

Polimer Kompozitlerin Üretiminde Elyaf Oryantasyonunun Etkileri

Cemil Çetinkaya^{1*}, Ruşen Sözer²¹Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Ankara, Türkiye²Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Ankara, Türkiye

Öne Çıkanlar

- Karbon elyaf kompozit plakaların oluşumunda, elyaf dizilim açılarının önemi.
- Karbon elyaf kompozit plakaların mekanik birleştirilmesi.
- Karbon elyaf takviyeli kompozit plakaların üretimi.
- Karbon elyaf kompozit plakaların test yöntemleri.

Makale Bilgileri

Geliş: 10.05.2021

Kabul: 31.05.2021

Anahtar Kelimeler

Prepreg, Kompozit, Karbon Elyaf, Otoklav, Reçine

Özet

Bu çalışmada, tek yönlü karbon elyaf malzeme olan reçine emdirilmiş prepreg karbon kumaşlar kullanılmıştır. Prepreg karbon kumaşlardan laminat plaka üretimi için, alüminyum 7075 kalıp malzemeleri kullanılarak ve prepreg karbon elyaf standartlarına göre belirlenen otoklav reçetesi uygulanarak, küreleme işlemi yapılmıştır. Otoklav süreci tamamlanan kompozit plakalar ile 8 kat kumaş kullanılarak 1.9 ± 1 mm kalınlıkta ve yaklaşık %58 lif hacimsel oranına ulaşacak şekilde kompozit karbon elyaf laminatların üretimi gerçekleştirilmiştir. Test işlemleri için 5 adet farklı elyaf dizilimleri içeren kompozit plakaların her birinden 12 adet numune alınmıştır. Toplam olarak 60 numune ASTM D953 standartlarına uygun olarak hazırlanmış ve yine bu standartlara göre test aparatları üretilerek test işlemleri yapılmıştır. Kompozit plakaların içerdikleri elyaf dizilimlerine göre gruplandırılması yapılan numuneler ilk olarak tahribatsız muayeneye tabi tutulmuştur. Tahribatsız muayene işleminde SEM (Taramalı Elektron Mikroskopu) görüntüleri alınan numunelerde serim süreci ve sonrası oluşabilecek hatalar gözlenmiştir. Ayrıca, kompozit malzemelere ASTM D953 standartlarına uygun olarak çekme testi uygulanmış ve dizilim farklılıklarının oluşturduğu grafikler yorumlanmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda elyaf oryantasyonunun istif açılarının değiştirilmesi ile mekanik dayanımın artırılacağı gösterilmiştir.

The Effects of Fiber Orientation on The Mechanical Joining of Polymer Composites

Highlights

- The importance of fiber array angles in the formation of carbon fiber composite plates.
- Mechanical joining of carbon fiber composite plates.
- Production of carbon fiber reinforced composite plates.
- Test methods of carbon fiber composite plates.

Article Info

Received: 10.05.2021

Accepted: 31.05.2021

Keywords

Prepreg, Composite, Carbon Fiber, Autoclave, Resin

Abstract

In this study, resin-impregnated prepreg carbon fabrics that is a unidirectional carbon fiber material, were used. The curing process was completed by using aluminum alloy 7075 mold materials and applying the autoclave prescription determined according to prepreg carbon fiber standards for laminate plate production from prepreg carbon fabrics. The composite plates, whose autoclave process was completed, were used to produce composite carbon fiber laminates by 8 layers of fabric with a thickness of 1.9 ± 1 mm and a fiber volume ratio of approximately 58%. For testing, 12 samples were taken from different composite plates containing 5 different fiber arrays. A total of 60 samples were prepared in accordance with ASTM D953 standards, and in the same way, test apparatus was produced in accordance with ASTM D953 standards and tested. The samples, which were grouped according to the fiber arrays of the composite plates, were first subjected to non-destructive testing and control. SEM (Scanning Electron Microscopy) images of the samples were taken non-destructively, and errors that may occur during and after the laying process were observed. It was subjected to the tensile test destructively in accordance with ASTM D953 standards and the graphics created by the sequence differences were interpreted one by one. As a result, it has been shown that the mechanical strength can be increased by changing the stacking angles of the fiber orientation.



1. GİRİŞ

Kompozit malzeme insanlık tarihi boyunca yapı malzemelerinin kullanıldığı alanlarda insanoğlunun yıllarca problemlerini çözmek amacı ile farklı malzemelerin makro ölçekte bir araya getirilerek problemlerini çözdükleri malzemeler olmuştur [1]. Kompozit malzemeler; benzer veya benzer olmayan en az iki farklı malzemenin belirli bir amaç ile bir araya gelmesi sonucu oluşur. Bir araya gelen bu malzemeler, her bir bileşenin kendi özelliğini yapıda sergilemesiyle yeni bir malzeme ortaya çıkarmaktadır. Kompozit malzemeler genel olarak iki fazdan oluşmaktadır. Birincil faz matriks fazıdır ve bu faz genel olarak düşük dayanıma sahiptir. Kompozit malzeme içerisinde matriks fazı kompozit elemanlarını bir arada tutma, yükü bileşenlere dağıtma ve çevresel etkilerden koruma görevlerini yerine getirmektedir. İkincil faz ise takviye fazıdır. Bu faz genel olarak takviye fazı olarak bilinir ve oluşturulan kompozit malzemeye yüksek dayanım sağlayan fazdır. Kompozit malzeme makro ölçekte bağdaşık özellik gösterse de mikro boyutlarda ayrışık özellikler göstermektedir [2].

Kompozit malzemelerin sınıflandırılması, matriks fazı ve takviye fazı olarak birçok duruma göre sınıflandırılabilir. Kompozit malzemelerin üretiminde termoset polimerler, termoplastik polimerler gibi birçok matriks fazı kullanılabilirken, takviye fazı olarak da karbon elyaf, aramid elyaf veya cam elyaf gibi de birçok takviye fazı kullanılabilir. Yapısal dayanıma en çok ihtiyaç duyulan sektörler olan, otomotiv ve havacılık sektörlerinde genel olarak termoset polimer kompozit malzemeler kullanılmaktadır. Termoset kompozit malzemelerin tercih edilmesinin ikinci büyük nedenlerinden biri ise atmosferik koşullara olan dayanımı ve uygun koşullarda uzun raf ömrüdür. Epoksi matriksler poliester matrikslere göre daha yüksek çalışma sıcaklıklarına sahiptirler (175°C), bu sebeple yüksek seviyede performans gerektiren alanlarda epoksi matriksli kompozitler tercih edilmektedir [3]. Bu çalışmada, epoksi matriks içerisinde karbon elyaf takviye edilmiş prepregler kullanılarak kompozit malzemelerin üretimi gerçekleştirilmiştir. Kompozit malzemelerin mekanik olarak birleştirilmesinde mukavemetin araştırılması amaçlanmaktadır. Literatürde bu konu üzerine yapılmış bazı çalışmalar incelenmiş ve gerekli değerlendirmeler aşağıda verilmiştir.

Camanho ve Lambert [4], kompozit laminantlarda mekanik olarak bağlanmış laminantların hasar başlangıcı, hasar ilerlemesi ve hasar sonunun değerlendirildiği bir araştırma yapmışlardır. Bu çalışmada, her bir katmandaki gerilim dağılımı, yarı analitik ve sayısal yöntemler kullanılarak analiz edilmiştir. Tahminler, pim ve civata yüklü bağlantılarda elde edilen deneysel veriler ile karşılaştırılmış ve elde edilen sonuçların tahminlerle paralel olarak ilerlediği gözlemlenmiştir. Wang, Lotts ve Davis [5], bağlantı mukavemetini arttırmak amacıyla, bağlantılarda kullanılan civata şeklinin dairesel bir civata yerine eliptik geometride bir civata olarak tasarlanmasının uygulanabilirliğini araştırmışlardır. Analitik yöntem ile tahmin edilebilen delik kenarlarındaki gerilmelerin sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak oluşturulan analiz sonuçları ile de uyum gösterdiğini bulmuşlardır. Yapılan çalışmada, farklı dairesel ve eliptik bağlantılar içeren numuneler için testler yapılmış ve civata şeklinin önemli ölçüde mukavemeti değiştirdiği gözlemlenmiştir. Ayrıca, eliptik civata bağlantısının dairesel civata bağlantısına göre kesme yönünde daha fazla mukavemet gösterdiği kanıtlanmıştır. Xiao ve Ishikawa'nın [6], yapmış olduğu çalışmada ise, mekanik olarak birleştirilmiş kompozit parçanın mukavemetinin ve reçine özelliklerinin yatak tepkisi üzerindeki etkisini değerlendirmek amaçlanmıştır. Bu çalışmada, iki farklı tipte polimer matriks bazlı karbon elyaf ile güçlendirilmiş laminantlar üretilmiştir. Statik çekme testi uygulanan numuneler dâhili hasarı ölçmek için X-ışını radyografisi ve SEM analizlerine tabi tutulmuşlardır. Sonuç olarak kullanılan polimer matriksin yoğunluğu ile oluşan hasarın oranının doğru orantılı değiştiğini bulmuşlardır. Zhou ve Fei'nin [7], yaptığı bir diğer çalışmada ise; bir kompozit plakanın yapısal gerilme konsantrasyonunu belirlemek adına üç şekil perçin deliği olan numunelerin sonlu eleman modelleri oluşturulmuştur. Karşılaştırma yapabilmek için optimal dairesel bir şekil, gerilme konsantrasyonunun azaltılmasına bağlı olarak belirlenmiş ve ardından elips şeklindeki deliğin performansını doğrulamak için perçin delikleri içeren kompozit bir plaka ve modelleri oluşturulmuştur. Elips şeklindeki deliklere sahip plakada gerilme konsantrasyonunun dairesel delikli olana göre daha yüksek oranda azaldığı gözlemlenmiştir. Perçin ve civata bağlantı noktaları şiddetli stres nedeniyle yapısal bütünlük açısından elyaf devamlılığını bozduğu için

literatürde hala en zayıf halka olarak bilinmektedir. Perçin deliğinin geometri parametreleri değiştirilerek, perçin bağlantı delikleri etrafındaki yoğunlaşma ve güç değerlerinin değişiminin belirlendiği birçok çalışma yapılmıştır [4-13].

Elyaf takviyeli ve epoksi matrisli kompozit malzemeler için elyaf istif açıları, yapısal dayanım için çok büyük önem arz etmektedir. Elyaf istif yöneliminin doğrultusunda plaka mukavemeti en yüksek iken, 90° aksi yönde ise plaka mukavemetinin en zayıf olduğu yapılan çalışmalarca kanıtlanmıştır [14-23]. Dano, Gendron ve Picard [17], yapmış oldukları çalışmalarda, elyaf takviyeli kompozit malzemelerde tek bir bağlantı noktası olacak şekilde birleştirilmiş plakalarda yayınlanan makaleleri gözden geçirmişlerdir. Elde ettikleri bilgiler ışığında, pim yüklü kompozit laminantların tepkisini tahmin etmek için bir sonlu eleman modeli geliştirmişlerdir. Çalışmanın amacı, doğrusal olmayan bir kesme davranışının tahmini ve yük pimi yer değiştirme eğrisine dahil edilebilirliğini göstermektir. Kurt, Yeşil ve Atlı [24] yaptıkları çalışmada ise polimer matrisli kompozit malzeme parçalarının farklı yöntemlerle birleştirilmesinin ardından birleşme bölgesinin çekme kuvvetine olan etkilerini incelenmişlerdir. Kompozit numune üretiminde elle yatırma sonrası sıcak presleme yöntemini kullanmışlardır. Numuneler tam ortadan ikiye bölünerek farklı yöntemlerle birleştirilmiştir. Birleştirme yöntemi olarak vida ile vidalama, piyasada yaygın olarak bulunabilen az maliyetli bir çift bileşenli yapıştırıcı ile yapıştırma, kompozit malzemenin üretildiği laminasyon reçine ile yapıştırma ve aynı laminasyon reçinenin karbon elyaf tozu ile katkılandırılarak yapıştırılması yöntemlerini kullanmışlardır. Yapıştırılan numuneler çekme testine tâbi tutularak birleşme kuvvetleri karşılaştırılmıştır. Vida ile birleştirilen bölgenin kopma kuvveti en az mukavemet değerini verirken, piyasada yaygın olarak bulunabilen az maliyetli çift bileşenli yapıştırıcı ile yapıştırılan bölgelerin kopma mukavemeti en yüksek değeri vermiştir. Bu değerler sırasıyla 2278,67 Newton (N) ve 12062 Newton (N) olarak bulunmuştur. Yapılan çalışma kapsamında en düşük mukavemet değeri vidalama tekniği ile birleştirilen numunelerde, en yüksek değer ise çift bileşenli yapıştırıcı ile birleştirilen numunelerde gözlenmiştir. Collings ve arkadaşları [25] üç farklı elyaf ve reçine sisteminden yapılan elyaf istif açıları ($0^\circ \pm 45^\circ$), (0° , 90°), ve ($90^\circ \pm 45^\circ$) olan üç grup laminant üzerinde taşıma mukavemeti ölçümlerini yapmışlardır. Bu çalışmada, delik kenarındaki kusurları meydana getiren fiziksel koşullar göz önünde bulundurularak yarı ampirik bir yaklaşım kullanılıp kısıtlı pim yüklü deliklerin nihai yatak dayanımlarını tahmin etmek amacıyla kullanılacak denklemler türetilmiş ve deneysel sonuçlar sunulmuştur. Elde edilen veriler doğrultusunda, kullanılan laminant konfigürasyonlarının, elyaf ve reçine sistemlerinin her biri için teorik verilerle uyumlu sonuçlar tespit edilmiştir. Beauchamp ve arkadaşlarının [26] rulman yatakları için yapmış oldukları çalışmada ise, rulman yatağının sapma davranışını belirlemek için yapılan testlerde elyaf istif açıları (0° 90°), ($0^\circ + 45^\circ$) ve ($90^\circ + 45^\circ$) olan, sabit bir tork değeri ile sıkıştırılmış cıvata laminantların davranışı açıklanmaktadır. Mükemmel eklem gücü özelliklerini sergileyen optimum yatağın ($0^\circ + 45^\circ$) istif açısındaki laminant konfigürasyonunda olduğunu tespit etmişlerdir.

Mevcut çalışma, literatür değerlendirmeleri yapıldıktan sonra var olan çalışmalara yenilikçi bir bakış açısı katacak şekilde karbon elyaf takviyeli epoksi matrisli kompozit yapıların istif açılarının mekaniksel bağlantı mukavemetine olan etkilerini araştırmaktadır. Bu sayede fazladan cıvata bağlantı şeklinin değiştirilmesi ve/veya farklı yapıştırıcı malzeme kullanımı gibi tasarım ve uygulamada sade kullanım sunabilecek malzemelerin üretilmesi hedeflenmektedir. Bu sadeleştirmenin aynı zamanda kompozit malzeme üretimindeki hata payını ve maliyet oranlarını düşüreceği öngörülmektedir.

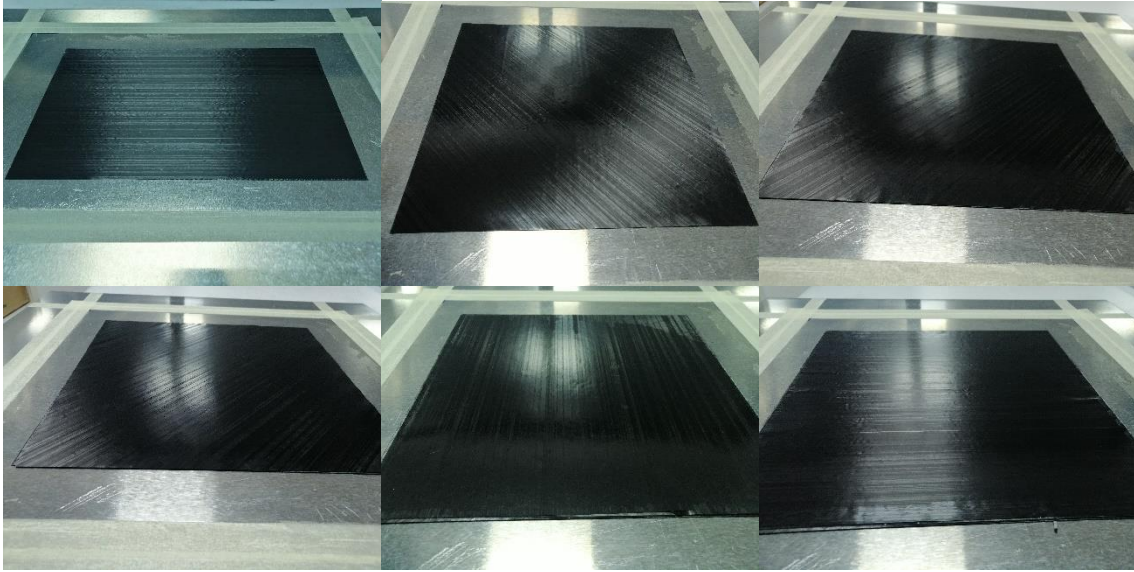
2. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada tek yönlü (UD) elyaf karbon malzeme olan reçine emdirilmiş karbon kumaşlar kullanılmıştır. Kalıp malzemesi olarak seçilen Al 7075 plaka başlangıçta 22 mm olarak temin edilmiş ve taşlama işlemi ile 20 ± 0.005 mm hassasiyetle işlenmiştir. İşlenen kalıp malzemesi polisaj işlemine tabi tutularak yüzey parlaklığı sağlanmıştır. Toplam olarak 5 adet üretimi yapılan kalıplara, her birine daha önce belirlenen açılarda serimler yapılmıştır. Serim açıları derecelendirilerek gruplandırılan numunelerin ihtiva ettikleri dizilim yönleri *Tablo 1*'de gösterilmektedir.

	A GRUBU AÇI DEĞERİ	B GRUBU AÇI DEĞERİ	C GRUBU AÇI DEĞERİ	D GRUBU AÇI DEĞERİ	E GRUBU AÇI DEĞERİ
1. KAT	0	-60	-45	-30	90
2. KAT	90	30	45	60	0
3. KAT	45	75	0	-75	-45
4. KAT	-45	-15	90	15	45
5. KAT	-45	-15	90	15	45
6. KAT	45	75	0	-75	-45
7. KAT	90	30	45	60	0
8. KAT	0	-60	-45	-30	90

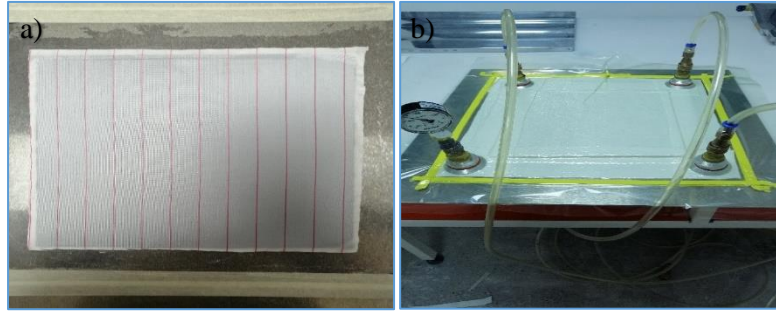
Tablo 1. Değerlendirilen numunelerin açı değerleri

Serim işlemi için KORDSA'dan tedarik edilmiş olan OM10 reçine özelliklerine sahip olan reçine emdirilmiş kumaş soğuk odadan çıkarıldıktan sonra 18 saat oda koşullarında bekletilmiştir. Bekleme işlemi tamamlandıktan sonra hazırlanan metal kalıba kalıp ayırıcıları uygulanarak temiz odaya alınmış ve serim işlemine başlanmıştır. Farklı açı yönelimlerine sahip serim işlemleri aşağıda görülen *Resim 1*'de verilmiştir.



Resim 1. Serim İşlemi

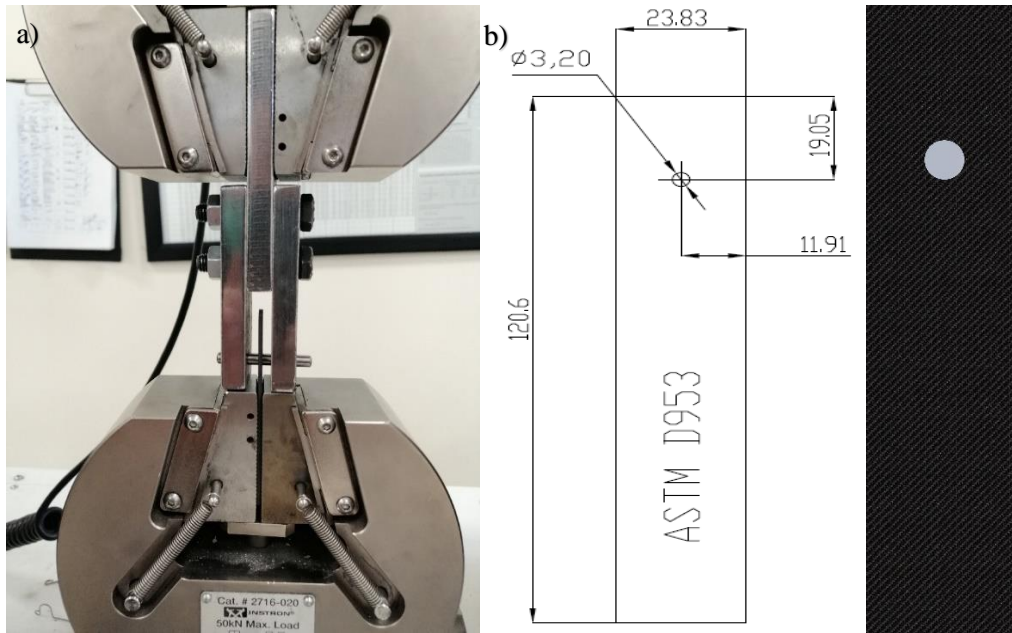
Serim işlemleri tamamlanan kompozit plakalar için, serim işleminin kusursuz olması ve laminantlar arasında hava kabarcıklarının kalmasını önlemek amacıyla her bir lamina seriminden sonra vakum alınmıştır. Serim işlemi tamamlanan kompozit laminant plakalar için, Al 7075 kalıp malzemesinin oluşturduğu pürüzsüz yüzeyin bozulması ve numunelere uygulanacak olan mekanik test işlemlerinin yapılabilmesi için karbon elyaf malzemenin alt yüzeyine ve üst yüzeyine yönü 0° olacak şekilde soyma kumaşı (peel ply) serme işlemleri yapılmıştır. Kompozit laminant plakalara soyma kumaşının uygulandığı görsel *Resim 2 a*'da gösterilmektedir.



Resim 2. a) Soyma kumaşı (peel ply) uygulaması b) Vakum işlemi ve kontrolü

Soyma kumaşının uygulanmasından sonra laminantların vakum işlemine başlanmıştır. Vakum süreci, vakum portları numune köşelerinde olacak şekilde yerleştirilerek gerçekleştirilmiştir. Vakum portunun 4 adet olmasının amacı, numunenin tamamen homojen bir şekilde vakum işlemine tabi olması, numune kalınlığının her bir bölgede eşit olarak dağılması ve hacimsel olarak reçine akışının eşit olmasını sağlamaktır. Vakum işlemi için GAMAK marka motor ve AKAR MAKİNA marka vakum motoru kullanılmıştır. Numune üzerine otoklav süreci boyunca kesintisiz olarak 50 mm bar bir kuvvet uygulanmıştır. Vakum işlemi yapılan bir kompozit laminant *Resim 2 b*'de gösterilmektedir.

Otoklav süreci, kumaş parametrelerine uygun olacak şekilde kür döngüsünde hazırlanmıştır. Belirlenmiş olan bu döngü ile kür işlemi tamamlanan kompozit plakalar yaklaşık %58 lif hacimsel oranına ulaşacak şekilde üretilmişlerdir. Test işlemleri için 5 adet farklı elyaf dizilimleri içeren farklı kompozit plakalar üretilmiş ve her bir kompozit plakadan 12 adet numune alınmıştır. Toplam olarak 60 numune ASTM D953 standartlarına uygun olarak hazırlanmıştır. Numunelerin test edilebilmesi için ASTM D953 standartlarına uygun olarak test aparatının tasarımı ve üretimi sağlanmıştır [27]. Standartlara uygun olarak üretimi yapılan numune ve test aparatı *Resim 3 a*'da gösterilmektedir. Üretilen laminant plakalardan her biri ebat olarak aynı olan 60 adet numune alınmıştır. Alınan bu numunelere ilişkin olarak ölçüsel gösterim *Resim 3 b*'de gösterilmektedir.



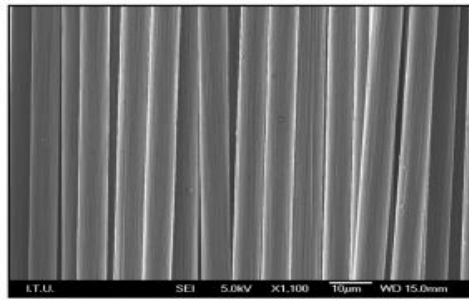
Resim 3. a) Çekme cihazı, test aparatı ve numune b) Numune ve ölçüsel gösterimi

Kompozit plakaların içerdikleri elyaf dizilimlerine göre gruplandırılması yapılan numuneler ilk olarak tahribatsız muayene işlemi olan elektron mikroskobu ile analiz edildi. SEM görüntüleri alınan

numunelerde, serim süreci ve sonrası oluşabilecek porozite ve delaminasyon gözlenmiştir. Ayrıca, ASTM D953 standartlarına uygun olacak şekilde İnstron 3369 Universal test makinesi kullanılarak, hazırlanan numunelere tahribatlı muayene yöntemlerinden biri olan çekme testi yapılmıştır ve dizilim farklılıklarının oluşturduğu çekme grafikleri yorumlanmıştır.

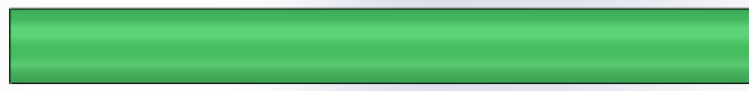
2.1. Açık Değerlerinin SEM ile Değerlendirilmesi

Açık değerlerini analiz ederken bakılması gereken, bakış açısı yönünde karbon elyaf ipliklerin duruş şeklidir. Elyaf ipliğin görünmeyecek şekilde durması, o ipliğin bakış açısına 0° olarak durması anlamındadır. Kesit alanın karşısından bakıldığında ipliklerin eliptik bir biçimde durması, eliptik düzlemin uzunluğu ve elyaf iplik kalınlığına bağlı olarak ipliklerin açısı tespit edilir. Elyaf ipliklerin duruş şekli tam olarak bakış açısının yönünde çubuk şeklinde olması, o ipliğin 90° de bulunması anlamına gelmektedir. Bu durumu daha net anlatabilmek için aşağıda verilen gösterimlerden faydalanılmıştır. *Resim 4'*de elyaf ipliklere ait olan X1100 büyütmede alınmış bir SEM görüntüsü verilmektedir.

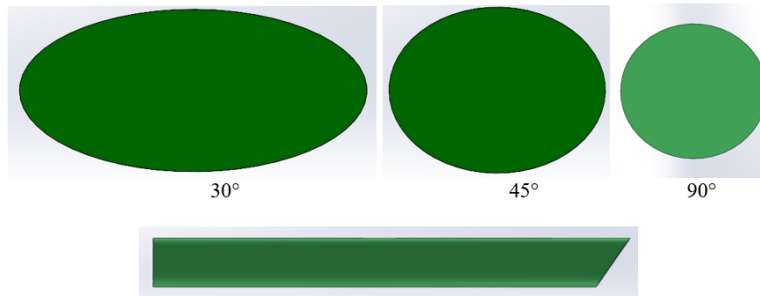


Resim 4. X1100 büyütülmüş karbon elyaf iplik

Resim 5 ve *Resim 6*'da sırasıyla bir elyaf ipliğin ve açılı olarak kesilmiş bir ipliğin sembolik olarak gösterimini temsil etmektedir. 30° açı birimine sahip olan iplik kesitinin eliptik yönde daha uzun olması sahip olduğu açı değerinin küçük olması ile alakalı olarak eliptik uzunluk 45° 'ye göre daha fazladır. Aynı durum 45° için ise eliptik uzunluk daralarak 90° 'ye ulaşıldığında tam bir dairesel kesit görünümüne ulaşılmaktadır.



Resim 5. Elyaf iplik sembolik gösterimi

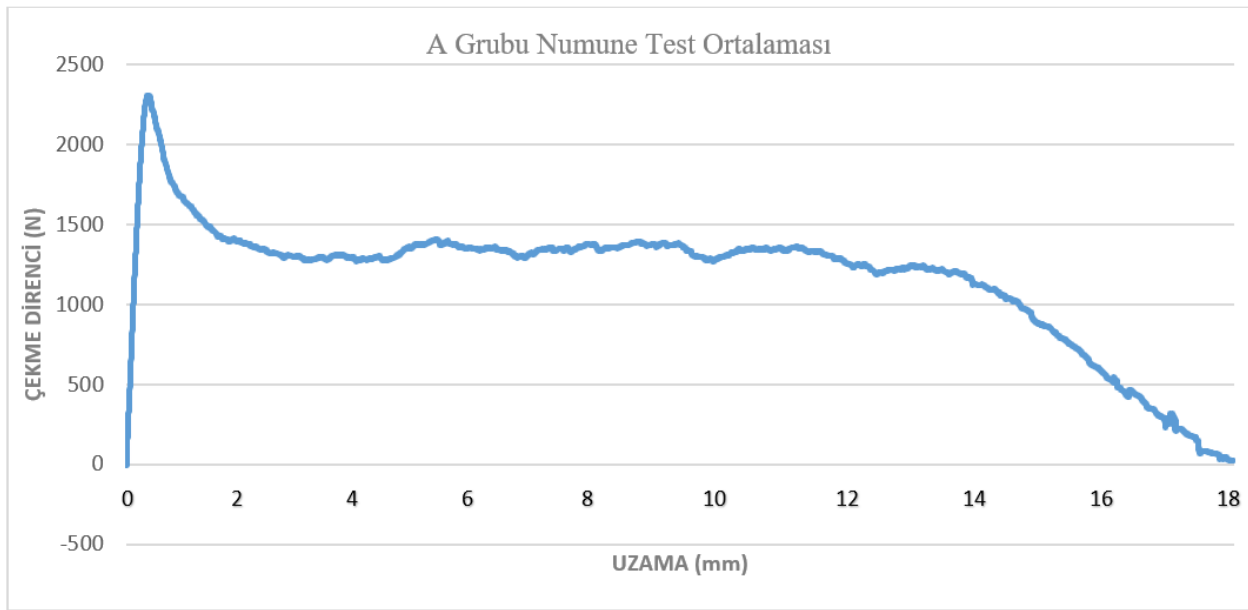


Resim 6. Açılı kesilmiş bir elyaf iplik

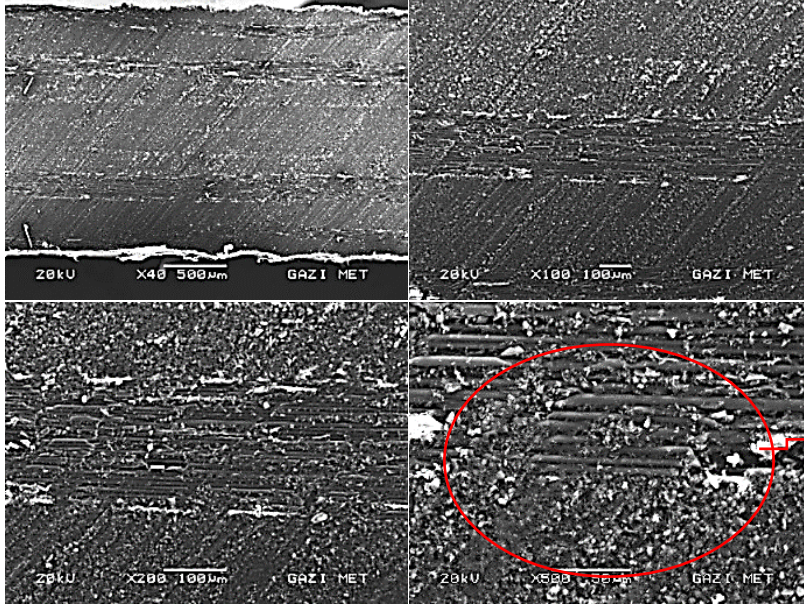
3. BULGULAR

3.1. A Grubu Numune Sonuçları

A grubu test numunelerin sahip oldukları serim açısı değerleri: 0, 90, 45, -45, -45, 45, 90, 0'dır. Bu testler sürecinde öncelikle, kompozit laminant plakalardan alınan 12 adet numunenin her birine ait yük altında uzama davranışları ölçülmüştür. Ardından, genel bir değerlendirme yapabilmek amacıyla yük altındaki uzama davranışlarının ortalaması hesaplanmış ve tek bir grafikte (*Grafik 1*) verilmiştir. Serim açılarına bağlı, A grubu numuneleri ortalama olarak 2334 N'luk çekme mukavemeti sergilemişlerdir. Uzama değerleri ise ortalama olarak 1380 N değerinde seyretmekte ve 18 mm değerinde tamamen kopma gözlenmektedir. Kopma uzamasındaki linear durum ortalama olarak 12,7 mm sürmektedir. Bu aralıkta test edilen numune 1380 N değerinde 12,7 mm değerinde linear bir durum göstermektedir. Grafikten de anlaşılacağı gibi laminant plakanın kopma eğilimi 5,4 mm'den düşük bir mesafede gerçekleşmiştir.



Grafik 1. A Grubu test numuneleri ortalama kuvvet-uzama grafiği



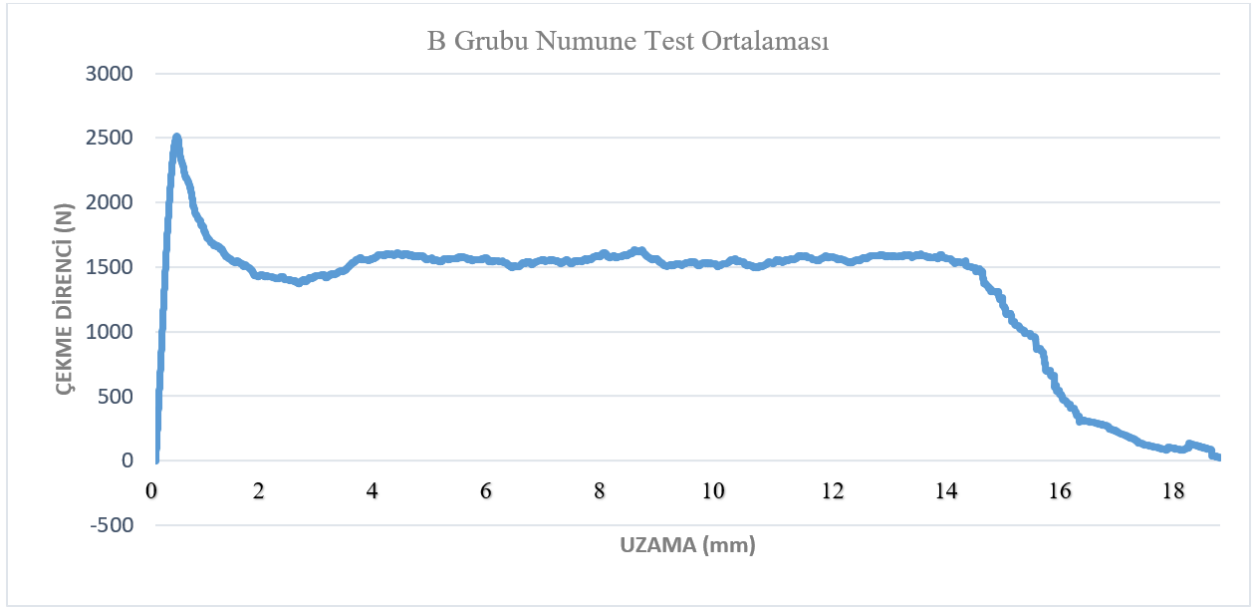
Bakış açısına göre çubuk şeklinde görünmekte olan bu karbon fiber elyaf iplik 90°'lik bir serim açısına sahip olduğu anlamına gelmektedir.

Resim 7. A Grubu numuneye ait farklı büyütmelerde alınmış elektron mikroskobu görüntüleri

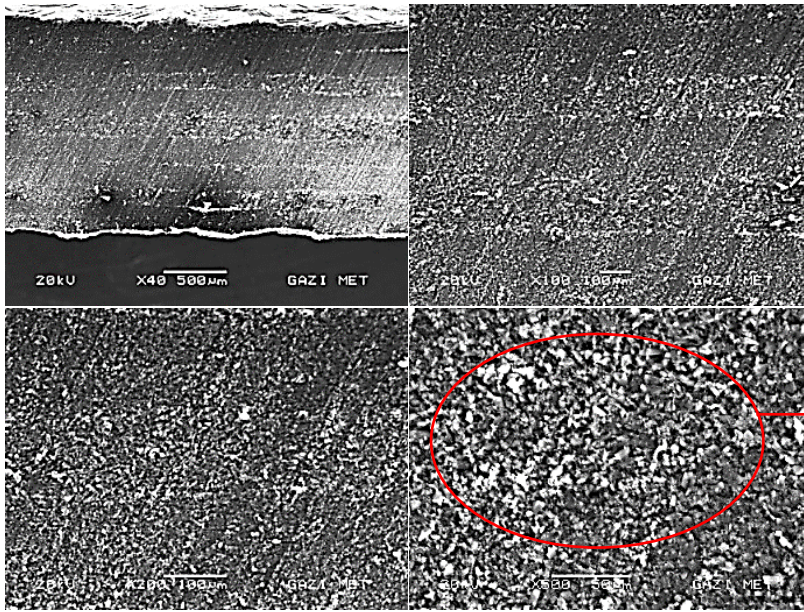
Resim 7'de SEM görüntüsü olan numune için dizilim kusuru ve belirlenen açı değerlerinin doğru olup olmadığı için görüntüler alınmıştır. Değerlendirilen SEM görüntüleri sonucunda, açı değerlerinde yanlışlık ve dizilim kusuru olmadığı anlaşılmıştır.

3.2. B Grubu Numune Sonuçları

B grubu test numunelerin sahip oldukları serim açısı değerleri: -60, 30, 75, -15, -15, 75, 30, -60°'dir. Bu testler sürecinde öncelikle, kompozit laminant plakalardan alınan 12 adet numunenin her birine ait yük altında uzama davranışları ölçülmüştür. Ardından, genel bir değerlendirme yapabilmek amacıyla yük altındaki uzama davranışlarının ortalaması hesaplanmış ve tek bir grafikte (Grafik 2) verilmiştir. Serim açılarına bağlı, B grubu numuneleri ortalama olarak 2512 N'luk çekme mukavemeti sergilemişlerdir. Uzama değerleri ise ortalama olarak 1518 N değerinde seyretmekte ve 18,9 mm değerinde tamamen kopma gözlenmektedir. Kopma uzamasındaki lineer durum ortalama olarak 10,8 mm sürmektedir. Bu aralıkta test edilen numune 1518 N değerinde 10,8 mm değerinde lineer bir durum göstermektedir. Grafikten de anlaşılacağı gibi laminant plakanın kopma eğilimi 6,3 mm'den düşük bir mesafede gerçekleşmiştir.



Grafik 2. B Grubu test numuneleri ortalama kuvvet-uzama grafiği



Bakış açısına göre dairesel ve eliptik duran bu karbon fiber iplikler, eliptik mesafenin uzunluğuna bağlı olarak açı değerleri belirlenir. Örn: Eliptik mesafe ne kadar çok ise içerdiği açı değeri o kadar küçüktür.

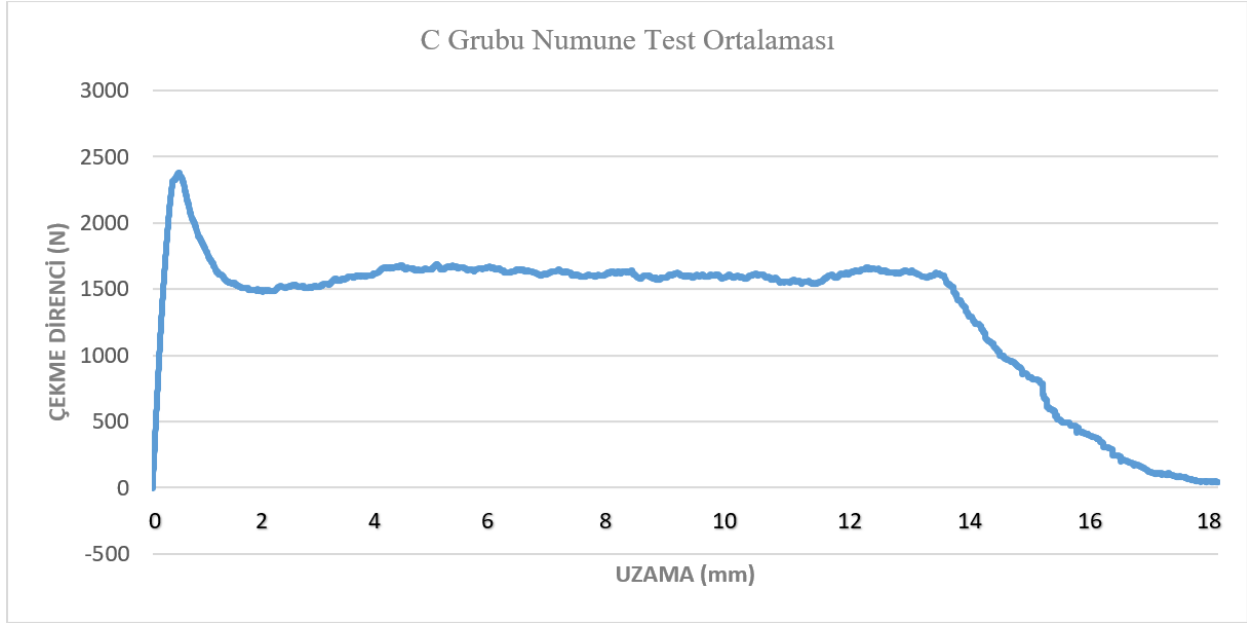
Resim 8. B grubu numuneye ait farklı büyütmede alınmış elektron mikroskobu görüntüleri

Resim 8'de SEM görüntüsü olan numune için dizilim kusuru ve belirlenen açı değerlerinin doğru olup olmadığı için görüntüler alınmıştır. Değerlendirilen SEM görüntüleri sonucunda, açı değerlerinde yanlışlık ve dizilim kusuru olmadığı anlaşılmıştır.

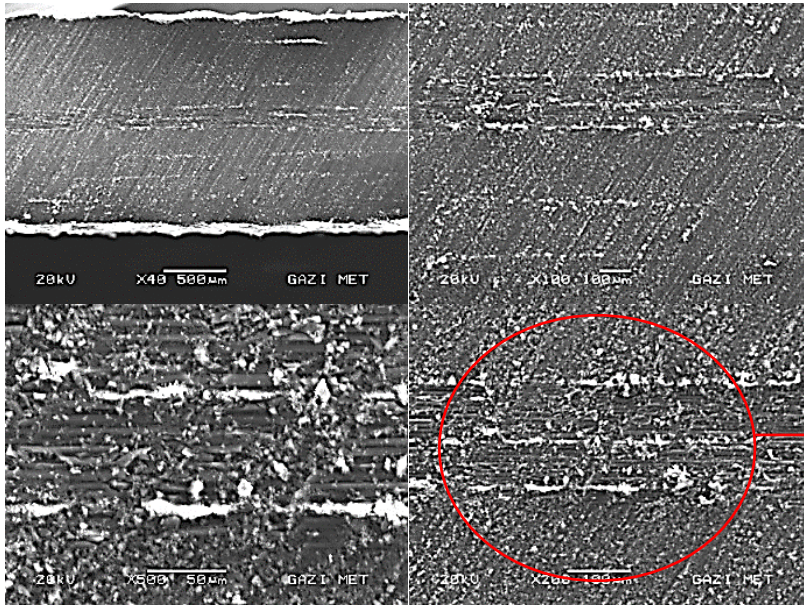
3.3. C Grubu Numune Sonuçları

C grubu test numunelerin sahip oldukları serim açısı değerleri: -45, 45, 0, 90, 90, 0, 45, -45, 'dir. Bu testler sürecinde öncelikle, kompozit laminant plakalardan alınan 12 adet numunenin her birine ait yük altında uzama davranışları ölçülmüştür. Ardından, genel bir değerlendirme yapabilmek amacıyla yük altındaki uzama davranışlarının ortalaması hesaplanmış ve tek bir grafikte (*Grafik 3*) verilmiştir. Serim açlarına bağlı, C grubu numuneleri ortalama olarak 2375 N'luk çekme mukavemeti sergilemişlerdir. Uzama

değerleri ise ortalama olarak 1524 N değerinde seyretmekte ve 18,2 mm değerinde tamamen kopma gözlenmektedir. Kopma uzamasındaki lineer durum ortalama olarak 11,3 mm sürmektedir. Bu aralıkta test edilen numune 1524 N değerinde 11,3 mm değerinde lineer bir durum göstermektedir. Grafikten de anlaşılacağı gibi laminant plakanın kopma eğilimi 5,7 mm'den düşük bir mesafede gerçekleşmiştir.



Grafik 3. C Grubu test numuneleri ortalama kuvvet-uzama grafiği



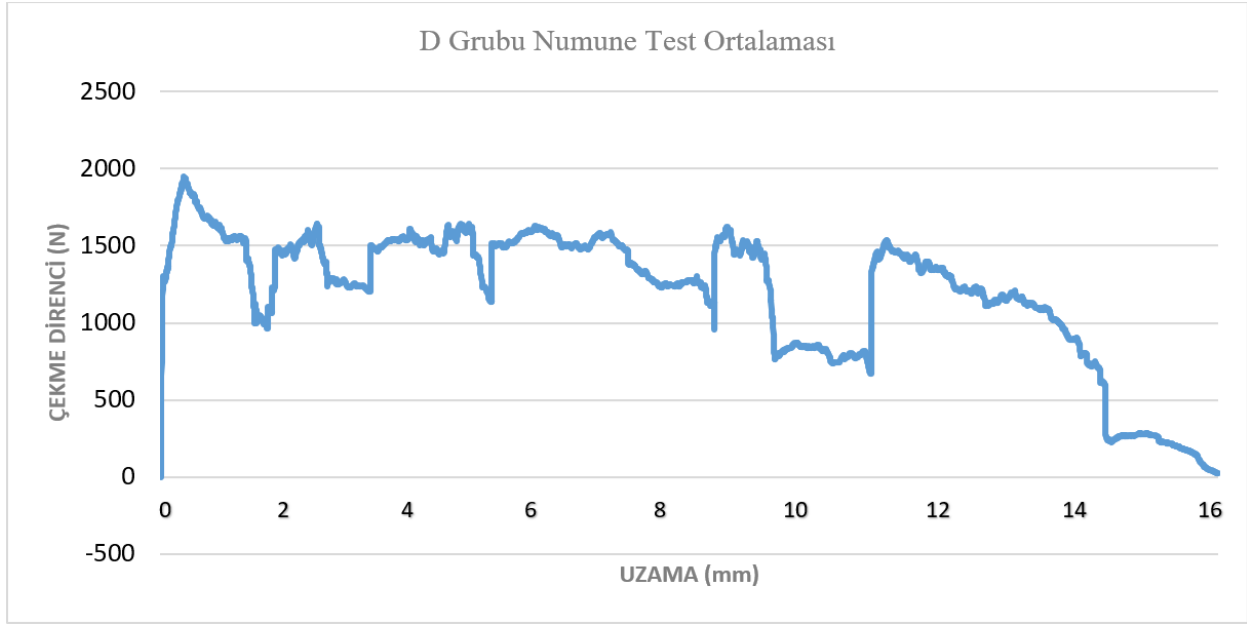
Bakış açısına göre karbon fiber iplikler küçük elptik yapılar ve dairesel yapılar oluşturmaktadır. Bunun anlamı: parça içerisinde genel olarak 90° ve 45°'lik açıların mevcut olması.

Resim 9. C Grubu numuneye ait farklı büyütmede alınmış elektron mikroskobu görüntüleri

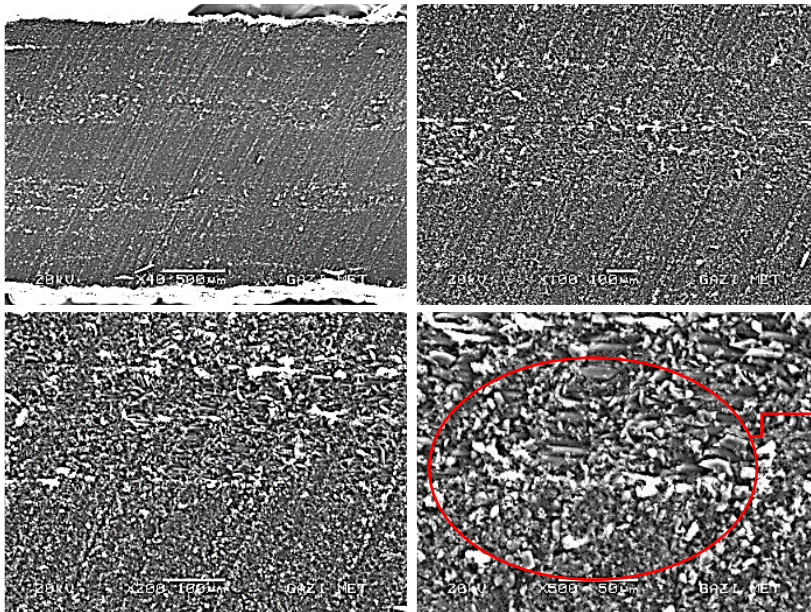
Resim 9'da SEM görüntüsü olan numune için dizilim kusuru ve belirlenen açı değerlerinin doğru olup olmadığı için görüntüler alınmıştır. Değerlendirilen SEM görüntüleri sonucunda, açı değerlerinde yanlışlık ve dizilim kusuru olmadığı anlaşılmıştır.

3.4. D Grubu Grubu Numune Sonuçları

D grubu test numunelerin sahip oldukları serim açısı değerleri: -30, 60, -75, 15, 15, -75, 60,-30'dur. Bu testler sürecinde öncelikle, kompozit laminant plakalardan alınan 12 adet numunenin her birine ait yük altında uzama davranışları ölçülmüştür. Ardından, genel bir değerlendirme yapabilmek amacıyla yük altındaki uzama davranışlarının ortalaması hesaplanmış ve tek bir grafikte (*Grafik 4*) verilmiştir. Serim açlarına bağlı, D grubu numuneleri ortalama olarak 1971 N'luk çekme mukavemeti sergilemişlerdir. Uzama değerleri ise ortalama olarak 1324 N değerinde seyretmekte ve 16,1 mm değerinde tamamen kopma gözlenmektedir. Kopma uzamasındaki lineer durum olmayışı, tartışmalar kısmında detaylıca incelenmiştir.



Grafik 4. D Grubu test numuneleri ortalama kuvvet-uzama grafiği



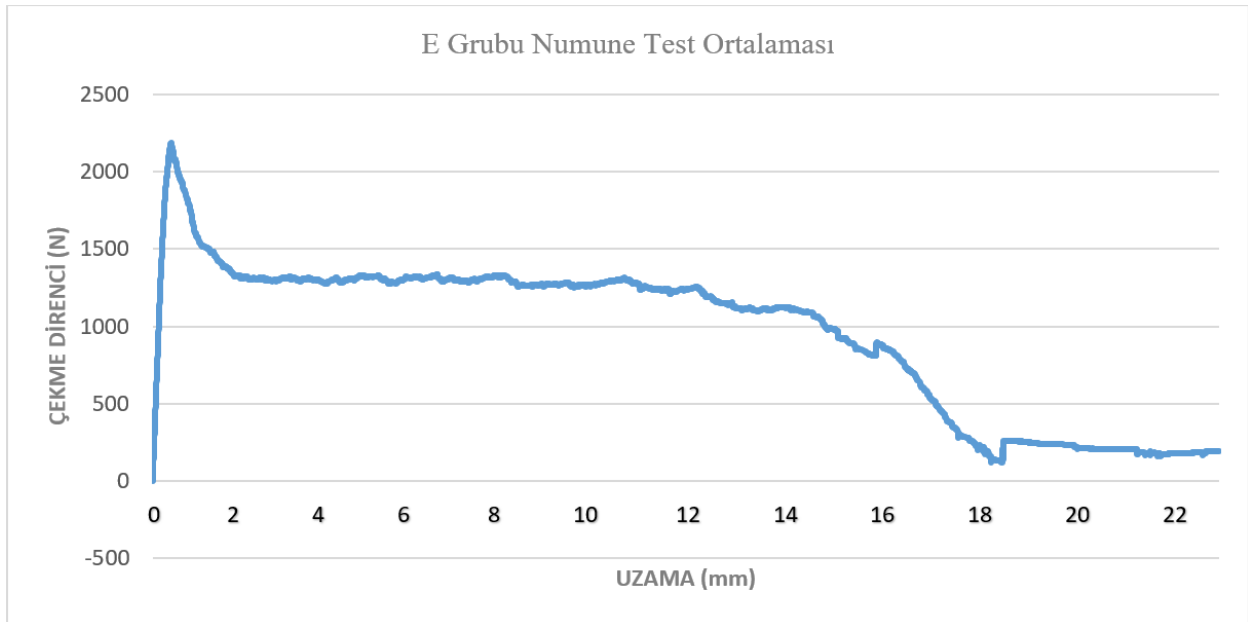
Bakış açısında göre görünen küçük eliptik yapılar ve büyük eliptik yapılar mevcut. Bunun anlamı yapı içerisinde tamamen açılı bir dizilimin olması . En uzun eliptik yapı 15° gibi dar açılardan mevcudiyetinden kaynaklanmaktadır.

Resim 10. D Grubu numuneye ait farklı büyütmelerde alınmış elektron mikroskopu görüntüleri

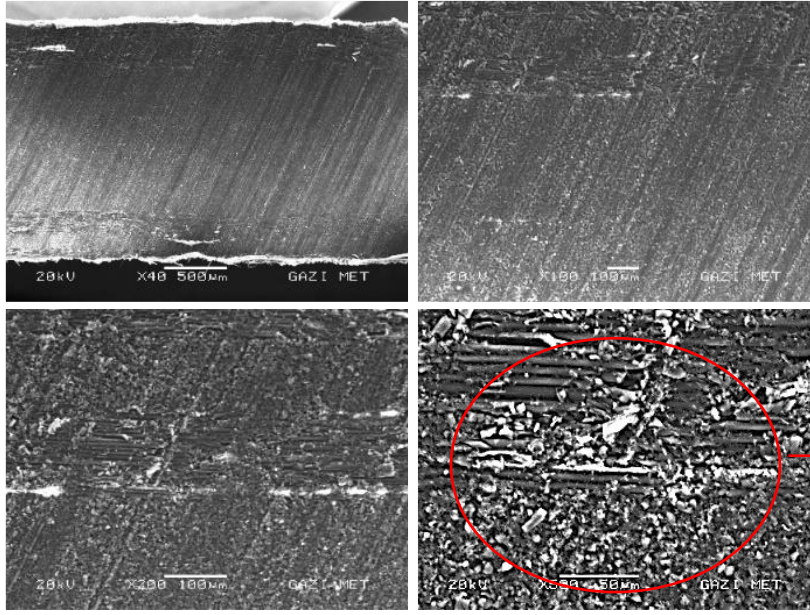
Resim 10’da SEM görüntüsü olan numune için dizilim kusuru ve belirlenen açı değerlerinin doğru olup olmadığı için görüntüler alınmıştır. Değerlendirilen SEM görüntüleri sonucunda, açı değerlerinde yanlışlık ve dizilim kusuru olmadığı anlaşılmıştır.

3.5. E Grubu Numune Sonuçları

E grubu test numunelerin sahip oldukları serim açısı değerleri: 90, 0, -45, 45, 45, -45, 0, 90’dır. Bu testler sürecinde öncelikle, kompozit laminant plakalardan alınan 12 adet numunenin her birine ait yük altında uzama davranışları ölçülmüştür. Ardından, genel bir değerlendirme yapabilmek amacıyla yük altındaki uzama davranışlarının ortalaması hesaplanmış ve tek bir grafikte (Grafik 5) verilmiştir. Serim açlarına bağlı, E grubu numuneleri ortalama olarak 2217 N’luk çekme mukavemeti sergilemişlerdir. Uzama değerleri ise ortalama olarak 1338 N değerinde seyretmekte ve 23,4 mm değerinde tamamen kopma gözlenmektedir. Kopma uzamasındaki lineer durum ortalama olarak 9,27 mm sürmektedir. Bu aralıkta test edilen numune 1338 N değerinde 9,27 mm değerinde lineer bir durum göstermektedir. Grafikten de anlaşılacağı gibi laminant plakanın kopma eğilimi 13,7 mm’den düşük bir mesafede gerçekleşmiştir.



Grafik 5. E Grubu test numuneleri ortalama kuvvet-uzama grafiği



Bakış açısında; tam çubuk görünümü, eliptik görünüm ve dairesel görünümlerin varlığı, yapı içinde bulunan dizilim açılarının 90°, 0° ve 45° olmasından kaynaklanmaktadır.

Resim 11. E Grubu numuneye ait farklı büyütmede alınmış elektron mikroskobu görüntüleri

Resim 11’de SEM görüntüsü olan numune için dizilim kusuru ve belirlenen açı değerlerinin doğru olup olmadığı için görüntüler alınmıştır. Değerlendirilen SEM görüntüleri sonucunda, açı değerlerinde yanlışlık ve dizilim kusuru olmadığı anlaşılmıştır.

	NUMUNE KALINLIĞI	MAKSİMUM KUVVET (N)	KOPMA NOKTASINDA UZAMA (mm)	MAKSİMUM UZAMA (%)	ABSORBLANAN ENERJİ (J)	KOPMA DAYANIMI (MPa)
A GRUBU	1.9±1	2334	18.00	15.92	19.57	5.33
B GRUBU	1.9±1	2512	18.90	16.13	22.24	8.31
C GRUBU	1.9±1	2375	18.20	15.61	23.42	5.53
D GRUBU	1.9±1	1971	16.10	13.39	24.17	1.1
E GRUBU	1.9±1	2217	23.40	19.25	18.68	5.9

Tablo 2. Değerlendirilen numunelerin açı değerleri

Tablo 2’de kompozit malzemelere ait olan çekme testi sonuçlarında elde edilen veriler göstermektedir. Tüm numeler arasında bir değerlendirme yapıldığında D grubu numunesinin kopma noktasındaki uzama 16.1 mm iken maksimum yüzde uzaması 13,39 olarak belirlenmiştir. Absorblanan enerji miktarı da değerlendirildiğinde bu malzemenin en fazla enerjiyi absorbe ettiği görülmektedir. Ancak, grafikten de görüldüğü üzere lineer bir uzama davranışı sergilemeyişi ve kopma dayanımına gösterdiği zayıf mukavemet diğer malzemelerden farklılığını ortaya koymuştur.

Üretimi gerçekleştirilmiş farklı tasarımlara sahip malzemeler birbirlerine göre değerlendirildiğinde; **A Grubu** tasarımında üretilen numunelerinden analiz değerleri incelendiğinde tüm gruplar arasında en fazla lineer *yer değiştirme* değerine sahip olduğu belirlenmiştir. Bu değerler kompozit parçanın kullanım alanını genişletmekle beraber güvenlik katsayısı olarak düşünülen parametrelerin yüksek olması anlamı taşımaktadır. Ayrıca A grubu tasarımının ilk hata başlangıcının hassas olmadığı fakat hata ilerleme oranının yüksek olduğu alanlarda kullanımının tercih edilmesinin uygun olacağı söylenebilir. **B Grubu** tasarımlı numunelerin diğer gruplardan farklı olarak *çekme mukavemetinin* daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir ve bu da onun ilk hata başlangıcının yüksek hassasiyet gerektirdiği yerlerde kullanım potansiyelini

arttırmaktadır. B grubu malzemeye ait ilk hata başlangıç toleransı ve aynı zamanda çekme mukavemeti değerlerinin üstünlüğü bu numunelerin A Grubu yerine tercih edilebilir bir kompozit malzeme olması anlamına gelmektedir. Üretilen parçanın boyutsal hiçbir değişiklik göstermeden sadece istif açısı değerlerinin değiştirilmesiyle elde edilen bu fark; B grubu tasarıma sahip epoksi matriksli elyaf takviyeli kompozit malzemelerin birçok alanda tercih sıralamasını üst sıralara taşımaya temel oluşturacağı beklenmektedir. **C Grubu** tasarımındaki numunelerin analiz sonuçları, B Grubu numuneler ile hemen hemen benzer özellikler gösterdiğini ortaya koymuştur. Bununla birlikte, C Grubu numunelerin istif açısı değerlerinin (45, -45, 0, 90) üretim kolaylığı açısından tercih edilebilir tasarım olduğunu unutmamak ve yüksek mukavemet değerlerinin uygulama potansiyelini göz önünde bulundurmak gerekmektedir. **D Grubu** tasarımdaki numunelerinin elde edilen veriler doğrultusunda *en zayıf* olan tasarım olduğu belirlenmiştir. Buna rağmen, D Grubu tasarımlı numunelerinin özel durum gerektiren, doğrudan bir kullanıcının kullandığı ve hasar başlangıcında malzemenin *mekanik değişiminin hissedilebilir* olduğu sağlık (kompozit protez malzemeler v.b.) alanında kullanımı çok uygundur. Bu tip tasarıma sahip olan bir kompozit malzeme, kullanımı sırasında hasar başlangıcının belli olması ile birlikte, kullanıcının bu durumu fark etmesi ve tedbir alması bakımından önem arz etmektedir. Mekanik değişimin hissedilebilir oluşu sayesinde bir anda oluşabilecek hasar sonucunda protez kullanıcısının sağlığına zarar verici durumların önüne geçilebilir. **E Grubu tasarımlı** numunelerin *çekme mukavemetinin* ortalama olduğu gözlemlenmiştir. Bu özellik; ilk hata başlangıcının orta ve düşük hassasiyet gerektirdiği yerlerde göz önünde bulundurulmalıdır. Sadece serim açılarının yani tasarımın değiştirilmesi ile elde edilen yüksek ilk hata başlangıç toleransı ve aynı zamanda kabul edilebilir bir akma mukavemeti değeri, B grubu tasarımlı numuneleri E Grubu numunelerinin yerine tercih edilebilir bir kompozit malzeme haline getirmektedir.

Bu çalışmada elde edilen verileri kıyaslayabilmek adına mümkün olan en yakın literatür çalışmalarına göre bir değerlendirme yapılmaya çalışılmış ve elde edilen veriler ayrıca aşağıda sunulmuştur. Konu ile ilgili çalışmalar incelendiğinde, yapılan araştırmaların çoğunun bağlantı noktasının güçlendirilmesi için yapıştırıcı kullanımı, bağlantı noktalarında kullanılan cıvata ve somun malzemelerinin geometrik değişiminin üzerine olduğu görülmüştür. T. Collings, and M. Beauchamp [26] yapmış oldukları çalışmada, rulman yataklarının bulunduğu kompozit malzemelerin, rulman yatak kısmında oluşturulacak hassasiyet toleransı nedeniyle kullanılabilir olan en iyi açı istif değerini 0° ve 45° olduğunu tespit etmişlerdir. B. Agarwal, ve J. Waszczak, and T. Cruse [28] yaptıkları çalışmada, bağlantı noktasında kullanılan cıvata ve somun parçaların geometrik şekillerini değiştirerek bir başarı elde etmeye çalışmışlardır. Dairesel somun ve dairesel cıvata yerine eliptik bir geometri bulduran bağlantı elemanlarının kullanılmasının, mekanik bağlantı noktasını güçlendirdiklerini keşfetmişlerdir. Literatür çalışmalarına ek olarak bu çalışmada, mekanik olarak bağlantı noktasının güçlendirilmesi amacıyla kompozit parça üretiminde sadece istif açılarının doğru bir şekilde uygulanması neticesinde harici bir cıvata, somun veya farklı bir yapıştırıcı kullanımı gerekmeden mukavemet artırılmasının mümkün olabileceği görülmektedir. Sonuçta, bu çalışmanın yenilikçiliği olarak özel bağlantı elemanlarının kullanımına gerek olmayan, aynı zamanda kalınlığı arttırılmadan mekanik birleştirilme kabiliyetinin yükseltilebildiği kompozit plakaların tasarımı ve üretiminin gerçekleştirilebildiği görülmektedir.

4. TARTIŞMA

Bu çalışmada, kompozit malzeme üretiminde, malzeme özelliklerini geliştirmek amacıyla alternatif elyaf dizilimleri tasarlanmıştır. Tasarımlar neticesinde, polimer matriksli kompozit malzemelerin mekanik birleştirilmesinde karşılaşılan mukavemet yetersizliklerinin giderilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla kompozit malzemenin yapısı; farklı katmanlarda farklı yönelimlere sahip olan kompozit laminantlar içerecek şekilde tasarlanmış ve üretimleri gerçekleştirilmiştir. Ardından üretimi yapılan bu kompozit malzemelerin yük altında göstermiş oldukları dayanımları incelenmiştir. Beş çeşit dizilim (açı) tasarımı içeren laminant plakaların her birinden numuneler alınarak, dizilimde oluşabilecek problemlerin tanımlanması için Taramalı Elektron Mikroskopu ile farklı büyütme ölçeklerinde yüzey analizleri yapılmıştır. Yapılan analizler sonucunda planlanan tasarımlarla üretimi gerçekleştirilen malzemelerin morfolojik

özelliklerinin uyumlu olduğu belirlenmiştir. Analizi yapılan laminant numunelerin hiçbirisinde dizilim ve açı kusurlarına rastlanmamıştır. Testler sonucunda, farklı gruplardaki kesimi yapılan on ikişer numunenin sahip olduğu ortalama çekme mukavemeti, kopma noktasındaki maksimum uzama, maksimum uzama yüzdesi, absorblanan enerji, kopma dayanımı ve lineer uzama miktarı belirlenmiş ve analiz edilmiştir. Genel bir değerlendirme yapıldığında, aynı sayıda katman karbon elyaf sayılarına sahip olan numuneler için mekanik özellik farklılıkların dizilim açılarından kaynaklı olduğu açıkça gözlenmiştir. **B grubu** numunelerinden alınan sonuçlar, mekanik birleştirme için içerdikleri açılar (-60, 30, 75, -15, -15, 75, 30, -60) nedeniyle en iyi yapısal mekanik dayanıma sahip oldukları tespit edilmiştir. D grubu numunelerinin analiz sonuçları bu malzemenin en yüksek absorblanan enerji miktarı ve en düşük kopma dayanımına sahip olması nedeniyle malzemenin lineer bir davranış göstermediğini ortaya koymaktadır. D grubu numunelerinin çekirdeğinde bulunan 15° istif açısında çekme mukavemeti yönünde zayıf bir dizilim açısını işaret etmektedir. En dış katmanda bulunan -30° istif açısındaki elyafların 15° açılardaki elyaflara destek olamadığı için lineer bir davranış ortaya koyamadığı düşünülmektedir. B grubu malzemelerin çekirdeğinde bulunan benzer dizilimde bu davranışın görülmemesinin sebebi olarak en dış katmanında yer alan -60°'lik negatif serim açılarının çekirdekte bulunan negatif -15°'lik serim açılara destek sağlaması sebebiyle yapıyı kuvvetlendirdiği düşünülmektedir. Bu durum, serim tasarımında en dış katmandan iç katmanlara gidildikçe birbirlerini destekleyici serim tasarımının önemini ortaya koymaktadır. Sonuç olarak, çeşitli tasarımlarda üretilen her malzemenin kendine has yüzey ve mukavemet özelliklerinin bu malzemelerin her birini farklı uygulama alanlarında kullanıma uygun kompozit malzemeler haline getirdiği belirlenmiştir. Bu tercih edilebilirlik sadece kompozit malzeme üretiminde kullanılan istif açılarının değiştirilerek istenilen alanda istenilen hassasiyeti elde edebilecek şekilde uygun istif açılarının kullanımıyla mekanik mukavemet artırımının sağlanabileceğini ve bunun için fazladan maliyet gereksinimine gerek olmadığını ortaya koymuştur.

ÇIKAR ÇATIŞMASI/ÇAKIŞMASI BİLDİRİMİ

Yazarlar arasında çıkar çatışması/çakışması bulunmamaktadır.

TEŞEKKÜR

Çalışmam sırasında kıymetli bilgi, birikim ve tecrübeleri ile bana yol gösterici ve destek olan değerli danışman hocam sayın Prof. Dr. Cemil ÇETİNKAYA' ya ve desteklerinden ötürü Meryem POLAT GÖNÜLLÜ'ye sonsuz teşekkür ve saygılarımı sunarım.

KAYNAKLAR

- [1] Karagöz, S. (2008). *Malzeme Bilgisi*, Adnan Menderes Üniversitesi, AYMYO Yayınları Ders Notu No: 00, Aydın.
- [2] Sönmez, M. (2009). *Polimer matrisli kompozitlerin endüstri ürünleri tasarımında önemi ve geleceği: Türkiye'den dört örnek firma üzerine bir inceleme*, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [3] Mills, N. (2007). *Polymer foams handbook: engineering and biomechanics applications and design guide*.: Elsevier.
- [4] Camanho, P.P. and Lambert, M. (2006). *A design methodology for mechanically fastened joints in laminated composite materials*. Composites Science and Technology. 66(15): p. 3004-3020.
- [5] Wang, J., Lotts, C., and Davis Jr, D.D. (1993). *Analysis of bolt-loaded elliptical holes in laminated composite joints*. Journal of reinforced plastics and composites. 12(2): p. 128-138.
- [6] Xiao, Y. and Ishikawa, T. (2005). *Bearing strength and failure behavior of bolted composite joints (part I: Experimental investigation)*. Composites Science and Technology. 65(7-8): p. 1022-1031.
- [7] Zhou, Y. and Fei, Q. (2017). *Evaluation of opening-hole shapes for rivet connection of a composite plate*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science. 231(20): p. 3810-3817.
- [8] Akil, H., Omar, M.F., Mazuki, A.M., Safiee, S.Z.A.M., Ishak, Z.M. and Bakar, A.A. (2011). *Kenaf fiber reinforced composites: A review*. Materials & Design. 32(8-9): p. 4107-4121.
- [9] Deborah, D.C. (1994). *Carbon fiber composites*. Waltham, MA: Butterworth-Heinemann Publisher.

- [10] Durgun, İ. (2014). *El Yatırma Yöntemi İle Kompozit Parça Üretimi*, 7. Mühendislik ve Teknoloji Sempozyumu, Ankara.
- [11] Işık, A. (2008). *Kompozit malzemeden imal edilmiş bir takviye elemanının eğilme ve burulma yükü altında deneysel ve sayısal olarak incelenmesi*. Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [12] Kaya, A.İ. (2016). *Kompozit malzemeler ve özellikleri*. Putech & Composite Poliüretan ve Kompozit Sanayi Dergisi. 29: p. 38-45.
- [13] Uusitalo, K. (2013). *Designing in carbon fibre composites*.
- [14] Aktaş, A. (2005). *Bearing strength of carbon epoxy laminates under static and dynamic loading*. Composite Structures. 67(4): p. 485-489.
- [15] Aktas, A. and Dirikolu, M.H. (2004). *An experimental and numerical investigation of strength characteristics of carbon-epoxy pinned-joint plates*. Composites science and technology. 64(10-11): p. 1605-1611.
- [16] Bardakçi, R. (2020). *Ortasında eliptik yarık bulunan cam-karbon/epoksi hibrit kompozit plakların burkulma davranışının incelenmesi*. Batman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [17] Dano, M.-L., G. Gendron, and A. Picard. (2000). *Stress and failure analysis of mechanically fastened joints in composite laminates*. Composite structures. 50(3): p. 287-296.
- [18] Dursun, T. and Özbay, M. (2008). *Tabakalı kompozit levhalarda hasar ilerleme modellemesi*. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi. 23(1).
- [19] Echavarría, C., Haller, P. and Salenikovich, A. (2007). *Analytical study of a pin-loaded hole in elastic orthotropic plates*. Composite Structures. 79(1): p. 107-112.
- [20] İçten, B.M. and Sayman, O. (2003). *Failure analysis of pin-loaded aluminum-glass-epoxy sandwich composite plates*. Composites Science and Technology. 63(5): p. 727-737.
- [21] McCarthy, M.A., McCarthy, C.T., Lawlor, V.P. and Stanley, W.F. (2005). *Three-dimensional finite element analysis of single-bolt, single-lap composite bolted joints: part I—model development and validation*. Composite structures. 71(2): p. 140-158.
- [22] Tserpes, K.I., Papanikos, P. and Kermanidis, T. (2001). *A three-dimensional progressive damage model for bolted joints in composite laminates subjected to tensile loading*. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures. 24(10): p. 663-675.
- [23] Turan, K., Kaman, M.O. and Gür, M. (2010). *Pim bağlantılı tabakalı kompozit levhalarda fiber takviye açısının hasar tipine etkisi*. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi. 16(2): p. 213-220.
- [24] Atlı, İ., Kurt, R., Yeşil, M. (2020). *Karbon Fiber Takviyeli Epoksi Matrisli Kompozitlerin Bağlantı Bölgelerinin Mekanik Davranışlarının İncelenmesi*. Journal of Materials and Mechatronics: A. 1(2): p. 66-75.
- [25] Collings, T., (1982). *On the bearing strengths of CFRP laminates*. Composites. 13(3): p. 241-252.
- [26] Collings, T. and Beauchamp, M. (1984). *Bearing deflection behaviour of a loaded hole in CFRP*. Composites, 15(1): p. 33-38.
- [27] Kiral, B.G. (2010). *Effect of the clearance and interference-fit on failure of the pin-loaded composites*. Materials & Design. 31(1): p. 85-93.
- [28] Agarwal, B. (1980). *Static strength prediction of bolted joint in composite material*. AIAA journal. 18(11): p. 1371-1375.