incelemeler sonucunda; düz çubuk numuneler arasında en yüksek gerilme dayanımına sahip malzeme asimetric dizilimli, jüt takviyesine 30° açı verilen N12 AS30 plakasında meydana gelmiştir. Yüksek mukavemetli cam ve karbon liflerinden meydana getirilmiş prepreg malzemelerin kullanılması ve jüt prepreg ile iyi bağlanma özellikleri sergilenmesi sayesinde sağlanmıştır. Düz çubuk numuneleri arasındaki en düşük gerilme dayanımı ise asimetric dizilimli, cam takviyesine 60° açı uygulanan N11 AS60 cam takviyeli plakada meydana gelmiştir. Bunun sebebi katmanlar arasında bağlanma özelliklerinin 60° açıda azalması ve dış katmanlardan birinin cam malzemeden meydana gelmesidir.

Ortadan delikli kompozit plakalar arasında en yüksek gerilme dayanımına sahip malzeme; rastgele dizilimli, cam prepreg malzemelerin dış yüzeyinde ve sırası ile jüt ve karbon dizilimine sahip N16 R0 plakasında görülmektedir. Bunun en belirgin sebebi; cam prepreg malzemede elyaf matris arasında meydana gelen bağın kuvvetli olmasından ve özellikle numuneler üzerindeki dairesel kesimlerin parçacık koparmadan, delaminasyona sebep vermeden pürüzsüz kesilmesinden kaynaklanmaktadır. Ortadan delikli numuneleri arasındaki en düşük gerilme dayanımına sahip malzeme; asimetric dizilimli, cam takviyesine 30° açı verilen N09 AS30 plakasıdır. Cam prepreg malzemelere 30° açı verilmesi tabakalar arasında bağlanma özelliklerini etkilemiştir.

Orta kenarlarından yarım dairesel delikli kompozit plakalar arasında en yüksek gerilme dayanımına sahip malzeme rastgele dizilimli N16 R0 numunesidir. Orta kenarlarından yarım dairesel delikli numuneler arasında en düşük gerilme dayanımına sahip malzeme asimetric dizilimli karbon prepreg malzemenin dış yüzlerde ve tam ortada cam prepreg malzemelerin 60° açı verilmesi ile elde edilmiş numunesidir. Bunun en önemli nedenleri arasında cam prepreg malzemelerin üst üste tabakalandırılması ve 60° açı verilmesinden kaynaklı tabakalar arasında bağlanma özelliklerinin bu açı da azalmasından kaynaklanmaktadır.

Yorulma deneyleri neticesinde en yüksek çevrim sayısına sahip numunelerin tespit edilmesi ile birlikte; gerilme-çevrim sayısı (S-N) eğrisi çizilerek numuneler üzerine açılan deliklerin malzemelerin

yorulma davranışlarına etkisi incelenebilmiştir. Oryantasyon ve dizilim farklılıklarının uygulanması yorulma davranışlarını etkilediği görülmektedir. Burada dikkat edilmesi gereken önemli nokta çatlak etkisi ve delaminasyonların çevrim sayısını düşürdüğü saptanmıştır. Yorulma deneyleri neticesinde en yüksek çevrime sahip numunelerin asimetrik dizilimli numuneler arasından çıktığı tespit edilmiştir.

Kompozit plakalı malzemelere uygulanan yorulma deneyleri sonucunda simetrik dizilimli düz çubuk numuneler arasında 68,94 MPa ile N02 S30 kompozit plaka, ortadan delikli numuneler arasında 34,71 MPa ile N03 S45 kompozit plaka, orta kenarlarından yarım dairesel delikli numuneler arasında 45,88 MPa ile N06 S45 kompozit plaka en yüksek yorulma dayanımına sahiptir. Asimetrik dizilimli düz çubuk numuneler arasında 109,2 MPa ile N12 AS30 kompozit plaka, ortadan delikli numuneler arasında 42,34 MPa ile N13 AS45 kompozit plaka, orta kenarlarından yarım dairesel delikli numuneler arasında 49,49 MPa ile N11 AS60 kompozit plaka en yüksek yorulma dayanımına sahiptir. Rastgele dizilimli düz çubuk numuneler arasında 76,74 MPa ile N16 R0 kompozit plaka, ortadan delikli numuneler arasında 62,28 MPa ile N15 R0 kompozit plaka, orta kenarlarından yarım dairesel delikli numuneler arasında 55,46 MPa ile N16 R0 kompozit plaka en yüksek yorulma dayanımına sahiptir.

Kompozit plakalı numunelerin oryantasyon açıları 30°, 45°, 60° şeklinde farklı dizilim ve tabakalarda yer alarak verilmiştir. Bu sebeple de kompozit plakalı numunelerin hepsi 18 farklı dizilim ile sıralanmasından kaynaklı testlerde farklılıklar ortaya çıkmıştır. Numunelere uygulanan mekanik testlerin ve görsel analizlerin değerlendirilmesinin bu açılardan farklı açılar ile değerlendirilebilir. Bu sebeple benzeri çalışmaların sadece bu çalışmada kullanılan açı değerleri (30°, 45°, 60°) ile değil, farklı açılar ve farklı katman adetleriyle de yapılması önerilebilir.

Kaynaklar (References)

1. Tepehan, B., Sülü, İ. Y., Miğfer yapıları için oluşturulan tabakalı hibrit kompozit plakanın mekanik analizi. Bayburt Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 5 (1), 69-80, 2022.
2. Yang, H. S., Qiao P., Wolcott, M. P. Flexural fatigue and reliability analysis of wood flour/high-density polyethylene composites, Journal of Reinforced Plastics and Composites, 29 (9), 1295–1310, 2009.
3. Liang S., Gning P.B., Guillaumat L., A comparative study of fatigue behaviour of flax/epoksi and glass/epoksi composites. Composites Science and Technology, 72, 535-543, 2012.
4. Doan, T.T.L., Brodowsky, H., Mäder, E., Jüt elyaf/epoksi kompozitler: yüzey özellikleri ve ara yüzey yapışması. Bileşik Bilim ve Teknoloji, 72 (10), 1160–1166, 2012.
5. Fotouh, A., Wolodko, J. D., Lipsett, M. G., Fatigue of natural fiber thermoplastic composites. Composites Part B: Engineering, 62, 175–182, 2014.
6. Hüner, Ü., Çeşitli elyaflarla takviye edilmiş termoplastik kompozitlerin levha ekstrüzyonunun ve özelliklerinin incelenmesi, Doktora Tezi, Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne, 2014.
7. Graceraj, P.P., Venkatachalam, G., Shankar, A.G., Kumar, K., Investigation on fatigue strength of the jute fiber reinforced hybrid polymer matrix composites. U.P.B. Sci. Bull., Series D, 78 (1), ISSN 1454-2358, 2016.
8. İmak, A., Solmaz, M. Y., Topkaya, T., Tabakalı hibrit kompozit malzemelerin yorulma davranışlarının analizi, El-Cezeri, 3 (3), 2016.
9. Wu, T., Yao, W., Xu, C., Li, P., A natural frequency degradation model for very high cycle fatigue of woven fiber reinforced composite, International Journal of Fatigue, 2019.
10. İlhan, R., Feyzullahoğlu, E., Cam Elyaf Takviyeli Polyester (CTP) Kompozit Malzemelerde Kullanılan Doğal Elyaf ve Dolgu Maddeleri, El-Cezeri Journal of Science and Engineering, 6 (2), 355-381, 2019.
11. Öktem, M. F., Yıldırım, M., Manufacturing Process and Material Characterization of Woven Jute Composites, NÖHÜ Müh. Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci., 9 (1), 546 – 556, 2020.
12. Çetin M.Ş., Demirel A.S., Toprakçı O., Karahan Toprakçı H.A., Fabrication and characterization of conductive, flexible polymer composites from carbonized pistachio shell wastes, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 37 (2), 711-722, 2022.
13. Bulut, M., Özbek, Ö., Bozkurt, Ö. Y., Erklığ, A., Effect of nano clay particle inclusion on axial and lateral buckling characteristics of basalt fiber reinforced composites, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 37 (4), 1985-1996, 2022.
14. Toparlı M.B., Fatigue performance of tungsten carbide cobalt (WC-Co) hardmetal materials after shot peening process, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 38 (1), 269-282, 2023.
15. Çiğdem E., Perçin O., Some physical and mechanical properties of heat-treated, reinforced laminated veneer lumber (LVL) with carbon fiber and glass fiber, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 38 (2), 653-664, 2023.
16. Kaveloğlu S., Temiz Ş., Investigation of low-velocity impact performances of sandwich composites manufactured using 3d printer Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 39 (1), 139-150, 2024.
17. Öztemiz H.M., Temiz Ş., Three-point bending behaviors of the s-core sandwich panel: Finite element modeling and experimental investigation Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 39 (4), 2057-2076, 2024.
18. Er A.O., Aydınlı O.M., Investigation of mechanical and physical properties of PLA and steel-added PLA filament materials used in melted filament manufacturing method, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 39 (2), 1285-1302, 2024.
19. Özkavak H., Dikdörtgen kesitli kompozit malzemeler için eğilme yorulması test cihazının tasarımı ve örnek uygulama, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 2014.
20. ASTM D3039/D3039M-17, Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials.
21. ASTM D3479 Standard test methods for tension-tension fatigue of oriented fiber, resin matrix composites. ASTM standards and literature references for composite materials. ASTM: 1987.
22. ASTM D3479M – 19, Standard test method for tension-tension fatigue of polymer matrix composite materials.
23. ASTM D 5766/D 5766M-02a, Standard test method for open hole tensile strength of polymer matrix composite laminates.