

Dokuma Karbon Elyaf Takviyeli Karbon Nano Tüp-Epoksi Kompozit Malzemelerin Mekanik ve Termal Karakterizasyonu

Nazife KORKMAZ*¹, Enes ÇAKMAK¹, Mehmet DAYIK¹

¹Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Tekstil Mühendisliği Bölümü, 32260, Isparta

(Alınış / Received: 22.02.2016, Kabul / Accepted: 24.05.2016, Online Yayınlanma / Published Online: 04.06.2016)

Anahtar Kelimeler

Karbon elyaf takviyeli kompozit,
Çok katmanlı karbon nano tüp,
Elle yatırma,
Epoksi reçine,
Mekanik analiz,
Termal analiz

Özet: Bu çalışmada karbon elyaf takviyeli-karbon nano tüp ile modifiye edilmiş epoksi kompozit malzemelerin üretilmesi ve üretilen kompozit malzemelerin mekanik, termal ve kırılma yüzeylerinin karakterizasyonu hedeflenmiştir. Bu hedef doğrultusunda matris elemanı olarak çok katmanlı karbon nano tüp içeren epoksi nano kompozit, dokuma karbon kumaş ise 4/4 dimi takiveye elemanı olarak kompozit malzeme üretiminde kullanılmıştır. Çalışma kapsamında ayrıca, karbon nano tüp ile matris modifikasyonu işleminin etkisini belirlemek için saf epoksi reçine sisteminin matris malzemesi olarak kullanıldığı kompozit numuneleri de üretilmiştir. Üretilen kompozitlerde karbon nano tüp ile matris modifikasyonu işleminin mekanik performans özellikleri üzerindeki etkisi çekme, eğilme ve düzlem içi kayma testleri ile değerlendirilmiştir. Kompozit malzemelerin termal karakterizasyonu ise simültane termal analiz ünitesinde (TG-DTG/TG-DSC/TG), diferansiyel termal gravimetre (TG-DTG) ve diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) analizleri ile yapılmıştır. Çekme testi sonucu kırılmış veya hasarlı parçalardan optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) cihazı ile alınan yüzey görüntüleri incelenerek kompozit malzemelerde hasar ilerleme mekanizmaları tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, epoksi reçine sistemine karbon nano tüp dispersiyonu ile karbon elyaf takviyeli polimerik kompozit malzemelerin mekanik ve termal özelliklerinde iyileşmeler sağlandığını göstermektedir. Ayrıca, SEM ve optik mikroskop görüntüleri de mekanik karakterizasyon aşamasında elde edilen kompozit malzeme performans iyileşmesini desteklemektedir.

Mechanical and Termal Characterization of Woven Carbon Fiber Reinforced Carbon Nanotube-Epoxy Composites

Keywords

Carbon fiber-reinforced composite,
Multi-walled carbon nano-tube,
Hand lay-up,
Epoxy resin,
Mechanical characterization,
Thermal characterization

Abstract: The scope of this study was fabrication and characterization of woven carbon fiber reinforced composite with multi-walled carbon nano-tubes modified epoxy matrix. For this purpose, modified epoxy matrix with multi-walled carbon nano-tubes at a concentration of 0.3 wt % and twill 4/4 woven carbon fiber fabric as textile reinforcement were used for fabricating nanomodified composite plates. The effect of multi-walled carbon nano-tube fillers on epoxy matrix system and carbon fiber reinforced composites were also studied. In this study, the tensile tests were performed in both the warp and weft direction, in-plane shear and three-point bending tests were also performed to characterize the mechanical performance of the composites. In addition, differential thermal gravimetry (TG-DTG) and differential scanning calorimetry (DSC) analysis were performed by using the simultaneous thermal analysis unit (TG-DTG/TG-DSC/TGA) to investigate the effect of multi-walled carbon nano-tubes. Furthermore, the microstructure of the multiscale carbon fiber reinforced composite was investigated by scanning electron microscope (SEM) and optic microscope after tensile tests. Tensile, flexure, TG-DTG and DSC analysis confirmed that matrix modification could improve the mechanical properties and thermal stability of the composites compared to neat resin. In addition, SEM and optic microscope images taken from crack propagation surfaces also supported the improvement of composite material performance.

1. Giriş

Birden fazla malzemenin değişik tekniklerle bir araya getirildiği, amaca uygun özellikler taşıyan kompozit malzemeler birçok endüstri alanında geleneksel malzemelerin yerini almıştır [1-3]. Özellikle son yıllarda mühendislik alanında yaşanan gelişmeler sayesinde yüksek dayanım/yoğunluk ve elastik modülü/yoğunluk oranı elde edilmesiyle daha üstün nitelikli kompozit malzeme üretimi ve performans özellikleri üzerine yapılan araştırma ve geliştirme faaliyetleri artarak devam etmektedir. Bununla birlikte kompozit bir malzemenin özelliklerinin kendi içinde geliştirilmesi, yeni bir kompozit malzeme üretiminin getireceği çeşitli zorlukların da önüne geçerek malzeme ve zaman kaybını önleyebilen seçeneklerden biridir. Son yıllarda gelişen lif teknolojisi ile birlikte kırılğan malzemenin zayıf olan yönlerinin iyileştirilmesi, kırılğanlığın giderilmesi, mukavemetinin artırılması için karbon elyaf gibi üstün özelliklere sahip teknik liflerin kompozit malzemelerde çeşitli formlarda takviye malzemesi olarak kullanımı yaygınlaşmıştır. Karbon elyaf takviyeli polimerik kompozit malzemeler, tabaka içi yüksek mukavemet ve sertlik özelliğine sahip olmasına [9] rağmen matris özellikleri tarafından belirlenen tabakalar arası düşük performans özelliklerinden muzdariptir. Polimerik kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini iyileştirmek için liflerin takviye malzemesi olarak kullanımının yanı sıra matris malzemesi içerisine nano boyutta lif, grafen ve türevleri, nano partiküller takviye edilerek reçine mukavemeti ve takviye malzemesi/matris ara yüzey bağı iyileştirilir [4]. Matris modifikasyonu [3] olarak adlandırılan bu işlem sonrasında matris yapının tekil kullanımıyla (nano partikül/matris) ortaya çıkan yeni kompozit malzemeye nanokompozit adı verilmektedir. Son yıllarda elyaf takviyeli polimer kompozit malzemelerle ilgili yapılan çalışmalarda kimyasal direnç, sertlik, tokluk aşınma direnci gibi avantajlarından dolayı polimer matris malzemesi olarak kullanılan epoksi reçine sistemi kullanılmaktadır. Epoksi reçine sistemleri bu özelliklerin yanı sıra kırılğan bir yapıya sahiptir. Günümüzde epoksi reçine sistemlerinin modifikasyonunda karbon nano tüp kullanımı üzerine yoğunlaştığı görülmektedir [5, 6]. Çok katmanlı karbon nano tüpler; yüksek mukavemet [7-9], elektriksel [10] ve ısıl iletkenlik [11], düşük ağırlık [12, 13] özelliklerinin yanı sıra çok yüksek termal [14] ve kimyasal dayanımı [15] nedeniyle epoksi matris modifikasyonlarında araştırmacıların dikkatini çekmiştir [16, 17]. Matris modifikasyonu ile üretilen epoksi nanokompozitlerin çok fazlı elyaf kompozit malzemelerde kullanımı ile birlikte özellikle havacılık ve uzay sanayisi için üstün özellikli kompozit malzemelerin üretimi yaygınlaşmaktadır. Hem çok katmanlı karbon nano tüplerin hem de karbon elyafın özelliklerinin bir araya getirildiği üç fazlı hibrit kompozitler [18], matris sistemine karbon nano tüp

ilavesi ile üretilen epoksi nanokompozitlerin karbon elyafı birlikte kullanılmasından üretilmektedir.

Literatürdeki karbon elyaf/karbon nano tüp/epoksi kompozitlerle ilgili dikkat çeken çalışmaların çoğu üç fazlı kompozit malzemelerin mekanik özellikleri ile ilgilidir. Bekyarova ve arkadaşları (2007) tek katmanlı ve çok katmanlı karbon nano tüplerin karışımı ile modifiye edilmiş dokuma karbon kumaş takviyeli kompozit malzemelerin üretimi için elektroforez yöntemini kullanmışlardır. Çalışma kapsamında elektroforez yöntemi ile elektroforez tek katmanlı ve çok katmanlı karbon nano tüplerin dokuma karbon kumaş yüzeyine depozisyonu sağlanmıştır. Yüzeyi karbon nano tüp karışımı ile kaplanmış dokuma karbon kumaşlar daha sonra karbon nano tüplerin tamamen karbon liflerine entegre edildiği ve matris zengin bölgelere sahip hibrit kompozit malzeme üretimi için epoksi reçine matris ile emdirilmiştir. Dokuma karbon kumaş takviyeli hibrit kompozit malzeme üretiminde kompozit üretim yöntemi olarak vakum destekli reçine transfer kalıplama (VDRTK) yöntemi kullanılmıştır. Karbon nano tüp/dokuma karbon kumaş/epoksi kompozit malzemenin tabakalar arası kayma mukavemeti karbon nano tüp katkısının yapılmadığı kompozit malzemeninkinden % 30 daha yüksektir. Bunun yanı sıra karbon nano tüp katkısının kompozit malzemenin düzlem dışı elektrik iletkenliğinin iyileşmesini sağladığı tespit edilmiştir [19].

Zhou ve arkadaşları ise (2008) çalışmalarının ilk aşamasında Bisfenol-F tipi epoksi reçine sisteminin karbon nano tüpler ile modifiye edilmesinde dairesel kesiti 30-60 nm ve boyuna kesiti ise 3-10 µm arasında değişen çok katmanlı karbon tüpleri ağırlıkça % 0-0,4 arasında değişen oranlarda kullanmışlardır. Karbon nano tüp ile modifiye edilmiş epoksi üzerinde gerçekleştirilen eğilme ve kırılma tokluğu test sonuçlarına göre en yüksek kopma mukavemeti ve kırılma tokluğu değeri ağırlıkça % 0,3 oranında çok katmanlı karbon nano tüp ile modifiye edilmiş epoksi reçine matris sisteminde elde edilmiştir. Çalışmanın ikinci aşamasında ise % 0,3 oranında çok katmanlı karbon nano tüp ile modifiye edilmiş epoksi reçine matris sistemi, saten karbon dokuma kumaş takviyeli kompozit tabakaların VDRTK yöntemiyle üretiminde kullanılmıştır. Çalışma kapsamında diğer çalışmalardan farklı olarak karbon elyaf/epoksi kompozit malzemelerin yapısına karbon nano tüp eklenmesinin mekanik özelliklerin yanı sıra termal özellikler üzerindeki etkisi de termogravimetrik analiz (TGA) ve dinamik mekanik analizi (DMA) ile değerlendirilmiştir. Elde edilen test sonuçlarına göre camsı geçiş sıcaklığı, ayrışma sıcaklığı ve eğilme direnci kompozit malzeme yapısına yapılan karbon nano tüp katkısı ile artmıştır. Çalışmanın son aşamasında ise saf epoksi reçine ve nano fazlı karbon/epoksi kompozit tabakalarda hasar analizinde kullanılmak üzere deney sonuçlarına

dayalı lineer hasar modeli Weibull dağılım fonksiyonu ile kombine edilmiştir. Elde edilen denkleme göre simüle edilen sonuçlar; hem saf epoksi reçine hem de nano fazlı karbon/epoksi kompozitlerin mukavemet değerlerinin Weibull dağılımı ile uyumlu olduğunu göstermektedir [9].

Soliman ve arkadaşları (2012) ağırlıkça % 0,5, % 1,0 ve % 1,5 oranında karboksil gruplarıyla fonksiyonelleştirilmiş çok katmanlı karbon nano tüp destekli ve (0/90°) oryantasyonuna sahip ince karbon dokuma elyaf/epoksi kompozit plakalara 15, 24, 30, 60 ve 120 joule olmak üzere beş farklı darbe enerjisi uygulayarak kompozit plakaların düşük hızlı darbe tepkisini ve hasar mekanizmalarını incelemişlerdir. Yapılan testler ile uygulanan darbe enerji seviyelerinde numunede oluşan hasar mekanizmaları kuvvet-zaman, enerji-zaman, yer değiştirme-zaman eğrilerinde gösterilmiştir. Ayrıca darbe yüklemeleri sonrası farklı oranda çok katmanlı karbon nano tüp katkısına sahip kompozit numunelerinde ortaya çıkan hasar ölçülmüş ve karşılaştırılmıştır. Test sonuçlarına göre karbon/epoksi kompozit malzemelerin yüzeyi karboksil ile işlem görmüş çok katmanlı karbon nano tüp ile modifiye edilmesi; kompozit malzemelerde darbe etkisinde iyileştirmenin yanı sıra penetrasyon limitinin üzerindeki hasar boyutunda azalma sağladığı tespit edilmiştir. Matris malzemesinde % 1,5 oranında çok katmanlı karbon nano tüp katkısı enerji absorpsiyonunda % 50 oranında artış sağlamaktadır [20].

Dong ve arkadaşları (2014) de karbon nano tüpler ile modifiye edilmiş elyaf takviyeli epoksi kompozit malzemelerde karbon nano tüp dispersiyonunu optimize etmek amacıyla sürekli karbon nano tüp ağlarının yeni bir organizasyon formunu tasarlamışlardır. Araştırmacılar yapmış oldukları çalışmada üretilen kompozit malzeme yapısında sürekli karbon nano tüp ağı hazırlama olanaklarını araştırmışlardır. Kompozit malzeme üretim sürecinde öncelikle saten dokuma kumaş konstrüksiyonuna sahip karbon kumaşlar, disperse edici madde olarak polivinil pirolidon içeren karbon nano tüp sulu çözeltisine daldırıldıktan sonra epoksi malzemesi emdirilmeden önce dondurarak kurutma ve sonrasında ise piroliz işlemine tabi tutulmuştur. Yüzeyinde karbon nano tüp ağı oluşturulan karbon kumaşların yüzey morfolojileri SEM analizi ile gözlemlenmiştir. Ayrıca çalışma kapsamında karbon nano tüp ağı ve epoksi reçine arasındaki ilişki de incelenmiştir. Çalışma kapsamında düzlem dışı elektrik iletkenliği ve tabakalar arası kayma mukavemeti gibi kompozit özellikleri analizlerle tespit edilmiştir. Karbon nano tüpler tarafından oluşturulan sürekli ve gözenekli karbon nano tüp ağı, karbon kumaş/% 1 karbon nano tüp prepeg veya karbon kumaş/% 2,5 karbon nano tüp prepeg hazırlanmasında kullanılmaktadır. Çalışma kapsamında karbon nano tüp dağılımının hazırlanan

karbon nano tüp ağlarının morfolojisini önemli seviyede etkilediği sonucu elde edilmiştir. Karbon kumaş yüzeyinde oluşturulan karbon nano tüp ağının dayanıklılığı nedeniyle ağın büyük bir kısmı kompozit malzeme yapısında muhafaza edilmiş ve bu durum üretilen kompozit malzemenin düzlem dışı elektrik iletkenliğinin belirgin şekilde artmasını sağlamıştır. Bunun yanı sıra uygun orandaki karbon nano tüp ağları; karbon nano tüplerin yüzeyi fonksiyonelleştirilmemiş olmasına rağmen kompozit malzemelerin tabakalar arası kayma mukavemetini iyileştirebilmektedir. Eğer karbon elyaf yüzeyinde oluşturulan karbon nano tüp ağı yapısı belirli oranın üzerinde olursa tabakalar arasında kayma mukavemetinde azalmaya neden olmaktadır. Sonuç olarak çalışmada kullanılan sürekli karbon nano tüp ağı hazırlama yöntemi, kumaş ve kompozit malzeme yapısında karbon nano tüp dispersiyonunu optimize etmek için kullanılacak yeni bir yöntem olarak kabul edilebilmektedir. Çalışmadaki karbon nano tüp ağı hazırlama yöntemi bir fiziksel yöntem olarak elektromanyetik kalkanlama için kompozit malzemelerde iletken yolların tasarımında, mühendislik malzemelerinde hasar tespiti ve daha üstün performansa sahip karbon nano tüp ile modifiye edilmiş kompozitlerin üretiminde önceden var olan kimyasal yöntemle kolaylıkla kombine edilerek kullanılabilir. Araştırmacılara göre optimal karbon nano tüp içeriği ve fonksiyonlaştırılmış karbon nano tüp kullanımı dahil birçok araştırma geliştirilebilir [21].

Yapılan literatür araştırması neticesinde farklı yöntemlerle üretilen karbon elyaf takviyeli epoksi kompozit malzemelerin modifikasyonunda farklı özellikteki karbon nano tüp ve türevlerinin kullanıldığı ve uygulama sonrası kompozit malzeme performans özelliklerinde iyileşmeler elde edildiği dikkat çekmektedir. Özellikle son yıllarda yapılan çalışmalarda üç fazlı karbon kompozitlerde karbon nano tüp modifikasyonunun kompozit malzeme mekanik özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Mekanik özelliklerin yanı sıra karbon nano tüp modifikasyonunun kompozit malzemelerin termal özellikleri üzerindeki etkisi de üzerinde durulması gereken önemli araştırma konularındandır. Literatür incelendiğinde matris modifikasyon işlemlerinin kompozit malzemelerin termal özelliklerine etkisi konusundaki eksiklik dikkat çekmektedir. Bu nedenle bu çalışmada literatürden farklı olarak, epoksi matris elemanına yapılan çok katmanlı karbon nano tüp katkısının kompozit malzeme mekanik performans özellikleri üzerindeki etkisinin yanı sıra termal özellikleri üzerindeki etkisi de incelenmiştir. Çalışma kapsamında ilk olarak Diglisidil Eter Bisfenol A tipi sıvı epoksi reçine sistemine ağırlıkça yaklaşık % 0,3 oranında çok katmanlı karbon nano tüp katkısı yapılarak nano tüpler ile modifiye edilmiş epoksi reçine matris sistemi elde edilmiştir. Bir sonraki aşamada ise elde edilen modifiye epoksi reçine matris sistemi dokuma karbon kumaş takviye


elemanına emdirilerek karbon elyaf/karbon nano tüp/epoksi (karbon elyaf/KNT/epoksi) kompozit malzeme imal edilmiştir. Üretilen kompozit malzemelerde, çok katmanlı karbon nano tüp katkısının yarı statik gerilme yükleri altında malzemenin mekanik özellikleri üzerindeki etkisini belirlemek için çekme, eğilme ve düzlem içi kayma testleri yapılmıştır. Elde edilen test sonuçları saf sıvı epoksi reçine matris sistemi ile üretilmiş kompozit malzemelere ait analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca üretilen kompozit malzemelerin termal özelliklerinin belirlenmesinde ise TG-DTG ve DSC analizleri kullanılmıştır.

2. Materyal ve Metot

2.1. Materyal

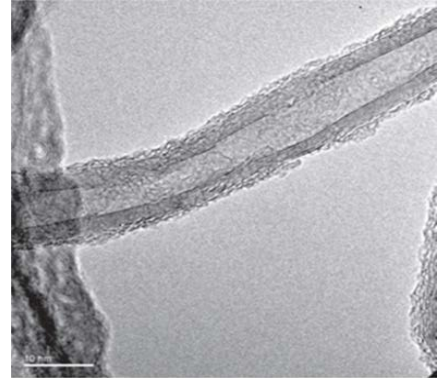
Çalışma kapsamında karbon elyaf takviyeli kompozit malzeme üretiminde 4/4 dimi kumaş konstrüksiyonuna sahip dengeli ve çift yönlü (0/90°) dokuma karbon kumaş (Spinteks Tekstil, Denizli), takviye elemanı olarak kullanılmıştır. Çalışmada takviye malzemesi olarak çift yönlü kumaşlar özellikle laboratuvar ölçekli kompozit malzeme üretimine uygun olması nedeniyle tercih edilmiştir. Takviye malzemesine ait özellikler detaylı olarak Tablo 1’de verilmiştir. SPN B 285 4T kodlu karbon kumaş; 240 GPa elastik modül, 3800 MPa çekme mukavemeti ve % 1,6 maksimum kopma uzama özelliğine sahip DowAksa Carbon A 38 karbon lifinden üretilmiştir.

Tablo 1. Takviye malzemesi olarak kullanılan karbon kumaş özellikleri [22]

SPN B 285 4T			
Gramaj (g/m ²)	285±% 5	Çözgü sıklığı (adet/cm)	7
Kumaş tipi	4/4 dimi dokuma	Atkı sıklığı (adet/cm)	7
Çözgü ve atkı numarası (tex)	3K/200	Kumaş genişliği (cm)	100
Elyaf	DowAksa Carbon A 38	Çekme mukavemeti (MPa/Ksi) (σ_c)	3K 3800 MPa /552 Ksi
Kalınlık (mm)	0,3±% 5	Test standardı	ISO 10618
Test standardı	ISO 5084	Kumaş görüntüsü	

Momentive Hexion L 285 (Diglisidil Eter Bisfenol A tipi) sıvı epoksi reçine, 1,2-diamino-sikloheksan tipi (Momentive Hexion H 285) sertleştirici ile birlikte karbon nano tüplerle modifiye edilmemiş kompozit numunelerinin üretiminde matris malzemesi olarak kullanılmıştır. Momentive Hexion L 285 epoksi reçine; karbon, cam ve aramid elyaflarla elle yayma kompozit üretim tekniğine uygun iki bileşenli bir epoksi reçine sistemidir. Bu reçine sistemi ayrıca, karbon nano tüplerle modifiye edilmiş kompozit malzemenin üretiminde çok katmanlı karbon nano tüp içeren masterbatch sisteminin seyreltilmesinde de kullanılmıştır. Çalışmada karbon nano tüpler ile

modifiye edilmiş epoksi reçine sistemi ise, Nanografi Nano Teknoloji Bilişim İmalat ve Danışmanlık Ltd. Şirketi’nden temin edilen EPOCYLTM NC R128-02 isimli masterbatch sistemi kullanılarak hazırlanmıştır. EPOCYLTM NC R128-02; sıvı Bisfenol A tipi (Bis-A) epoksi reçine tabanlı karbon nano tüpler yedirilerek oluşturulan bir masterbatch sistemidir ve yüksek oranda NC 7000 tipi çok katmanlı karbon nano tüp içermektedir. EPOCYLTM NC R128-02 masterbatch sisteminin yapısında yer alan çok katmanlı karbon nano tüpler kimyasal buhar biriktirme yöntemi ile üretilmiştir. Söz konusu masterbatch sisteminin kompozit malzemelerde matris elemanı olarak kullanılabilmesi için öncelikle sıvı reçine ile seyreltilmesi gerekmektedir. Sıvı reçine ile seyreltilmeden önce EPOCYLTM NC R128-02 yapısındaki çok katmanlı karbon nano tüpler ortalama 9,5 nm çapa, birkaç mikron arasında değişen uzunluğa ve 300 m²/g özgül yüzey alanı sahiptir. EPOCYLTM NC R128-02 yapısında yer alan çok katmanlı karbon nano tüplere ait tanıtım kataloğundan alınan TEM görüntüleri Şekil 1’ de verilmiştir.



Şekil 1. EPOCYLTM NC R128-02 masterbatch yapısında yer alan NC 7000 çok katmanlı karbon nano tüplere ait TEM [23]

2.2. Metot

Çalışma kapsamında 4/4 dimi kumaş konstrüksiyonuna sahip dokuma karbon kumaş ve saf epoksi ya da çok katmanlı karbon nano tüp ile modifiye edilmiş epoksi reçine matris sisteminin kombinasyonundan iki farklı kompozit malzeme numunesi elle yatırma yöntemi kullanılarak üretilmiştir.

2.2.1. Çok katmanlı karbon nano tüpler ile modifiye edilmiş epoksi reçine ve saf epoksi reçine matris sisteminin hazırlanması

Çalışma kapsamında dokuma karbon kompozit malzeme üretiminde saf sıvı epoksi reçine ve çok katmanlı karbon nano tüpler ile modifiye edilmiş epoksi reçine olmak üzere iki farklı matris sistemi kullanılmıştır. İlk olarak saf epoksi matris sistemi, sıvı epoksi reçine ve sertleştiricinin (100 g saf reçine/40 g sertleştirici) mekanik karıştırıcı ile oda sıcaklığında 15 dakika karıştırılmasıyla hazırlanmış ve hazırlanan

karışım direkt olarak elle yatırma yöntemiyle kumaşa emdirilmiştir. İkinci tip matris sistemi ise epoksi reçine sistemine çok katmanlı karbon nano tüp katkısı yapılarak hazırlanmıştır. Epoksi reçine sistemine çok katmanlı karbon nano tüp katkısının yapılması işleminde ise; Bisfenol A tipi (Bis-A) sıvı epoksi reçineye karbon nano tüp dispersiyonu ile elde edilen EPOCYLTM NC R128-02 isimli ürün kullanılmıştır. Masterbatchın karbon kumaşlara emdirilmesi ve kütleme işleminden önce viskozitenin düşmesi için masterbatch, Uşak Üniversitesi Kompozit Üretim Laboratuvarı'nda bulunan etüvde 60 °C sıcaklıkta 20 dakika ısıtılmış ve Wise Stir HS-50A2 marka mekanik karıştırıcı ile 20 dakika karıştırılmıştır. Sonraki aşamada ise ağırlıkça % 0,3 oranında karbon nano tüp içeriğinin elde edilebilmesi amacıyla kullanma talimatına göre saf reçine ile seyreltilmiş ve sertleştirici matris sistemine eklenmiştir. Son olarak elde edilen karışım dokuma karbon kumaşlara emdirilmeden önce, çok katmanlı karbon nano tüplerin karışımda homojen dağılması ve hava kabarcığı kalmaması için 15 dakika mekanik karıştırıcı ile karıştırılmıştır.

2.2.2. Dokuma karbon kumaş takviyeli kompozit plakaların üretilmesi

Dokuma karbon kumaş takviyeli kompozit plakalar sıcak presleme yöntemi kullanılarak elle yatırma üretim tekniği ile Uşak Üniversitesi Kompozit Üretim Laboratuvarı'nda üretilmiştir. Çalışma kapsamında kompozit malzemelerin üretiminde basit ve laboratuvar ölçekli üretime uygun olduğu için elle yatırma üretim tekniği tercih edilmiştir. Çalışmada kompozit plaka üretim aşamasında öncelikle dokuma karbon kumaşlar (0/90°) yönünde ve 50x100 cm² boyutlarında kesilmiştir. Kesilen dokuma karbon kumaşlarla aynı boyutta alüminyum düz plaka kalıplar hazırlanmıştır. Kompozit üretim sırasında kalıpların bir üretimden sonra tekrar kullanılabilmesi, düzgün bir yüzey elde etmek ve karbon kumaşlardan reçinenin sızarak hidrolik prese yapışmasını önlemek amacıyla 250 °C sıcaklığa kadar dayanabilen ve yapışmayan 19 µm kalınlığında Yenipak firmasından temin edilen mikrofilm, kalıbın alt ve üst yüzeyine serilmiştir. Kesilen dokuma karbon kumaşlar tartılmış ve kumaşların her bir metrekaresi için eşit ağırlıkta karbon kumaş/reçine olacak şekilde reçine saf epoksi veya karbon nano tüpler ile modifiye edilmiş epoksi reçine karbon kumaşa rulo yardımıyla emdirilmiştir. Bu işlem kaç kat takviye malzemesi varsa o kadar devam eder. Her bir kompozit plaka altı kat dokuma karbon kumaştan oluşmaktadır. En alta alüminyum plaka kalıp yerleştirilmiş ve kalıp üzerine sırasıyla mikrofilm, saf epoksi reçine veya çok katmanlı karbon nano tüp ile modifiye edilmiş epoksi reçine sistemi ile emdirilmiş dokuma karbon kumaşlar serilmiştir. Bu yapının üzerine hava kabarcığı kalmayacak şekilde tekrar mikrofilm yerleştirilmiş ve mikrofilmlerin kenarları kıvrılarak üzerine alüminyum plaka yerleştirilmiştir.

Bu işlemde sonra reçinenin sertleşmesi için Uşak Üniversitesi Kompozit Üretim Laboratuvarı'nda bulunan ısı ve zaman kontrollü hidrolik pres 100 °C ve 8MPa basınca ayarlanarak altı tabakadan oluşan kompozit plakalara 100 dakika boyunca kütleme işlemi uygulanmıştır. Kütleme işlemi tamamlandıktan sonra kompozit plakalarda ısıl çarpılma olmaması için plakaların aynı basınç altında oda sıcaklığına kadar soğuması beklenmiş ve üretilen parçalara zarar vermeden mikrofilm kesilerek kompozit parçalar çıkartılmıştır.

2.2.3. Kompozit malzemelerin karakterizasyonu

Saf sıvı epoksi reçine ve çok katmanlı karbon nano tüpler ile modifiye edilmiş epoksi reçine olmak üzere iki farklı matris sistemi özelliklerine sahip karbon elyaf takviye malzemesiyle üretilen karbon kompozit malzemelerin karakterizasyonu mekanik, termal ve yüzey karakterizasyonu olmak üzere üç farklı aşamada gerçekleştirilmiştir. Çalışmada öncelikle üretilen kompozit plakaların yoğunluk ve elyaf/matris malzeme bileşen hacim oranları belirlenmiştir. Üretilen kompozit plakaların mekanik karakterizasyonu aşamasında çekme, eğilme ve düzlem içi kayma testleri yapılmıştır. Termal karakterizasyon aşamasında ise simültane termal analiz ünitesi (TG-DTG (diferansiyel termal gravimetre)/TG-DSC/TG) kullanılarak TG-DTG ve DSC analizleri yapılmıştır. Çekme testi sonucu kırılmış veya hasarlı parçaların yüzey karakterizasyonunda küçük büyültme oranlarında optik mikroskop ile daha ayrıntılı incelemeler için ise SEM cihazı ile görüntüler alınmış ve incelenmiştir.

Çalışma kapsamında üretilen kompozit malzemelerin yoğunluk ve elyaf/matris hacim oranını belirlemek için, ASTM D 3171 [24] standardında tanımlanan numune ağırlık ve boyutlarına uygun olarak yaklaşık 2 g ağırlığında ve 25x25 mm boyutlarında her bir kompozit plakadan 5 adet numune su jeti ile kesilmiştir. Numunelerin yoğunluğu ASTM D 792 test standardına göre Arşimet prensibi ile belirlenmiştir [25, 26]. 1-5 g ağırlığında her kompozit plaka için 5 adet numunenin önce hava ortamında ağırlıkları sonra da su içerisinde askıdaki ağırlıkları ölçülmüş ve yoğunluk değerleri Arşimet prensibine göre 1-2'de verilen formüllere göre hesaplanmıştır.

$$sg = \frac{a}{(a + w - b)} \quad (1)$$

$$\rho = sg \times 0,9975 \quad (2)$$

1-2'de verilen formüllerde a:numunenin havadaki ağırlığını, b:askı teli ve numunenin su içindeki ağırlığı ve w:kismen su içindeki askı telinin ağırlığını belirtmektedir. Kompozit malzeme yapısında yer alan elyaf ve matris malzeme yoğunluğu ise üretici firmaların teknik verileridir.

Çalışma kapsamında üretilen karbon kompozit malzemelerin elyaf/matris hacim oranları ise ASTM D 3171 test standardında tanımlanan yakma (burn-off) yöntemi ve teorik yöntem olmak üzere iki farklı yöntem ile belirlenmiştir [25, 26]. Kompozit malzemelerin yakma (burn-off) yöntemi ile elyaf/matris hacim oranı değerlerini hesaplamak için yoğunluğu ölçülen numuneler Süleyman Demirel Üniversitesi Jeotermal Enerji, Yeraltısuyu ve Mineral Kaynakları Araştırma ve Uygulama Merkezi bünyesinde bulunan Protherm PLF 120/10 marka kül fırınında 560 °C' de 2,5 saat bekletilerek matris malzemenin yanması sağlanmış ve kalan elyaflar hassas terazide tartılmıştır. Üretilen kompozit plakaların elyaf/matris hacim oranının yakma (burn-off) yöntemi ile belirlenmesi için ASTM D 3171 standardında tanımlanan parametrelerin hesaplanmasında 3-5'de verilen formüller kullanılmıştır.

Yüzde elyaf ağırlığı (W_r);

$$W_r = (M_f/M_i) \times 100 \quad (3)$$

M_i : İlk numune ağırlığı

M_f : Yakma işleminden sonraki numune ağırlığı

Yüzde elyaf hacim oranı (V_r);

$$V_r = (M_f/M_i) \times 100 \times \rho_c / \rho_r \quad (4)$$

ρ_r : Elyaf yoğunluğu

ρ_c : Numune yoğunluğu

Yüzde matris hacim oranı (V_m);

$$V_m = \left[\frac{(M_f - M_i)}{M_i} \right] \times \rho_c / \rho_m \quad (5)$$

ρ_m : Matris yoğunluğu

Çalışma kapsamında elyaf/matris hacim oranının ASTM D 3171 test standardında tanımlanan yakma (burn-off) yöntemi ile hesaplanmasının yanı sıra 6' da verilen teorik hesaplamaya göre de hesaplanmış ve elde edilen yoğunluk değerleri karşılaştırılmıştır.

$$V_f = Nxm/hx\rho_f \quad (6)$$

V_f : Elyaf hacim oranı

N : Kumaş kat sayısı

m : Kumaş ağırlığı

h : Kompozit plakasının kalınlığı

ρ_r : Elyaf yoğunluğu

Matris malzemesine yapılan çok katmanlı karbon nano tüp katkısının üretilen kompozit malzemelerin (karbon elyaf/KNT/epoksi kompozit plaka) mekanik özellikleri üzerindeki etkisi çekme, eğme ve düzlem

içi kayma olmak üzere üç temel yükleme altında belirlenmiştir.

Üretilen kompozit plakaların çekme yükleri altındaki mekanik özellikleri 100 kN yükleme kapasitesine sahip Instron 8801 çekme test cihazı kullanılarak Afyon Kocatepe Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü bünyesindeki Kompozit Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Çekme testlerinin gerçekleştirilmesinde Series IX paket programı kullanılmıştır. Bu programa numune boyutları, hareketli çenenin çekme hızı, ekstansometre ölçü aralığı gibi bilgiler girilerek statik testler yapılmaktadır. Test sonunda akma dayanımı, çekme veya basma dayanımı gibi istenilen mekanik özellikler program tarafından hesaplanmakta ve gerilme-şekil değişim grafiği çizilmektedir. ASTM D 3039 standardına göre numuneler genişliği 25,4 mm ve boyu 250 mm olacak şekilde kesilen kompozit numunelerin farklı yönlerdeki çekme yükleri altındaki mekanik özellikleri belirlemek için çekme testleri fiber ve fibere dik yönde olmak üzere iki farklı yönde 2 mm/dk çekme hızında pozisyon kontrollü olarak yapılmıştır [27]. Çeneler arası mesafe veya çekme testi uzunluğu 120 mm olarak alınmıştır. Çekme testinden önce hazırlanmış numunelerin orta kısmı siyah-beyaz noktacıklar şeklinde boyanmıştır. Boyama işlemi siyah ve beyaz sprey boyalarla yapılmıştır. Testte her bir kuvvet uygulama yönü için yedişer adet numune kullanılmıştır.

Kompozit plakaların eğilme özellikleri, ASTM 790 [28] standardına göre numuneye üç noktadan belirli hızdaki yük uygulanması prensibine dayanan üç noktadan eğme testi ile belirlenmiştir. Kompozit plakaların üç noktadan eğilme testleri Afyon Kocatepe Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü bünyesindeki Kompozit Laboratuvarı'nda her bir kompozit plaka grubu için 25x56 mm boyutlarında en az beşer adet numune kullanılarak yapılmıştır. Yapılan test sonucunda çalışma kapsamında üretilen kompozit plaka numunelerinin eğilme gerilmesi (dayanımı) ve eğilme modülü değerleri belirlenmiştir.

Çalışma kapsamında üretilen kompozit plakaların düzlem içi kayma modülü ve kayma dayanımını da içeren düzlem içi kayma gerilmesi/kayma gerinimi tepkisinin $\pm 45^\circ$ çekme testi yöntemi ile tespiti için ISO 14129 [29] standardı kullanılmıştır. Bu test yöntemi, tek yönlü katmanlar veya tek yönlü fiber destekli kumaşlardan yapılan termoset ve termoplastik matrisli kompozit malzemelerin kullanımı için uygundur. Bu tip numuneler, numune eksenine $\pm 45^\circ$ konumunda, simetrik olarak ve numune ortadan desteklenir halde yerleştirilerek test edilmektedir. Yapılan test sonucunda çalışma kapsamında üretilen kompozit plaka numunelerinin düzlem içi kayma dayanımı ve modül modülü değerleri belirlenmiştir.

Çalışma kapsamında üretilen karbon kompozit malzemelerin termal karakterizasyonu simültane termal analiz ünitesi (TG-DTG /TG-DSC/TG) kullanılarak yapılmıştır. Simültane termal analiz iki veya daha fazla termal analiz tekniğinin aynı anda tek bir numune üzerine uygulanmasıdır. Üretilen karbon elyaf takviyeli epoksi kompozit ve karbon elyaf/KNT/epoksi kompozit plakaların termal kararlılıklarının yanı sıra matris malzemesinin modifiye edilmesinde kullanılan çok katmanlı karbon nano tüp katkısının üretilen malzemenin dekompozisyon noktası üzerindeki etkisinin belirlenmesi için TG-DTG analiz yöntemi kullanılmıştır. Üretilen kompozit malzemelerin TG-DTG analizleri, Gaziosmanpaşa Üniversitesi (Tokat), Fen Edebiyat Fakültesi, Kimya Bölümü bünyesinde mevcut olan Perkin Elmer marka simültane termal analiz cihazında dakikada 10 °C ısıtma/soğutma oranında, 35-1100 °C aralığında, azot gazı atmosferinde gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında DSC analizi, karbon elyaf takviyeli epoksi kompozit ve karbon elyaf/KNT/epoksi kompozit plakaların sabit basınçta veya sabit hacim koşuluyla birim kütle başına bir derece sıcaklığı yükseltmek için gerekli olan ısı enerjisinin bir ölçüsü olan spesifik ısı kapasitesini ölçmek için yapılmıştır. DSC analizi ile kompozit plakaların 200 °C'de ısı akışı değerleri ölçülmüş ve karşılaştırılmıştır. DSC analizleri, Gaziosmanpaşa Üniversitesi (Tokat), Fen Edebiyat Fakültesi, Kimya Bölümü bünyesinde mevcut olan Perkin Elmer marka DSC cihazında dakikada 10 °C ısıtma/soğutma oranında, 35-1100 °C aralığında, azot gazı atmosferinde gerçekleştirilmiştir.

Kompozit malzemelerde mekanik testler sonucu oluşan kırılmış veya hasarlı numunelerin kırılma yüzeylerinin incelenmesine dayanarak; takviye sistemi ile matris sistemi ara yüzeyi, matris içindeki partikül dağılımı ve matrisin takviye sistemini ıslatabilirliği gibi mikro yapı hakkında bilgi mikroskopik yöntemler kullanılarak elde edilebilir [2]. Kompozit malzemelerde yüzey karakterizasyonu ile mikro yapı hakkında bilginin yanı sıra mekanik testlerde hasarın ilerleme mekanizması hakkında da bilgi edinilebilmektedir. Üretilen kompozit malzemelerin çekme ve eğme testleri sonucu kırılmış veya hasarlı parçalarında kırılma yüzeylerinin incelenmesi ve hasar oluşma ve ilerleme mekanizmasını belirlemek için küçük büyütme değerlerinde optik mikroskop görüntüleri alınmıştır. Kompozit numunelerin optik mikroskop görüntülerinin alınmasında Süleyman Demirel Üniversitesi Tekstil Mühendisliği Bölüm Laboratuvarı'nda mevcut olan Motik marka optik mikroskop cihazı kullanılmıştır. Kompozit malzemelerde elyaf/reçine ara yüzeyi, aralarındaki etkileşim, çekme ve eğme testleri sonucu kırılmış veya hasarlı parçalarında kırılma yüzeylerinin incelenmesi ve hasar oluşumu ve ilerleme mekanizmasını daha ayrıntılı belirlemek için ise SEM (LEO 440, Computer Controlled Digital) analizleri,

Erciyes Üniversitesi, Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi'nde gerçekleştirilmiştir.

Matris malzemesine çok katmanlı karbon nano tüp katkısının kompozit malzemelerin performans özellikleri üzerinde anlamlı bir etkiye sahip olup olmadığını belirlemek amacıyla yapılan varyans analizleri için PASW Statistics 18.0 istatistiksel paket programı kullanılmıştır. Yapılan tüm istatistiksel testlerin sonuçları değerlendirilirken % 95'lik güven seviyesi dikkate alınmıştır [30].

3. Bulgular

Bu kısımda üretilen kompozit malzemelerin özelliklerini belirlemeye yönelik olarak gerçekleştirilen analiz ve testler ile elde edilen sonuçlar ve sonuçlar üzerinde etkili parametreler literatürde mevcut bulgular göz önünde bulundurularak değerlendirilmiştir. İlk olarak çalışmada üretilen kompozit plakaların performans özelliklerini belirleyen yoğunluk ve elyaf/matris hacim oranı değerleri hesaplanmıştır. Ayrıca, üretilen karbon kompozit malzemelerin karakterizasyonu mekanik, termal karakterizasyon ve yüzey karakterizasyonu olmak üzere üç farklı aşamada gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar incelenmiştir.

3.1. Kompozit malzemelerin yoğunluk değerleri

Kompozit malzemelerin yoğunluğu, malzemenin ağırlığı ve/veya termal ve dinamik özelliklerinin belirlenmesinde direkt olarak, termal iletkenlik ve boşluk içeriği özelliklerini ise dolaylı olarak etkileyen parametrelerden biridir [31]. Çalışma kapsamında üretilen karbon kompozit malzemelerin yoğunluğunun belirlenmesi için gerçekleştirilmiş test sonuçlarından elde edilen veriler Tablo 2'de özet halinde verilmiştir. Tablodaki değerler incelendiğinde, saf epoksi reçine ile üretilen kompozit plakalara ait ortalama yoğunluk değerlerinin karbon elyaf/KNT/epoksi kompozit plakaların ortalama yoğunluk değerlerinden daha yüksek olduğu görülmektedir. Matris sisteminin çok katmanlı karbon nano tüpler ile modifiye edilmesiyle üretilen kompozit plakaların yoğunluk değerindeki düşüşün, aynı ağırlığa sahip numune kalınlıklarının dolayısıyla yoğunluk ölçümü için kullanılan numune hacminin artışından kaynaklandığı düşünülmektedir. Üretim sonrası karbon elyaf/KNT/epoksi kompozit plakaların kalınlıkları (Tablo 2), saf epoksi reçine sistemi kullanılarak üretilmiş kompozit plakaların kalınlıklarından anlamlı ölçüde daha yüksek olması bu yorumu desteklemektedir. Kompozit plaka kalınlığındaki bu artış, tabakalı kompozitlerin her bir metrekaresi için eşit ağırlıkta reçine kullanımının yanı sıra üretim esnasında aynı kütleme basınç değerinin uygulanmasına rağmen gerçekleşmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, karbon elyaf/KNT/epoksi kompozit plakaların kalınlığında saf epoksi reçine

sistemi ile üretilen kompozit plaka kalınlıklarına oranla % 38,89 oranında artış gözlemlenmiştir. Yoğunluk testi sonucunda elde edilen bu sonuçlar, elyaf ve matris malzemeleri bu çalışmada kullanılan malzeme ile benzer özellikler taşıyan literatürdeki çalışmalarda değerlere çok yakındır [23, 32]. Kompozit plaka kalınlık artışı dolayısıyla yoğunluk düşüşü, epoksi matris elemanına karbon nano tüp katkısı ile termal genleşme katsayısı ve matris büzülme oranının azalması nedeniyle meydana gelmektedir [23, 33].

Tablo 2. Kompozit plaka yoğunluk ve kalınlık değerleri

Numune kodu	Kalınlık (mm)				N	Yoğunluk (g/cm ³)
	Ort.	s.s.	Maks.	Min.		
Karbon elyaf takviyeli epoksi kompozit plaka	1,81	,27641	2,20	1,42	5	1,69
Karbon elyaf/KNT/epoksi kompozit plaka	2,5	,11554	2,63	2,38	5	1,56

Ort.:Ortalama değer s.s.:Standart sapma
Maks.:Maksimum değer Min.:Minimum değer

3.2. Kompozit malzemelerin elyaf/matris hacim oranı değerleri

Elyaf/matris hacim oranı kompozit malzemelerin mekanik, fiziksel, ısı veya elektriksel özelliklerini ve kalitesini etkileyen en önemli parametrelerden biridir [25, 28]. Çalışma kapsamında üretilen karbon kompozit malzemelerin elyaf/matris hacim oranları ASTM D 3171 test standardında tanımlanan yakma (burn-off) yöntemi ve ölçülen kalınlık değerlerinin kullanıldığı teorik yöntem olmak üzere iki farklı yöntemle belirlenmiş ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bu kısımda üretilen kompozit plakaların elyaf/matris hacim oranını belirleyebilmek için firmaların ürün kataloglarından elde edilen elyaf ve matris malzeme yoğunluğunun yanı sıra ilk kısımda ölçülen kompozit malzeme yoğunluğu değerleri kullanılmıştır. Yakma (burn-off) yöntemi ile belirlenen elyaf/matris hacim oranı değerleri Tablo 3'te özetlenmiştir. Tablo 3'te verilen elyaf/matris hacim oranı değerleri incelendiğinde, karbon elyaf/KNT/epoksi kompozit plakaların matris hacim oranı değerleri, saf epoksi reçine ile üretilen kompozit plakalardan daha yüksektir. Elde edilen elyaf/matris hacim oranı değerleri, bu çalışmada kullanılan malzeme ile benzer özellikler taşıyan literatürde yer alan çalışmalarda değerlere çok yakındır [18, 23]. Tablo 4'te ise ilk kısımda ölçülen kalınlık değerleri kullanılarak teorik yöntemle hesaplanan elyaf hacim oranı değerleri verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde karbon elyaf/KNT/epoksi kompozit plakaların yüzde elyaf hacim oranı saf epoksi ile üretilen kompozit plakalardan daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Yüzde elyaf hacim oranındaki bu azalmanın, teorik yöntemle göre nihai kompozit malzemenin elyaf hacmi üzerinde direkt etkiye sahip olan kompozit plaka kalınlığındaki artışın yanı sıra karbon nano tüp katkısı ile matris

malzemesi viskozite değerinin artmasından kaynaklandığı düşünülmektedir [18, 23].

Tablo 5'te ise, Independent-Sample t Testi ile çalışma kapsamında yakma (burn-off) ve teorik yöntem olmak üzere iki farklı yöntemle belirlenen ortalama elyaf hacim oranı değerleri arasında istatistiksel olarak anlamlı farklılıkların olmadığı belirlenmiştir ($p=0,991>0,05$). Yakma (burn-off) ve teorik yöntem olmak üzere iki farklı yöntemle belirlenen ortalama elyaf hacim oranı değerleri arasında istatistiksel olarak anlamlı farklılığın olmaması; çalışma kapsamında kompozit malzeme üretim için seçilen yöntemin teorikte hesaplanan kompozit malzeme tasarım özelliklerinin elde edilmesi için uygun olduğunu göstermektedir.

Tablo 3. Yakma(burn-off) yöntemi ile belirlenen elyaf/matris hacim oranı değerleri

Numune kodu	Elyaf hacim oranı (%)	Matris hacim oranı (%)	Elyaf ağırlık oranı (%)
Karbon elyaf takviyeli epoksi kompozit plaka	53,44	42,82	54,28
Karbon elyaf/KNT/epoksi kompozit plaka	41,204	51,7	46,392

Tablo 4. Ölçülen kalınlık değerleri kullanılarak teorik yöntemle hesaplanan elyaf hacim oranı değerleri

Numune kodu	Kalınlık (mm)				Elyaf hacim oranı (%)			
	Ort	s.s.	Maks.	Min.	Ort.	s.s.	Maks.	Min.
Karbon elyaf takviyeli epoksi kompozit plaka	1,81	0,25	2,20	1,42	53,08	16,76	67,3	43,6
Karbon elyaf/KNT/epoksi kompozit plaka	2,5	0,10	2,6	2,39	38,43	2,29	40,2	36,9

Ort.:Ortalama değer s.s.:Standart sapma
Maks.:Maksimum değer Min.:Minimum değer

Tablo 5. Yakma (burn-off) ve teorik yöntemle belirlenen kompozit plaka ortalama elyaf hacim oranlarının Independent-Sample t Testi ile karşılaştırılması

Yöntem	t	df	Sig. (2 kuyruklu)	Ortalama fark	Standart hata farkı
Yakma yöntemi ile belirlenen kompozit plaka elyaf hacim oranı (%)	0,11	18	0,991	0,4689	4,16267
Teorik yöntem ile belirlenen kompozit plaka elyaf hacim oranı (%)	0,11	58,966	0,991	0,4689	4,16267

df:Serbestlik derecesi

3.3. Kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi

3.3.1. Çekme testi sonuçları

Karbon elyaf takviyeli epoksi kompozit ve karbon elyaf/KNT/epoksi kompozit plakaların mekanik kararlılıkları çekme testi verileri kullanılarak belirlenmiştir. Ayrıca, termoset epoksi reçine polimer matris malzemesinin modifiye edilmesi için kullanılan çok katmanlı karbon nano tüp modifikasyonunun, üretilen kompozit plakaların mekanik özellikleri üzerindeki etkisi de çekme testi verileri ile analiz edilmiştir. Testte her bir kuvvet uygulama yönü için yedişer adet numune kullanılmış ve analiz sonucunda kompozit malzeme numunelerinin çekme gerilmesi, elastik modül ve % şekil değişimi değerleri elde edilmiştir.

Karbon elyaf takviyeli epoksi ve karbon elyaf/KNT/epoksi kompozit plakaya ait fiber yönündeki çekme testi sonuçları Tablo 6'da verilmiştir. Karbon elyaf takviyeli epoksi ait fiber yönünde gerçekleştirilen çekme testi sonuçları incelendiğinde bu numune için ortalama maksimum çekme gerilmesi, elastik modülü ve % şekil değişimi 425,64 MPa, 62,92 GPa ve 0,77'dir. Karbon elyaf/KNT/epoksi kompozit plakanın fiber yönündeki çekme test sonuçları incelendiğinde ise ortalama maksimum çekme gerilmesi, elastik modül ve % şekil değişim değerlerinin 484 MPa, 76,87 GPa, 0,85 olduğu gözlemlenmiştir. Karbon elyaf takviyeli epoksi ve karbon elyaf/KNT/epoksi kompozit fiber yönündeki çekme testi sonuçları karşılaştırıldığında; karbon nano tüp modifikasyonu yapılan kompozit malzeme numunesinin özelliklerinin yüksek olduğu

Tablo 6. Kompozit plakalara fiber yönünde yapılan çekme testi sonuçları

	Elastik modül (GPa)				Maksimum şekil değişimi (%)				Maksimum çekme gerilmesi (MPa)			
	Ort.	s.s.	Maks.	Min.	Ort.	s.s.	Maks.	Min.	Ort.	s.s.	Maks.	Min.
Test sayısı	7				7				7			
Karbon elyaf takviyeli epoksi kompozit plaka	62,92	3,61	65,8	43,5	0,77	0,09	0,99	0,62	425,64	06,27	652	579
Karbon elyaf/KNT/epoksi kompozit plaka	76,87	9,57	88,1	64,8	0,85	0,18	1,16	0,66	484	98,91	575	305
Mutlak fark	13,95				0,08				58,36			
% fark	22,17				10,39				1371			

Ort.:Ortalama değer s.s.:Standart sapma
Maks.:Maksimum değer Min.:Minimum değer

Tablo 7. Kompozit plakalara fibere dik yönde yapılan çekme testi sonuçları

	Elastik modül (GPa)				Maksimum şekil değişimi (%)				Maksimum çekme gerilmesi(MPa)			
	Ort.	s.s.	Maks.	Min.	Ort.	s.s.	Maks.	Min.	Ort.	s.s.	Maks.	Min.
Test sayısı	7				7				7			
Karbon elyaf takviyeli epoksi kompozit plaka	55,78	5,58	62,2	54,3	0,77	0,16	0,98	0,57	423,67	65,73	478	418
Karbon elyaf/KNT/epoksi kompozit plaka	59,91	6,30	65,9	46,1	0,8	0,09	0,90	0,68	441,33	87,18	561	314
Mutlak fark	4,13				0,03				17,66			
% fark	7,40				3,9				10,38			

Ort.:Ortalama değer s.s.:Standart sapma
Maks.:Maksimum değer Min.:Minimum değer

Tablo 8. Karbon elyaf takviyeli epoksi kompozit ve karbon elyaf/KNT/epoksi kompozit plakalara ait eğilme testi sonuçları

Numune	Eğilme gerilmesi (MPa)	Eğilme modülü (GPa)
	(s.s)	(s.s)
Karbon elyaf takviyeli epoksi kompozit plaka	372 (±1,7)	41,1 (±1,26)
Karbon elyaf/KNT/epoksi kompozit plaka	427 (±1,7)	42,1 (±5,32)

s.s.:Standart sapma

Tablo 9. Kompozit plakalara ait düzlem içi kayma testi sonuçları

Numune	Düzlem içi kayma gerilmesi (MPa)	Düzlem içi kayma modülü (GPa)
	(s.s)	(s.s)
Karbon elyaf takviyeli epoksi kompozit plaka	72 (±2,7)	3,51 (±1,26)
Karbon elyaf/KNT/epoksi kompozit plaka	73,4 (±1,11)	4,1 (±2,92)
Yüzde artış/azalış (%)	+1,94	+16,4

s.s.:Standart sapma

gözlemlenmiştir. Karbon elyaf takviyeli epoksi ve karbon elyaf/KNT/epoksi kompozit plakaların fibere dik yöndeki çekme testi sonuçları ise Tablo 7'de verilmiştir. Fibere dik yöndeki çekme testi sonuçları karşılaştırıldığında, karbon nano tüp modifikasyonu yapılan karbon elyaf/KNT/epoksi kompozit malzeme numunesinin mekanik özelliklerinin fiber yönündeki gibi karbon elyaf/epoksi kompozit malzemeden yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Tablo 6 ve 7'de özetlenen çekme analizi sonuçları değerlendirildiğinde hem fiber hem de fibere dik yönde maksimum çekme gerilmesi, elastisite modülü ve % şekil değiştirme değerlerindeki artış; çok katmanlı karbon nano tüp katkısının kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini iyileştirdiğini göstermektedir. Karbon elyaf takviyeli polimerik kompozit malzemelerin çekme gerilmesi ve elastik modül değerleri, yapılarında yer alan elyaf fazı ve matris etkileşimi tarafından belirlenmektedir. Bu nedenle matris mukavemeti, rijitliği ve takviye elemanı-matris ara yüzey etkileşimindeki iyileştirmeler kompozit malzeme mukavemet özelliklerini etkilemektedir. Literatürdeki benzer çalışmalarda da belirtildiği gibi karbon nano tüp modifikasyonu ile uygulanan enerjinin karbon nano tüplerin epoksi matris yapısından ayrılması, karbon nano tüp kırılması ve çatlak yayılması gibi ekstra enerjilere dönüşümü nedeniyle mekanik özelliklerde iyileşmeler meydana gelmektedir. Bunun yanı sıra matris yapısındaki karbon nano tüp katkısı çatlak oluşumuna karşı bariyer efekti oluşturur ve bu etki çatlak oluşumundan sonra bile matris malzemesinin dışarıdan gelen yükü taşımasını sağlamaktadır [9, 18, 20, 23, 34].

3.3.2. Eğilme testi sonuçları

Çalışma kapsamında, karbon elyaf takviyeli epoksi ve karbon elyaf/KNT/epoksi kompozit plakaların eğilme özellikleri, ASTM D790 [28] standardına göre numuneye üç noktadan belirli hızdaki yük uygulanması prensibine dayanan üç noktadan eğme testi ile belirlenmiştir. Yapılan test sonucunda çalışma kapsamında üretilen kompozit plaka numunelerinin eğilme gerilmesi (dayanımı) ve eğilme modülü değerleri belirlenmiştir. Üretilen kompozit numunelere ait eğilme testi sonuçları Tablo 8'de özet olarak verilmiştir. Tablodaki veriler incelendiğinde kompozit plakalara ait eğilme gerilmesi ve eğilme modülü değerlerinin matris malzemesine yapılan karbon nano tüp modifikasyonu ile yaklaşık olarak % 14,78 ve % 2,43 oranında arttığı gözlemlenmiştir. Eğilme gerilmesi ve modülündeki bu artış matris malzemesi yapısında yer alan karbon nano tüplerin köprü etkisi ile çatlak oluşumunu engellemesinden kaynaklanmaktadır [9].

3.3.3. Düzlem içi kayma testi sonuçları

Çalışma kapsamında üretilen kompozit plakaların düzlem içi kayma modülü ve kayma dayanımını da

içeren düzlem içi kayma gerilmesi/kayma gerinimi tepkisinin $\pm 45^\circ$ çekme testi yöntemi ile tespiti için ISO 14129 [29] standardı kullanılmıştır. Yapılan test sonucunda çalışma kapsamında üretilen kompozit plaka numunelerinin düzlem içi kayma dayanımı ve modülü değerleri belirlenmiştir. Tablo 9'da çalışma kapsamında üretilen kompozit numunelere ait düzlem içi kayma testi sonuçları verilmiştir. Düzlem içi kayma gerilmesi ve modülündeki artış matris malzemesi yapısında yer alan karbon nano tüplerin nano ölçekte köprü etkisi oluşturmaktan kaynaklanmaktadır [20]. Karbon elyaf takviyeli kompozit malzemelerin düzlem içi kayma gerilmesi ve modülünde matris malzemesine karbon nano tüp takviyesiyle meydana gelen iyileşme, elyaf takviyeli kompozit malzeme endüstrisi için önemlidir. Düzlem içi kayma gerilim özelliklerinin iyileştirilmesi; karbon elyaf takviyeli kompozit malzemelere özellikle çok yönlü kuvvetlerin söz konusu olduğu ve düzlem içi kayma gerilim değerlerinin kompozit performans özelliklerini belirlediği patlama veya sismik olaylardan korunma gibi yeni kullanım alanı olanağı sunmaktadır.

3.4. Kompozit malzemelerin termal özelliklerinin belirlenmesi

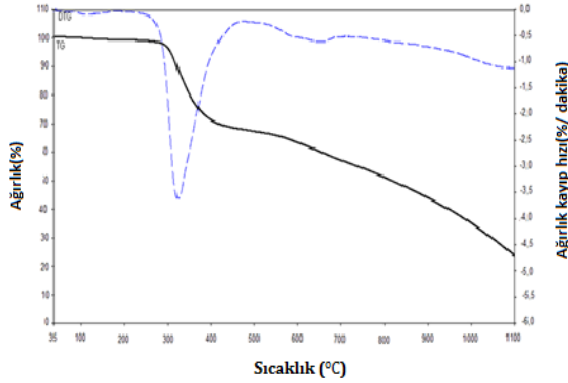
3.4.1. TG-DTG analiz sonuçları

Çalışmanın bu bölümünde üretilen karbon elyaf takviyeli epoksi kompozit ve karbon elyaf/KNT/epoksi kompozit plakaların termal kararlılıklarını belirlemek için yapılan TG-DTG analiz sonuçları verilmiştir. Ayrıca, termoset epoksi reçine polimer matris malzemesinin modifiye edilmesi için kullanılan çok katmanlı karbon nano tüp katkısının üretilen kompozit plakaların dekompozisyon noktası (bozunma sıcaklığı) üzerindeki etkisi de analiz sonuçları kullanılarak belirlenmiştir [20]. TG-DTG analizleri inert azot gazı atmosferinde, 5-10 mg numune kullanılarak, 35-1100 °C sıcaklık aralığında, 10 °C/dk ısıtma hızı ile yapılmış ve sıcaklık artışından dolayı meydana gelen kütle kayıpları tespit edilmiştir. Elde edilen sıcaklık-kütle kaybı grafiğinden, kimyasal bağ kırılmasının meydana geldiği sıcaklık değeri dekompozisyon (bozunma sıcaklığı) olarak belirlenmiştir.

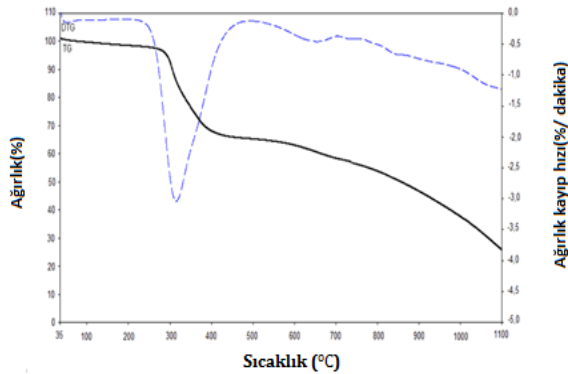
Karbon elyaf takviyeli epoksi kompozit plakaya ait TG-DTG eğrisi (Şekil 2) incelendiğinde 35 °C'de sıcaklığa bağlı olarak bir miktar kütle artışı ve yaklaşık 100 °C'nin üzerinde kütle kaybı gözlenmeye başlandığı görülmektedir. Bunun yanı sıra kütle kaybının da iki basamakta gerçekleştiği gözlemlenmektedir. İlk basamakta yani 135-479 °C arasında malzeme yapısındaki uçucu ürünlerin ve matris malzemesi epoksi reçinenin ayrışması sonucu kompozit plakanın % 31,86'sını kaybettiği görülmüştür. Karbon elyaf takviyeli epoksi kompozit plakaya ait dekompozisyon noktası ise 311,39 °C'de gözlemlenen keskin DTG piki ile belirlenmiştir. İkinci

bozunma ise 479-1100 °C aralığında gerçekleşmiştir. Bu basamakta yaklaşık olarak % 44,06 oranında gerçekleşen kütle kaybı kompozit plaka yapısındaki matris malzemesinin yanı sıra takviye elemanı olarak kullanılan karbon elyafın da bozunmaya başlamasından kaynaklanmaktadır. 1100 °C sonunda kompozit malzeme numunesinin % 24,08'inin kaldığı gözlemlenmiştir.

Karbon elyaf/KNT/epoksi kompozit plaka ait TG-DTG eğrisi Şekil 3'te verilmiştir. TG-DTG eğrisi incelendiğinde; 35 °C'de sıcaklığa bağlı olarak oksitlenmeden dolayı bir miktar kütle artışı ve yaklaşık 100 °C'nin üzerinde kütle kaybı söz konusudur. 100 °C'nin üzerinde başlayan kompozit malzeme bozunmasının Şekil 3'e göre iki basamakta gerçekleştiği tespit edilmiştir. İlk bozunma basamağı 103-489 °C aralığında ve kütle kaybı % 34,26'dır. DTG eğrisi incelendiğinde ise karbon elyaf/KNT/epoksi kompozit malzemeye ait dekompozisyon noktasının 319,05 °C olduğu görülmektedir. İkinci basamak yani 489-1100 °C aralığında ise % 39,52'lik bir kütle kaybı gerçekleştiği ve 1100 °C sonunda kompozit plaka kütlelerinin yaklaşık % 26,22'sinin kaldığı tespit edilmiştir.



Şekil 2. Karbon elyaf takviyeli epoksi kompozit plakaya ait TG-DTG eğrisi (TGA:tam çizgi, DTG:kesikli çizgi)



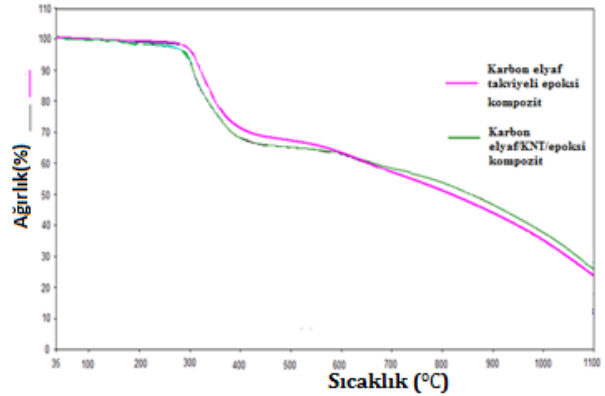
Şekil 3. Karbon elyaf/KNT/epoksi kompozit plakaya ait TG-DTG eğrisi (TGA:tam çizgi, DTG:kesikli çizgi)

Karbon elyaf takviyeli epoksi kompozit ve karbon elyaf/KNT/epoksi kompozit malzemenin Şekil 4'teki üst üste çakıştırılmış TG-DTG eğrileri ve Tablo

10'daki sayısal veriler karşılaştırıldığında; karbon nano tüp ile modifiye edilmiş kompozit malzemede gözlemlenen toplam kütle kaybı % 2,14 oranında daha azdır. Bunun yanı sıra çok katmanlı karbon nano tüp katkısı içeren kompozit malzeme dekompozisyon noktasının 7,15 °C daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Toplam kütle kaybındaki azalış ve dekompozisyon noktasındaki artış, literatürdeki benzer çalışmalarda da belirtildiği gibi karbon nano tüplerin yüksek ısıl kararlılık özelliği ve uçucu ürünler için dekompozisyon esnasında güçlü bir bariyer efekti oluşturması; saf epoksi matrisin dolayısıyla karbon elyaf takviyeli/epoksi kompozit plakaların termal kararlılığının artmasını sağlamıştır [9, 18, 35].

Tablo 10. Kompozit plaka örneklerinin TG-DTG eğrilerinden elde edilen sonuçlarının karşılaştırılması

Numune kodu	Sıcaklık aralığı (°C)	Kütle kaybı (%)	Bozunma sıcaklığı (°C)	Toplam kütle kaybı (%)
Karbon elyaf takviyeli epoksi kompozit plaka	103-489	31,86	311,39	75,92
	489-1100	44,06		
Karbon elyaf/KNT/epoksi kompozit plaka	135-479	34,26	319,05	73,78
	479-1100	39,52		



Şekil 4. Kompozit plaka numunelerine ait üst üste çakıştırılmış TG pikleri

3.4.2. DSC analiz sonuçları

Karbon elyaf takviyeli epoksi kompozit ve karbon elyaf/KNT/epoksi kompozit plakaların sabit basınçta veya sabit hacim koşuluyla birim kütle başına bir derece sıcaklığı yükseltmek için gerekli olan ısı enerjisinin bir ölçüsü olan spesifik ısı kapasitesini ölçmek için yapılan DSC analiz sonuçları bu bölümde verilmiştir. DSC analizi ile kompozit plakaların 200 °C'de ısı akışı değerleri ölçülmüş ve karşılaştırılmıştır. Şekil 5 (a)'da karbon elyaf takviyeli epoksi kompozit plakaya ait DSC eğrisi verilmiştir. DSC eğrisindeki verilere göre 200 °C'de ısı akışı değeri 1,13 mW/mg'dir. Şekil 5 (b)'deki karbon elyaf/KNT/epoksi kompozit plakasına ait DSC eğrisindeki verilere göre 200 °C'de ısı akışı değeri 0,64 mW/mg'dir. Karbon elyaf/KNT/epoksi kompozit plakasının 200 °C'deki ısı akışı değeri, karbon nano tüp

katkısız karbon elyaf takviyeli epoksi kompozit kompozit plakanın 200 °C' deki ısı akışı değerinden daha düşüktür.

0,64-1,13 mW/mg aralığında değişen kompozit plaka spesifik ısı kapasitesi değerlerinin literatürde benzer özellikteki malzemelerle yapılan çalışmalarda elde edilen spesifik ısı değerlerine yakın olduğu görülmektedir [20, 36]. Ayrıca dokuma karbon elyaf takviyeli kompozit plakaların matris elemanına yapılan çok katmanlı karbon nano tüp katkısı kompozit plakaların spesifik ısı kapasitesini yaklaşık olarak % 43,36 oranında düşürmüştür. Spesifik ısı kapasitesindeki düşüş, matris yapısının modifiye edilmesinde kullanılan çok katmanlı karbon nano tüplerin yüksek termal iletkenliğinden kaynaklanmaktadır. Matris yapısındaki çok katmanlı karbon nano tüpler ile epoksi reçine arasında karbon nano tüplerin nanometrik boyutu nedeniyle oluşan ara yüzey güçlü bir fonon (parçacığımsı) dağılımına sahiptir dolayısıyla foton iletiminin azalmasına neden olmaktadır. Foton iletimindeki azalma yapının termal iletkenlik özelliğinin artmasını sağlamaktadır. Ayrıca çok katmanlı karbon nano tüplerin tek katmanlı karbon nano tüplerden daha geniş çapa sahip olması, epoksi reçinelerin ısı iletkenliği artırmada ve daha etkili termal iletkenlik sağlamaktadır [37].

3.5. Kırık yüzey karakterizasyonu

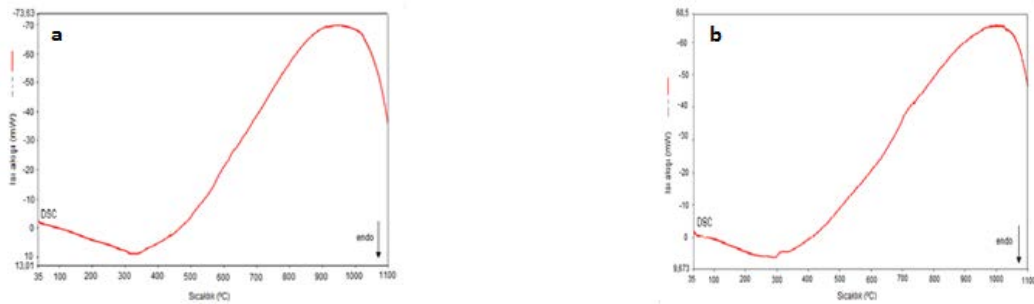
3.5.1. Optik mikroskop görüntüleri

Çekme testi sonucu kırılmış kompozit numunelerinin çekme testi öncesi görüntüleri ve çekme testi sonrası kırılma bölgelerinin optik mikroskop görüntüleri Şekil 6-7'de verilmiştir. Çekme testlerinde saf epoksi reçine sistemi ile üretilmiş karbon kompozit numuneler birkaç bölgede hasar oluşmakla genellikle iki noktadan kırılmaktadır. Bunun yanı sıra saf epoksi reçine sistemi ile üretilen kompozit numunelerin kırılma bölgeleri incelendiğinde çekme kuvvetinin etkisi ile özellikle tabaka ayrılma hasarların ilerlemesi sonucu kaba ve düz olmayan bir kırılma bölgesi olduğu gözlemlenmiştir. Matris malzemesine karbon nano tüp modifikasyonu yapılan

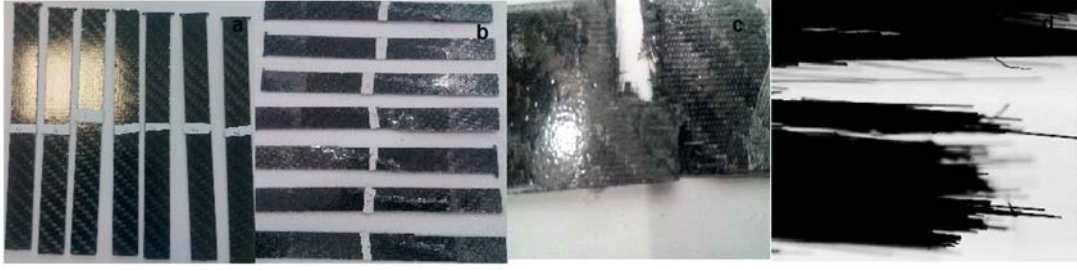
dokuma karbon kumaşlara ait optik mikroskop görüntüleri incelendiğinde ise numune kırılmaları genellikle tek noktada oluşurken kırılma yüzeyleri incelendiğinde tabaka ve elyaf ayrılmalarının oluşmadığı ve düz bir kırılma bölgesinin olduğu gözlemlenmiştir.

3.5.2. SEM görüntüleri

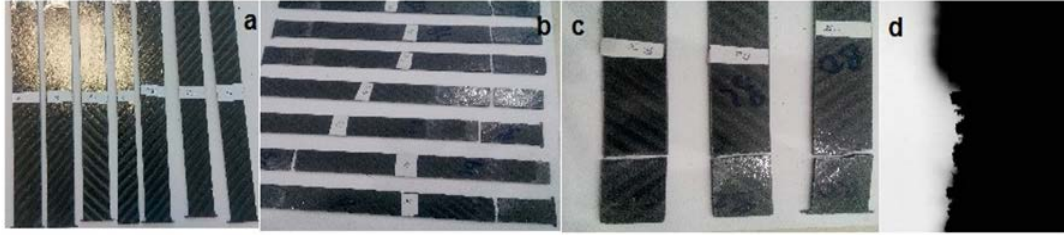
Bu bölümde çekme testi sonrası çalışma kapsamında üretilmiş kompozit malzemelerin kırılma yüzeyleri SEM ile incelenmiştir. Çekme testi sonrası kırılma bölgelerinin SEM görüntüleri Şekil 8(a)-(b)'de verilmiştir. Saf epoksi reçine ile üretilen kompozit malzemelerde tabakalar arası çatlak oluşumu, elyaf kopması ve tabaka ayrılmaları gözlemlenmektedir. Bu görüntülerde numune boyu ve eni doğrultusundaki elyaf demetleri, dokuma tipi, üretimden kaynaklanan boşluklar, genellikle boşluk kenarlarından başlayan ve ilerleyen çatlak izleri görülmektedir. Ayrıca, karbon elyaf ve epoksi reçine sistemi arasındaki rijitite farklılığı nedeniyle takviye elemanı-matris ara yüzeyi çatlak başlangıç bölgesidir. Epoksi reçinenin gevrek kırılmasını gösteren nehir birleşmeleri şeklinde çatlak ilerleme izleri görülmektedir. Nehir birleşmeleri şeklindeki izlerin yanı sıra tabaka ayrılma yüzeylerinde sık karşılaşılan diğer bir özellik, tabakalar veya elyaflar arasında oluşan kesme gerilmelerinin oluşturduğu matris malzeme mikro-çatlaklarının birleşmesi sonucu meydana gelen çıkıntılardır (hackles) (Şekil 8(a)). Karbon elyaf/KNT/epoksi kompozit malzeme örneklerine ait SEM görüntüleri incelendiğinde ise tabakalararası kopmalar ve ayrılmalar yerine kırılma yüzeyinde çok sayıda mikro çatlak olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 8(b)). Bu tip kompozit malzemelerde çok katmanlı karbon nano tüp/epoksi ara yüzeyi, takviye elemanı-matris ara yüzeyindeki gerilim konsantrasyonunu azalmaktadır. Dolayısıyla hem takviye elemanı-matris ara yüzeyi doğrultusunda hem de dik doğrultuda çatlak ilerlemeleri azalmaktadır [38, 39].



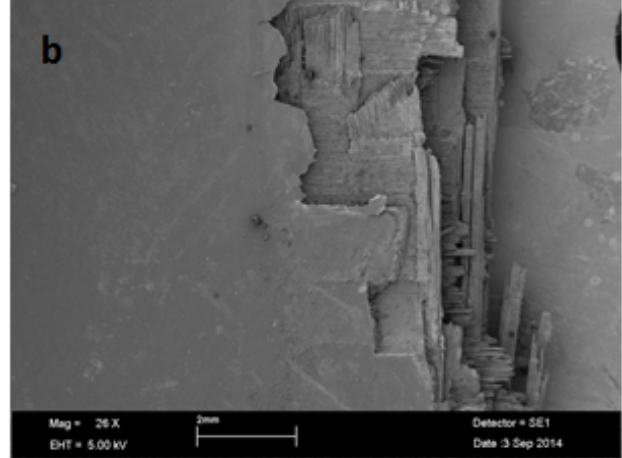
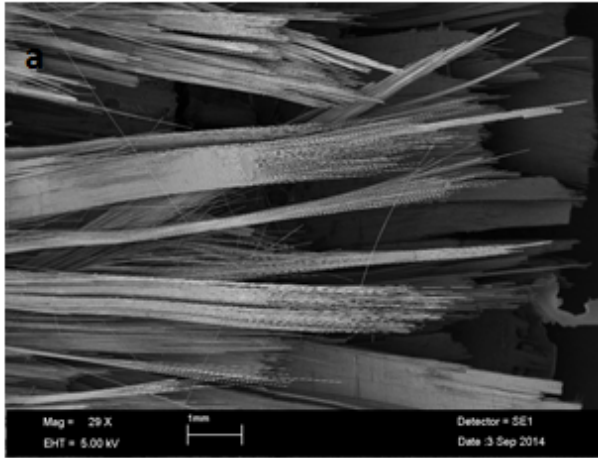
Şekil 5. Karbon elyaf takviyeli epoksi (a) ve karbon elyaf/KNT/epoksi (b) kompozit plakalara ait TG/DTA cihazında alınan DSC eğrisi



Şekil 6. Karbon elyaf takviyeli epoksi kompozit plakaya ait çekme testi öncesi (a), sonrası (b), hasar bölgesi (c), optik mikroskop görüntüsü (d) (4x)



Şekil 7. Karbon elyaf/KNT/epoksi kompozit plakaya ait çekme testi öncesi (a), sonrası (b), hasar bölgesi (c), optik mikroskop görüntüsü (d) (4x)



Şekil 8. Karbon elyaf takviyeli epoksi (a) ve karbon elyaf/KNT/epoksi kompozit (b) plakalara ait SEM görüntüsü

4. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışma kapsamında elle yatırma metodu ile karbon elyaf takviyeli-karbon nano tüp ile modifiye edilmiş epoksi kompozit malzemelerin üretimi hedeflenmiştir. Bu hedef doğrultusunda ilk olarak saf epoksi matris elemanının çok duvarlı karbon nano tüplerle modifikasyonu yapılarak epoksi karbon kompozitler üretilmiş ve üretilen bu nanokompozitler, üç fazlı kompozit malzeme üretiminde matris elemanı olarak kullanılmıştır. Epoksi matris elemanına yapılan çok duvarlı karbon nano tüp katkısının kompozit malzeme performans özellikleri üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla mekanik, termal ve yüzey karakterizasyonu yapılmış ve analiz sonuçları saf epoksi reçine ile üretilen kompozit malzeme özellikleri ile karşılaştırılmıştır.

Çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde;

- Üretilen kompozit malzemelerin yoğunluk değerleri, matris malzemesine yapılan yaklaşık % 0,3 oranındaki karbon nano tüp katkısı ile yaklaşık olarak % 7,69 oranında azaldığı tespit edilmiştir. Yoğunluk değerindeki bu azalışa karbon nano tüp katkısı ile kompozit plaka kalınlığının dolayısıyla hacim değerindeki artış neden olmaktadır.
- Kompozit malzemelerin performans özellikleri üzerinde etkiye sahip olan elyaf/matris hacim oranı değerleri teorik yöntem ve yakma (burn off) yöntemi olmak üzere iki farklı yöntemle belirlenmiştir. Teorik yöntemle hesaplanan değerler ile yakma (burn off) yöntemiyle elde edilen elyaf/matris hacim oranı değerleri arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark yoktur. İki yöntemle elde edilen elyaf/matris hacim oranı değerleri arasında anlamlı bir farkın olmaması kompozit malzeme üretiminde kullanılan üretim yönteminin takviye ve matris malzemesine

uygunluğunu göstermektedir. Yakma (burn off) yöntemine göre kompozit plaka elyaf hacim oranı; karbon nano tüp modifikasyonu ile % 53,44 değerinden % 41,204'e düşmüştür. Tabakalı polimerik kompozit malzemelerde elyaf hacim oranı düştükçe, kompozit malzeme mekanik özelliklerinin de kötüleşmesi beklenmektedir. Ancak, çalışma kapsamında matris malzemesinin çok katmanlı karbon nano tüplerle modifikasyonu elyaf-matris ara yüzey etkileşimini artırarak karbon elyaf-matris malzemesi yapışma oranını artırmanın yanı sıra dışardan uygulanan kuvvetlere karşı bariyer efekti göstermektedir. Dolayısıyla matris yapısına eklenen nano ölçekteki karbon nano tüpler ile üretilen kompozit malzemede elyaf hacim oranının azalmasına rağmen malzeme mekanik özellikleri iyileşmektedir.

- Mekanik karakterizasyon aşamasında ise hem fibere dik yönde hem de fiber yönünde gerçekleştirilen çekme test sonuçları; karbon nano tüp ile matris modifikasyonun kompozit performans özelliklerini iyileştirdiğini göstermektedir. Ayrıca, eğilme ve düzlem içi kayma testleri sonucunda elde edilen veriler de matris malzemesi modifikasyonu ile kompozit malzeme mekanik performansının iyileştiği sonucunu desteklemektedir.

- Karbon elyaf/KNT/epoksi kompozit malzemenin TG-DTG analiz sonuçları da çok katmanlı karbon nano tüp modifikasyonu ile dokuma karbon elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin termal kararlılıkları ve dekompozisyon noktasında iyileşme elde edildiğini göstermektedir. Toplam kütle kaybındaki azalış ve dekompozisyon noktasındaki artış, karbon nano tüplerin yüksek ısıl kararlılık özelliği ve uçucu ürünler için dekompozisyon esnasında güçlü bir bariyer efekti oluşturması sayesinde gerçekleşmiştir. Ayrıca yapılan DSC analizi ile karbon nano tüp katkısı ile 200 °C'de ısı akışı değeri yaklaşık olarak % 43,36 oranında azalmıştır. Hem TG-DTG hem DSC analizlerinde elde edilen veriler, matris malzemesine karbon nano tüp katkısı elyaf takviyeli kompozit malzemelerin termal performansını iyileştirildiğinin kanıtıdır.

- Çekme testi sonrasında numunelerin kırılma yüzeylerinden alınan optik mikroskop görüntülerinde karbon nano tüp katkısı yapılmış kompozit malzeme numunelerinde daha düzgün kırık bölgesi gözlemlenmektedir. Bunun yanı sıra SEM analizlerinde de karbon nano tüp katkısı yapılmamış numunelerde kırılma yüzeylerinde, elyaf kırılmaları ve tabakalar arası ayrılmalar gözlemlenirken karbon elyaf/KNT/epoksi kompozit numunelerinde ise kopmalar ve ayrılmalar yerine kırılma yüzeyinde çok sayıda mikro çatlaklar görülmektedir. SEM ve optik mikroskop görüntüleri de mekanik karakterizasyon aşamasında elde kompozit malzeme performans iyileşmesini desteklemektedir.

Elyaf takviyeli polimerik kompozit malzemelerde matris malzemesi olarak çok sık kullanıma sahip epoksi reçine sistemine karbon nano tüp dispersiyonu ile mekanik, termal ve yüzey özelliklerinde elde edilen iyileşmeler, elyaf takviyeli polimerik kompozit malzemelerin kullanım alanının genişlemesine katkıda bulunacaktır. Çalışma kapsamında üretilen kompozit yapılar sadece otomotiv (tampon ve diğer parçalarda), rüzgar gülü pervanesi gibi endüstriyel parçalar ya da havacılık (yapısal parçalar ve iç mekan) sektöründe değil özellikle düzlem içi kayma gerilim özelliklerinin iyileştirilmesi sayesinde çok yönlü kuvvetlerin söz konusu olduğu ve düzlem içi kayma gerilim değerlerinin kompozit performans özelliklerini belirlediği patlama veya sismik olaylardan korunma (bina ve inşaat sektöründe deprem koruma amaçlı) gibi yeni sektörlerde de kullanılmaya uygundur. Ayrıca, kompozit malzemelerin üretiminde farklı üretim metotları, epoksi/karbon nano tüp dispersiyonların hazırlanmasında farklı karıştırma metotları gibi tekniklerin geliştirilmesinin yanı sıra karbon nano tüp yüzeyinin farklı kimyasal gruplarla kimyasal işlemlerle fonksiyonelleştirilmesi, üretilen malzemelerin özelliklerinin geliştirilmesine katkı sağlayabilir. Bu alanda yapılacak olan araştırmalar yeni nesil kompozit malzeme üretimine olanak sağlayacaktır.

Teşekkür

Bu çalışma Süleyman Demirel Üniversitesi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Öğretim Üyesi Yetiştirme Koordinatörlüğü tarafından (Proje no: 05424-YL-12) yüksek lisans çalışması olarak desteklenmiştir. Yazarlar ayrıca kompozit plakaların üretiminde yardımlarını esirgemeyen Uşak Üniversitesi, Makine Mühendisliği Öğretim Üyesi Doç. Dr. Mehmet AKTAŞ ve Süleyman Demirel Üniversitesi, İmalat Mühendisliği Öğretim Üyesi Doç. Dr. Oğuz Çolak'a teşekkürlerini sunar.

Kaynakça

- [1] Şahin, Y., 2000. Kompozit Malzemelere Giriş. Gazi Kitabevi, 1-16, 37- 41, 65-68, 79-88, Ankara.
- [2] Demirel, A., 2007. Karbon Elyaf Takviyeli Epoksi Kompozit Malzemelerin Karakterizasyonu. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 135s, Ankara.
- [3] Acar, V., Akbulut, H., Sarıkanat, M., Seydibeyoğlu, M.Ö., Seki Y., Erden S., 2013. Karbon Elyaf Takviyeli Prepreg Kompozitlerde Arayüzey Mekanizmasının Karbon Nanoyapı Katkısıyla İyileştirilmesi. Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi, 10, 43-51.

- [4] Lubineau, G., Rahaman, A., 2012. A Review of Strategies for Improving the Degradation Properties of Laminated Continuous-Fiber/Epoxy Composites with Carbon-Based Nanoreinforcements. *Carbon*, 50, 2377-2395.
- [5] Hudnut, S.W., Chung, D.D.L., 1995. Use of Submicron Diameter Carbon Filaments for Reinforcement Between Continuous Carbon-Fiber Layers in a Polymer-Matrix Composite. *Carbon*, 33(11):1627-31.
- [6] Thostenson, E.T., Chou, T.W., 2002. Aligned Multi-walled Carbon Nanotube-Reinforced Composites: Processing and Mechanical Characterization. *J Phys D: Appl Phys*, 35(16):L77.
- [7] Bai, J., Allaoui, A., 2003. Effect of the Length and the Aggregate Size of MWNTs on the Improvement Efficiency of the Mechanical and Electrical Properties of Nanocomposites-Experimental Investigation. *Compos A*, 34, 689-694.
- [8] Gojny, F., Wichmann, M., Fiedler, B., Schulte, K., 2005. Influence of Different Carbon Nanotubes on the Mechanical Properties of Epoxy Matrix Composites-A Comparative Study. *Compos Sci Technol*, 65, 2300-2313.
- [9] Zhou, Y., Pervin, F., Lewis, L., Jeelani, S., 2008. Fabrication and Characterization of Carbon/Epoxy Composites Mixed with Multi-walled Carbon Nanotubes. *Mater Sci Eng A*, 475, 157-65.
- [10] Wicks S.S. et al., 2009. Interlaminar Fracture Toughness of a Woven Advanced Composite Reinforced with Aligned Carbon Nanotubes. In: 50th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, Palm Springs, CA.
- [11] Yamamoto, N., Guzman de Villoria, R., Wardle, B.L., 2012. Electrical and Thermal Property Enhancement of Fiber-Reinforced Polymer Laminate Composites Through Controlled Implementation of Multi-walled Carbon Nanotubes. *Composites Science and Technology*, 72, 2009-2015.
- [12] Thostenson, E.T., Li, W.Z., Wang, D.Z., Ren, Z.F., Chou, T.W.J., 2002. *Appl.Phys.* 2002, 91, 6034-6037.
- [13] Thostenson, E.T., 2003. Carbon Nanotube-Reinforced Composites: Processing, Characterization and Modeling. Ph.D. Thesis, University of Delaware.
- [14] Kashiwagi T et al., 2005. Nanoparticle Networks Reduce the Flammability of Polymer Nanocomposites. *Nat Mater.*, 4(12):928-33.
- [15] Koo, J., 2006. *Polymer Nanocomposites: Processing, Characterization, and Applications.* McGraw-Hill.
- [16] Vlasveld, D.P.N., Bersee, H.E.N., Picken, S.J., 2005. Nanocomposite Matrix for Increased Fibre Composite Strength. *Polymer*, 46(23):10269-78.
- [17] Çelep, Ş., 2007. *Nanoteknoloji ve Tekstilde Uygulama Alanları, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, 171, Adana.
- [18] De Greef, N., Gorbatikh, L., Lomov, S.V., Verpoest, I., 2011. Damage Development in Woven Carbon Fiber/Epoxy Composites Modified with Carbon Nanotubes Under Tension in the Bias Direction. *Composites Part A*, 42: 1635-44.
- [19] Bekyarova, E, Thostenson, E.T., Yu, A., Kim, H., Gao, J., Tang, J., 2007. Multiscale Carbon Nanotube-Carbon Fiber Reinforcement for Advanced Epoxy Composites. *Langmuir*, 23(7):3970-4.
- [20] Soliman, M., Al-Haik, M., Taha, M.R., 2012b. On and Off-Axis Tension Behavior of Fiber Reinforced Polymer Composites Incorporating Multi-walled Carbon Nanotubes, *J Compos Mater.*, 46(14), 1661-75.
- [21] Dong, L., Hou, F., Li, Y., Wang, L., Gao, H., Tang, Y., 2014. Composites Preparation of Continuous Carbon Nanotube Networks in Carbon Fiber/Epoxy Composite. *Composite: Part A*, 56, 248-255.
- [22] Spinteks, 2014. Erişim Tarihi: 14.07.2014. <http://www.Spinteks.Com/>
- [23] De Greef, N., Gorbatikh, L., Godara, A., Mezzo, L., Lomov, S.V., Verpoest, I. 2011. The Effect of Carbon Nanotubes on the Damage Development in Carbon Fiber/Epoxy Composites. *Carbon*, 49, 4650-64.
- [24] ASTM D 3171, 2004. Standard Test Method for Constituent Content of Composite Materials, Space Simulation; Aerospace and Aircraft; Composite Materials, Annual Book of ASTM, Philadelphia.
- [25] Karcı, A., 2009. Uçak Yapısal Parçalarında Kullanılan Karbon/Epoksi Kompozit Malzemelerin Yorulma Davranışı. *Fen Bilimleri Enstitüsü, Anadolu Üniversitesi, Doktora Tezi*, 130, Eskişehir.

- [26] ASTM D 792, 1985. Standard Test Method for Specific Gravity and Density of Plastics by Displacement, Space Simulation; Aerospace and Aircraft; Composite Materials, ASTM Standards Volume, Philadelphia.
- [27] ASTM D 3039, 2005. Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials, Space Simulation; Aerospace and Aircraft; Composite Materials, Annual Book of ASTM, Philadelphia.
- [28] ASTM D 790-00, 2001. Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials, Philadelphia.
- [29] ISO 14129:1997, 2012. Fibre-Reinforced Plastic Composites-Determination of the In-Plane Shear Stress/Shear Strain Response, Including the In-Plane Shear Modulus and Strength, by the Plus or Minus 45 Degree Tension Test Method.
- [30] Korkmaz, N., 2014. Karbon Elyaf Takviyeli Dokuma Kumaş İçeren Kompozit Malzeme Üretimi ve Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi Üzerine Bir Çalışma. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 158s, Isparta.
- [31] <http://snebulos.mit.edu/projects/reference/MIL-STD/MIL-HDBK-17-1F.pdf>, Erişim Tarihi: 30.08.2014.
- [32] Godora, A, Mezzo, L., Luizi, F., Warriar, A., Lomov, S.V, Van Vuure A.W., 2009. Influence of Carbon Nanotubes Reinforcement on the Processing and the Mechanical Behaviour of Carbon Fibre/Epoxy Composites. Carbon, 47, 2914-23.
- [33] Karapappas P, Vavouliotis A, Tsotra P, Kostopoulos V, Paipetis A., 2009. Enhanced Fracture Properties of Carbon Reinforced Composites by the Addition of Multi-wall Carbon Nanotubes. J Compos Mater , 43(9):977-85.
- [34] Kostopoulos, V., Baltopoulos, A., Karapappas, P., Vavouliotis, A., Paipetis, A., 2010. Impact and After-Impact Properties of Carbon Fibre Reinforced Composites Enhanced with Multi-wall Carbon Nanotubes. Compos Sci Technol, 70, 553-63.
- [35] Ivanov, E., Kotsilkova, R., Krusteva, E., Logakis, E., Kyritsis, A., Pissis, P., Silvestre, C., Duraccio, D., Pezzuto, M., 2011. Effects of Processing Conditions on Rheological, Thermal, and Electrical Properties of Multiwall Carbon Nanotube/Epoxy Resin Composites. Polymer Physics, 49, 431-442.
- [36] Qiu, S.L., Wang, C.S., Wang, Y.T., Liu, C.G., Chen, H.F., Xie, X.Y., Huang, Y.A., Cheng, R.S., 2011. Effects of Graphene Oxides on the Cure Behaviors of a Tetrafunctional Epoxy Resin. Express Polymer Letters, 5(9), 2011, 809-818.
- [37] Gojny, F.H., Wichmann, M.H.G., Fiedler, B., Kinloch, I. A., Bauhofer, W., Windle, A. H., Schulte, K., 2006. Evaluation and Identification of Electrical and Thermal Conduction Mechanisms in Carbon Nanotube/Epoxy Composites, Polymer, 47(6): 2036-2045.
- [38] Asharif B., Guan J., Mirjalili V., Zhang Y., Chun L., Hubert P., 2011. Enhancement of Mechanical Performance of Epoxy/Carbon Fiber Laminate Composites Using Single-Walled Carbon Nanotubes. Compos Sci Technol, 71, 1569-78.
- [39] Tehrani, M., Boroujeni, A.Y., Hartman, T.B., Haugh, T.P., Case, S.W., Al-Haik, M.S., 2013. Mechanical Characterization and Impact Damage Assessment of a Woven Carbon Fiber Reinforced Carbon Nanotube-Epoxy Composite. Composites Science and Technology, 75, 42-48.