

KARBON NANOTÜP İLAVESİNİN ELYAF TAKVİYELİ KOMPOZİT MALZEMELERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

Yalçın BOZTOPRAK

Marmara Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Kadıköy/İstanbul, Türkiye

Güner ÇETİN

Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı Doktora Programı, Kadıköy/İstanbul, Türkiye

Minel Zeynep ŞARDAN

Marmara Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Kadıköy/İstanbul, Türkiye

Sefa Enes KILIÇ

Marmara Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Kadıköy/İstanbul, Türkiye

Murathan KALENDER

Marmara Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Kadıköy/İstanbul, Türkiye

41

ÖZET

Kompozit malzemeler, malzeme biliminin gelişmekte olan dallarından biridir. Geleneksel üretim metotlarına uygunluğu ve özel üretim metotlarına izin vermesi nedeniyle otomotiv, denizcilik, havacılık, tekstil ve savunma sanayinde oldukça tercih edilir hale gelmiştir.

Gelişen teknolojiyle birlikte kompozit malzemeler alanında nano boyutlu çalışmalar önem kazanmıştır. Nano teknolojide hedef, moleküler boyutta çalışarak moleküler yapısı yenilenmiş makro yapılar elde etmektir. Malzemelerin nanometrik boyuttaki özellikleri, aynı malzemenin makro boyuttaki özelliklerine göre değişiklik göstermektedir. Nano partikül takviyeli kompozitler, bir matris içerisinde nanometre büyüklüğündeki partiküllerin dağılması ile oluşan malzemelerdir. Nano boyuttaki partiküller, gelişmiş özelliklere sahip nano partikül takviyeli kompozitleri oluşturmak üzere seramik, metal ya da polimer gibi malzemeler içinde takviyelendirici olarak kullanılmaktadır. Yapılan nano boyutta çalışmalar, kompozit malzemelerin sağladığı üstün özellikleri daha da arttırmak veya malzemeye yeni özellikler kazandırmak amacıyla endüstride önem arz eden alanlarda uygulanmaktadır.

Bu çalışmada, tek duvar karbon nanotüpün kırılmış cam elyaf takviyeli doymamış polyester matrisli kompozit malzemenin mekanik özelliklerine ve yanma özelliklerine etkisi incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kompozit malzemeler, nano partikül, tek duvar karbon nanotüp, polyester reçinesi, cam elyaf

THE EFFECT OF CARBON NANOTUBE ADDITION ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF FIBER REINFORCED COMPOSITE MATERIALS

ABSTRACT

Composite materials is one of the developing branches of materials science. It has become very preferred in the automotive, maritime, aviation, textile and defense industries because of its suitability for traditional production methods and allowing special production methods.

In the field of composite materials, nano-size studies have gained importance with the developing technology. The aim of nanotechnology is to obtain new and superior properties in macro structures by working with nano-size. The properties of the materials in nanometrical dimensions vary according to the properties of the same material in the macro size. The nanoparticle-reinforced composites are materials formed by dispersing nano-sized particles in a matrix. The nanoparticles are used as reinforcements in materials such as ceramic, metal or polymer to form nano particle-reinforced composites with improved properties. Nano-sized works have applied in the industry in order to increase the superior properties of composite materials or to give new properties to the material.

In this study, the effect of single wall carbon nanotube on the mechanical properties and flammability properties of trimmed glass fiber reinforced unsaturated polyester matrix was investigated.

Keywords: Composite materials, nano particle, single wall carbon nanotube, poliesther resin, glass fiber

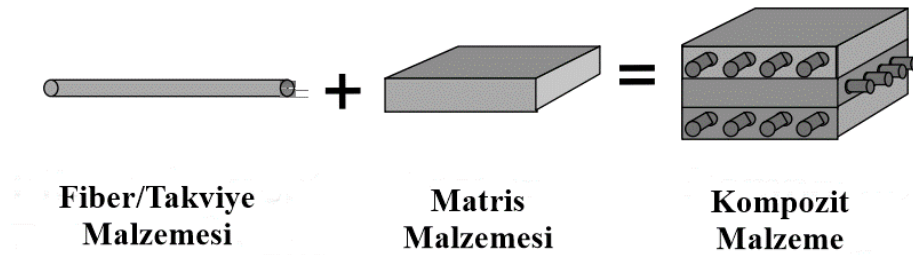
1. GİRİŞ

20. yüzyılın başından itibaren teknolojinin ve endüstriyel üretimin hızla gelişmesi, beraberinde endüstrinin temel girdisi olan malzeme ve malzeme biliminde de gelişmelerin hızlanmasını sağlamıştır. Fakat yeryüzünde ana malzemelerin sınırlı olmasından dolayı malzemeler ve bu malzemelerin sağladığı özellikler teknolojinin gelişimine ayak uyduramamıştır. 1950’li yıllardan itibaren uzay araçlarının yapımına geçilen çağda yüksek teknoloji ürünleri olan bu araçlardan istenilen üstün özellikler ile birlikte geleneksel malzemelerin tek başına kullanılamayacağı veya hiç kullanılamayacağı araştırmacılar tarafından anlaşıldı. Araştırmacılar istenilen üstün özellikleri sağlamak amacıyla tek bir malzeme yerine birçok malzemedan meydana gelen kompozit malzemeler üzerine çalışmalarını arttırdılar. Dolayısıyla hem ekonomik hem daha üstün mekanik özelliklere sahip hem de çok hafif malzemelerin oluşturulması için yapılan çalışmalara yoğunlaşıldı. Böylece malzemeyi teşkil eden bileşenlerin ve farklı kombinasyonlarının özellikleri büyük önem kazandı [1,2]. Tablo 1’de kompozit malzemeler ve çeşitli malzemelerin mekanik özellik değerleri ve yoğunluk değerleri verilmiştir [3].

Tablo 1. Kompozit malzemelerle diğer malzemeler arasındaki yoğunluk ve mekanik özellik farkları [3]

Malzeme	Yoğunluk (gr/cm ³)	Özgül Mukavemet (σ/ρ)	Özgül Modül (E/ ρ)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Elastikiyet Modülü (GPa)
Kemik	1.8	75	14	138	26
Alaşımsız Çelik	7.9	58	26	459	203
Alüminyum	2.8	30	25	84	71
Al Alaşımı-2024	2.8	88	25	247	69
Pirinç	8.5	38	11	320	97
Bor Elyaf Takviyeli Epoksi Kompozit	1.8	889	124	1600	224
Karbon Elyaf Takviyeli Epoksi Kompozit	1.6	788	136	1260	218
Kevlar Elyaf Takviyeli Epoksi Kompozit	1.4	1000	55	1400	77
S Cam Elyaf Takviyeli Epoksi Kompozit	1.8	824	33	1400	56

Tablo 1’de verilen değerler incelendiğinde kompozit malzemeler ile diğer malzemeler arasında mukavemet/yoğunluk açısından büyük bir fark olduğu görülmektedir [3]. Kompozit malzemenin ağırlığının hafif olmasının yanında mekanik özelliklerinin de iyi olduğu görülmektedir [4-6]. Kompozit malzemeler, şekil ve/veya kimyasal bileşenleri farklı, birbiri içerisinde çözünmeyen veya kısmen çözünen iki ya da daha fazla sayıda makro bileşenin kombinasyonundan oluşan malzemeler şeklinde literatürde tanımlanmaktadır [4-7]. Kompozit malzemeler temel olarak matris ve takviye malzemesi olarak iki ayrı bileşenden meydana gelir. Şekil 1’de kompozit malzemelerin meydana geliş biçimi şematik olarak gösterilmiştir [8].

**Şekil 1.** Kompozit malzemelerin şematik olarak gösterimi [8]

Özellikle son 30 yılda nano boyutta partiküllerin gelişmeye başlamasıyla birlikte nanokompozit malzemelerin üretimi ya da nano partikül takviyeli kompozit malzemelerin üretimi alanında da çalışmalar artmıştır [9]. Bu çalışmalara bağlı olarak nano partikül takviyeli kompozitlerin mekanik özellikleri, kimyasal özellikleri, fiziksel özellikleri, termal ve elektriksel özellikleri gibi birçok alanda yapılan çalışmalar da artış göstermiştir. Özellikle karbon nanotüp ve grafen eklenmiş polimer matrisli elyaf takviyeli kompozit malzemelerin mekanik özellikleri ile ilgili birçok çalışma yapılmıştır [9-23].

Araştırmalarda katkısız kompozit malzemelere kıyasla çeşitli katkı maddelerinin, ilave edildiği kompozit malzemelerin fiziksel ve mekanik özelliklerinde iyileşmeler sağladığı görülmüştür [24-25]. Ancak nano takviyeli kompozitlerde en önemli husus, nano takviyesinin organik fazda homojen bir şekilde dağılmış aglomera (topaklanma) oluşmadan dağılmasıdır [20-26]. Ayrıca, reçine içerisine ilave edilecek nano parçacıkların kütlece yüzde miktarları da önem taşımaktadır.

Zhou ve arkadaşları, ilk aşamada Bisfenol-F tipi epoksi reçine içerisine karbon nanotüp ekleyerek reçine yapısını modifiye etmişlerdir. Ağırlık yüzdesi bakımından % 0 - % 0,4 arasında bulunan değerlerde dairesel kesiti 30-60 nm ve boyuna kesiti 3-10 µm aralığındaki çok duvarlı karbon nanotüpler ile karışım sağlamışlardır. Modifiye edilen karbon nanotüp katkılı epoksi kompozitlere mekanik testler uygulamışlardır. Yapılan mekanik testlerde kopma mukavemeti ve kırılma tokluğu en yüksek değeri, ağırlıkça % 0,3 oranında çok duvarlı karbon nanotüp ilaveli kompozit malzemede elde etmişlerdir. Zhou ve arkadaşları, ikinci aşamada karbon nanotüp takviyeli epoksi sistemi ve karbon elyaf dokuma kumaşını kullanarak kompozit plakaların üretimini gerçekleştirmiştir. Elde ettikleri plakalara mekanik testler ve TGA, DMA analizlerini yapmışlardır. Bu test ve analizlere göre camsı geçiş sıcaklık değerinin ve eğilme dayanımının karbon nanotüp takviyesi ile arttığı sonucunu bildirmişlerdir. Çalışma kapsamında son aşamada, saf epoksi reçine ve karbon nanotüp/epoksi kompozit plakalarda lineer hasar denklemi oluşturarak Weibull dağılım fonksiyonuyla kombine etmişlerdir. Bu sonuçlara dayanarak saf epoksi reçine ve karbon nano tüp takviyeli epoksi kompozit plakaların mekanik test değerlerinin Weibull dağılımı ile eş değer olduğu sonucuna ulaştıklarını belirtmişlerdir [27].

Soliman ve arkadaşları, yaptıkları çalışmada karboksil grupları ile fonksiyonellendirilmiş çok duvarlı karbon nanotüp ilavesi ile modifiye edilmiş epoksi reçine kullanmış ve karbon nanotüpün etkisini incelemişlerdir. Ağırlıkça %0,5, %1,0 ve %1,5 oranlarında karbon nanotüp ile modifiye edilmiş epoksi reçine, (0/90°) oryantasyonuna sahip olan ince yapılı karbon elyaf dokuma kumaşlar ile takviye edilmiş kompozit plakalar üretmişlerdir. Elde edilen kompozit plakalar üzerinde beş farklı değerde enerji uygulanarak düşük hızlı darbe tepkisi ile hasar mekanizmaları üzerinde incelemeler yapmışlardır. Kompozit plakalar üzerinde uygulanan testte kullanılan enerji değerlerinin 15, 24, 30, 60 ve 120 joule olduğunu belirtmişlerdir. Bu bağlamda darbe yüklemeleri sonrası ağırlıkça farklı değerlerde çok duvarlı karbon nanotüp eklenen kompozit plakalarda elde edilen hasar miktarı ölçülmüş ve sonuçları karşılaştırmışlardır. Elde edilen verilerin değerlendirilmesi ile karbon nanotüpün oranının artmasıyla penetrasyon limitinin üzerindeki hasar ölçüsünde azalış olduğu sonucunu bildirmişlerdir. %1,5 oranında karbon nanotüp ilave ile enerji absorpsiyonunda %50 oranında artış olduğunu belirtmişlerdir [28].

Bu çalışmada, tek duvar karbon nanotüpün kırılmış cam elyaf takviyeli doymamış polyester matrisli kompozit malzemenin mekanik özelliklerine ve yanma özelliklerine etkisi incelenmiştir.

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

2.1. Malzemeler

Bu çalışmada matris malzemesi olarak Erco E98 doymamış polyester reçinesi, takviye malzemesi olarak TUBALL 201 tek duvar karbon nanotüp ve 12 mm uzunluğunda kırılmış cam elyaf;

sertleştirici olarak Triganox 29 C50 peroksit, dolgu malzemesi olarak Niğtaş kalsit ve yanma dayanımını arttırmak için alüminyum trihidroksit (ATH) kullanılmıştır. Yapının mekanik özelliklerini geliştirmek için % 30 oranında doymamış polyester reçinesi içerisine % 20 oranında 12 mm kırılmış cam elyaf, yaklaşık % 30 kalsit ve % 20 ATH olmak üzere toplamda % 50 oranında katkı maddeleri ve % 0,5 ve % 1 TUBALL 201 tek duvar karbon nanotüp oranlarında ilave edilmiştir.

2.2. Numune Hazırlama

Referans numunesi reçinesine karbon nanotüp eklenmemiştir. Karşılaştırma yapmak için polyester reçinesi içerisine toplam ağırlığın %0,5 ve %1'i oranlarında TUBALL 201 tek duvar karbon nanotüp ilave edilmiş ve homojen bir şekilde karışımı sağlanmıştır.

% 0,5 karbon nanotüp içeren kompozit levha üretimi için 600 gram doymamış polyester reçinesi içerisine 6 gram (toplam ağırlık 1200 gr'ın % 0,5'i) tek duvar karbon nanotüp eklenmiş ve 2400 rpm'de 40 dakika boyunca mekanik karıştırıcı yardımıyla karıştırılmıştır. Karışımın homojenliğini test etmek için silindirik bir cam çubuk karışımın içerisine daldırılıp ardından beyaz kâğıt üzerine düz bir şekilde sürme yöntemi uygulanmıştır. Kâğıt üzerinde herhangi bir karbon partikül olmadığı gözle görülmüş ve karbon nanotüpün reçine içerisinde homojen olarak yayıldığı tespit edilmiştir. Şekil 2'de doymamış polyester ve karbon nanotüp karışımına ait homojenlik testinin uygulandığı kâğıt gösterilmiştir.



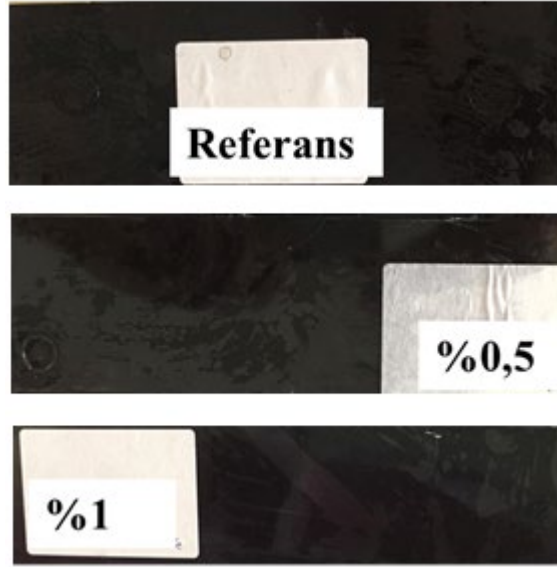
Şekil 2. Doymamış polyester ve karbon nanotüp karışımının homojenlik testi

Tek duvar karbon nanotüp eklenmiş karışım hazırlandıktan sonra peroksit ve diğer katkı ajanları karışım içerisine ilave edilerek dik mikser yardımıyla homojen karışım sağlanıncaya kadar karıştırma işlemi devam etmiştir. Sonrasında elde edilen karışım zet mikserine alınarak içerisine %20 oranında 12 mm kırılmış cam elyaf eklenmiş ve tekrar karıştırma işlemi yapılmıştır. Kırılmış cam elyaf, reçine tarafından tamamen ıslatılınca kadar karıştırma işlemine devam edilmiştir.

Bu işlemler % 1 karbon nanotüp ilavesi için de uygulanmıştır. Kompozit plakalar, yüksek basınç ve yüksek sıcaklıkta sıcak pres yardımıyla üretilmiştir. Kürleştirme işlemi için daha önceden hazırlanan 3 farklı karışım 145°C'de 3 dakika boyunca 150 bar basınçla ayrı ayrı preslenmiş ve kompozit plaka üretim işlemi gerçekleştirilmiştir. Kompozit levhanın üretimi gerçekleştirildikten sonra mekanik testler ve yanma testleri için standartlara uygun biçimde numuneler, CNC ile kesilerek hazırlanmıştır.

2.3. Mekanik Testler ve Yanma Testi

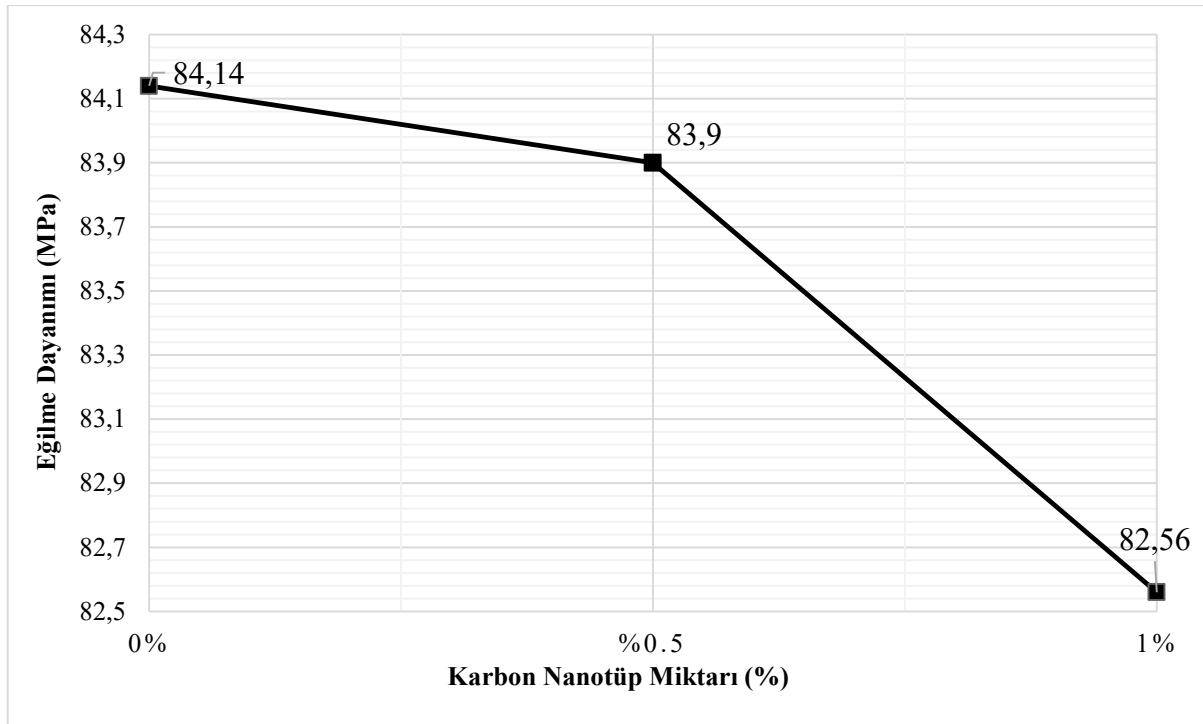
Numunelere ait görseller Şekil 3’de verilmiştir. 3 farklı oranda üretilen numunelere ait mekanik test sonuçları Şekil 4, 5, 6,7 ve UL94 test sonucu ise Tablo 2’de gösterilmiştir. Şekil 8’de ise SEM görüntüleri görülmektedir.



Şekil 3. Referans numunesi, % 0.5 ve % 1 oranlarında tek duvar karbon nanotüp içeren kompozit plakalar

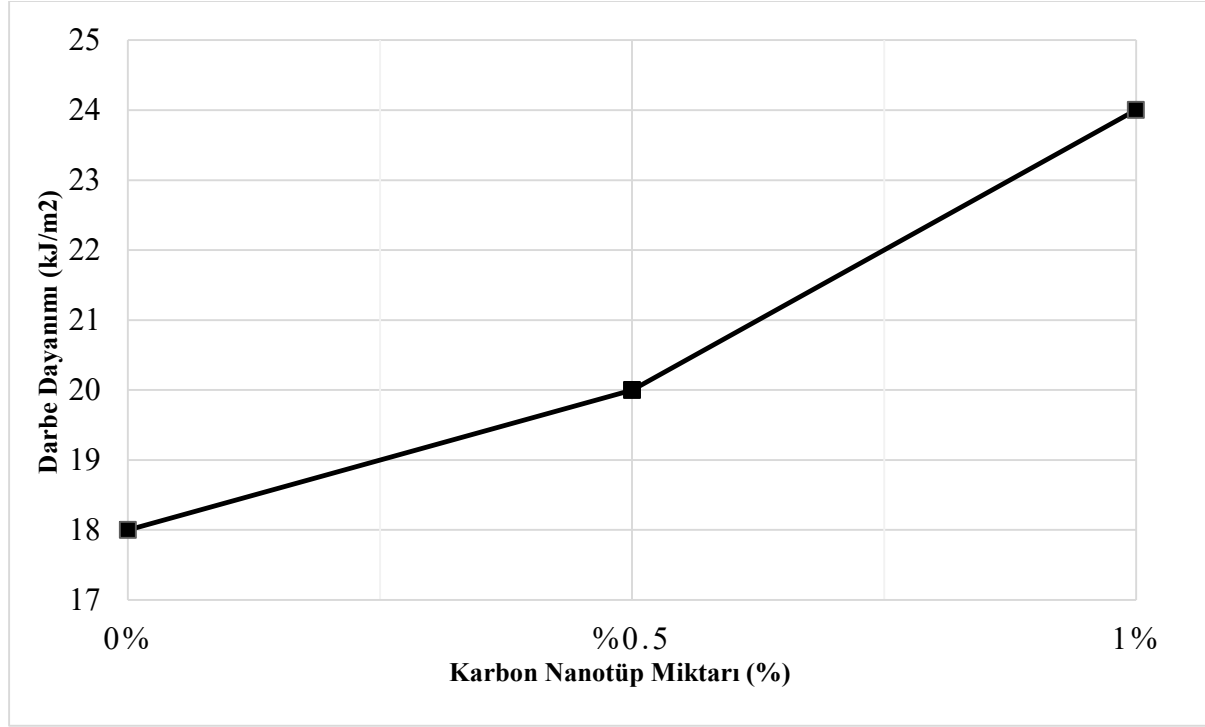
46

3 nokta eğilme testi için standartlara göre 4’er adet numune hazırlanmış olup numunelerin test ortalamaları alınmıştır. ISO 14125 standardına göre oda sıcaklığında test gerçekleştirilmiştir. Eğilme testi sonucu Şekil 4’te verilmiştir. Tek duvar karbon nanotüp miktarı arttıkça eğilme dayanımının azaldığı görülmektedir.



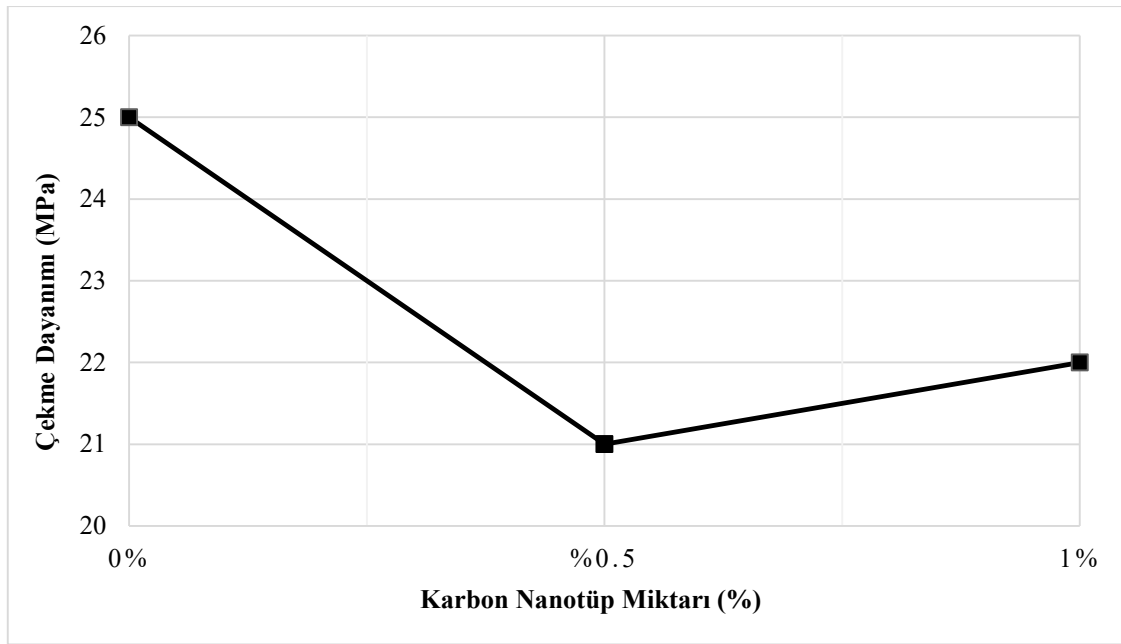
Şekil 4. % 0, % 0,5 ve % 1 karbon nanotüp içeren numunelerin eğilme dayanımı

Izod darbe testi için standartlara göre 4'er adet numune hazırlanmış olup numunelerin test ortalamaları alınmıştır. ISO 180 standardına göre oda sıcaklığında test gerçekleştirilmiştir. Izod darbe testi sonucu Şekil 5'te verilmiştir. Tek duvar karbon nanotüp miktarı arttıkça darbe dayanımının arttığı görülmektedir.



Şekil 5. % 0, % 0,5 ve % 1 oranlarında tek duvar karbon nanotüp içeren numunelerin Izod darbe dayanımı

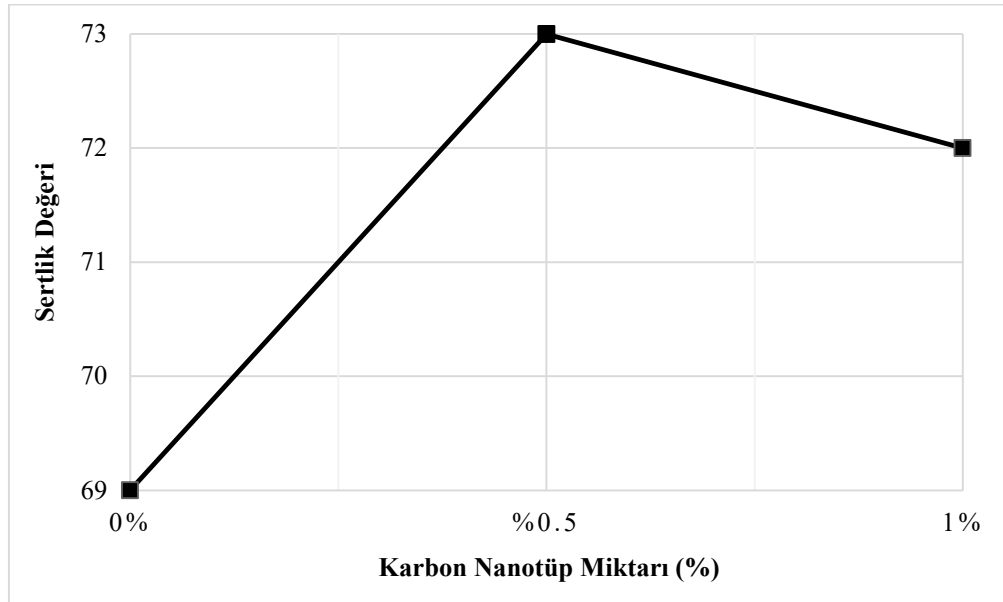
Çekme testi için standartlara göre 4'er adet numune hazırlanmış olup numunelerin test ortalamaları alınmıştır. ISO 527-4 standardına göre oda sıcaklığında test gerçekleştirilmiştir. Çekme testi sonucu Şekil 6'da verilmiştir. Tek duvar karbon nanotüp ilavesi ile çekme dayanımının düştüğü, karbon nanotüp miktarı % 1 olduğunda % 0,5'e göre dayanımın daha yüksek olduğu görülmüştür.



Şekil 6. %0, %0,5 ve %1 oranlarında tek duvar karbon nanotüp içeren numunelerin çekme dayanımı

Sertlik değerini belirlemek için Shore D sertlik ölçüm yöntemi kullanılmıştır. Numunelerin düzgün yüzeylerinden 10'ar adet değer alınmış ve bu değerlerin ortalama değeri hesaplanmıştır. Değerler alınırken standarda uygun şekilde kenarlardan 12 mm içeride ve her bir sertlik ölçüm noktası arası 6 mm olacak şekilde sertlik değerleri alınmıştır. Ölçüm ASTM D2240 standardına göre yapılmıştır. Sertlik testi sonucu Şekil 7'de verilmiştir. Tek duvar karbon nanotüp ilavesiyle sertliğin arttığı, % 1 oranında karbon nanotübün % 0,5 oranına göre sertliği azalttığı görülmüştür.

48



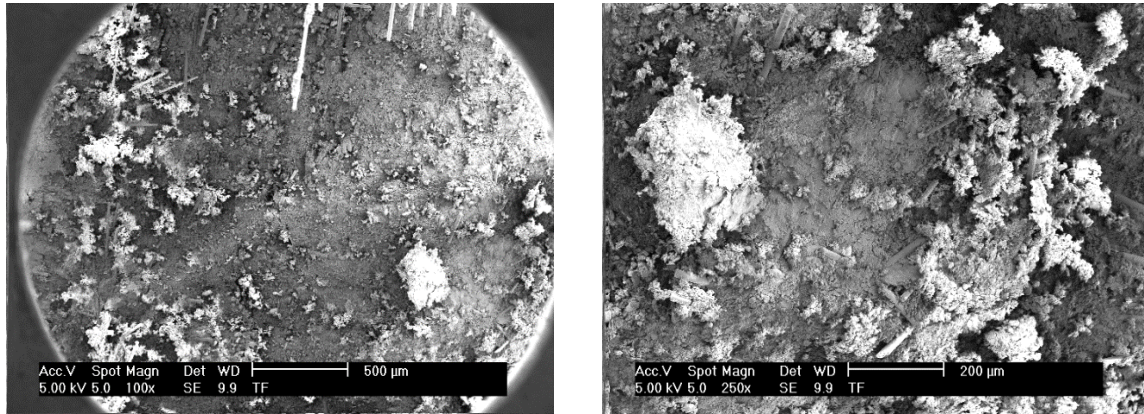
Şekil 7. %0, %0,5 ve %1 oranlarında tek duvar karbon nanotüp içeren numunelerin sertlik değerleri

UL94 yanmazlık testi için standartlara göre 4'er adet numune hazırlanmış olup numunelerin test ortalamaları alınmıştır. UL94 testi sonucu Tablo 2'de verilmiştir. Test sonucunda bütün numunelerin V0 olduğu görülmüştür.

Tablo 2. UL-94 Yanma testi standardına göre numunelerin yanma dayanımı

Test sayısı	Referans Numunesi	%0.5 Karbon Nanotüp İçeren Numune
1	4.00 mm V0	4.00 mm V0
2	3.80 mm V0	3.80 mm V0
3	3.85 mm V0	3.85 mm V0

Şekil 8'de %1 tek duvar karbon nanotüp içeren numuneye ait SEM görüntüleri görülmektedir.



Şekil 8. %1 oranında tek duvar karbon nanotüp içeren numunenin SEM görüntüsü

3. SONUÇLAR ve TARTIŞMA

Üç farklı oranda karışım içeriğine sahip numuneler üretildikten sonra mekanik testler ve yanma testi numunelere başarıyla uygulanmıştır. Tek duvar karbon nanotüp ilavesinin artmasıyla eğilme mukavemetinde azalma, darbe mukavemetinde ve sertlik değerinde artış olduğu görülmüştür. % 0,5 karbon nanotüp ilavesinin çekme dayanımına negatif yönde etkisinin olduğu ancak nanotüp oranı % 1 olduğunda çekme dayanımında artış olduğu görülmüştür. Bu sonuçlara göre kırılmış cam elyaf, kalsit ve ATH takviyeli kompozit malzemeye göre bu takviye malzemelerine ilaveten TUBALL 201 tek duvar karbon nanotüp ilavesiyle mekanik özelliklerin az miktarda da olsa iyileştiği, alev geciktirici özelliğinin ise devam ettiğini görmekteyiz.

UL94 yanmazlık testi referans numunesine ve % 0,5 karbon nanotüp içeren numuneye yapılmıştır ve her iki numunenin de V0 değerine sahip olduğu, yani alevi çektikten sonra 10 sn içinde söndüğü ve damlama olmadığı görülmüştür.

SEM görüntülerine göre yapı içerisinde karbon nanotübün iyi derecede dispers olduğu görülmektedir. Siyah kısımların karbon nanotüp, beyaz kısımların ise kalsit olduğu ve yapı içerisinde dağıldığı aşıkardır. Ayrıca kısa cam elyafları da görmekteyiz.

Bu çalışma neticesinde polyester reçinesi içerisine TUBALL 201 tek duvar karbon nanotüp ilavesinin mekanik sonuçları önemli derecede değiştirmedığı ve polyester reçinesi için TUBALL 201 tek duvar karbon nanotüpün mekanik özellikleri iyileştirmek amacıyla kullanılmasının uygun olmadığı ortaya çıkmıştır. Diğer tek duvar karbon nanotüp malzemelerin ilavesi ile polyester reçinesinin takviyelendirilmesi yönünde çalışmalar yapılabilir.

REFERANSLAR

1. Onat, A., “Kompozit Malzemeler Ders Notu”, Sakarya Meslek Yüksekokulu Makina ve Metal Teknolojileri Bölümü Metalurji Programı, Sakarya, 2015.
2. Pul, M., Çalın, R., Çıtak, R., Ulvi Şeker, U., Düşük Takviyeli MgO-Al Kompozitlerin Vakumlu İnfiltrasyonunda Takviye Oranının İnfiltrasyon Davranışına Etkisi. Politeknik Dergisi Cilt:12 Sayı: 3 s. 173-177, 2009.
3. Zor, M., “Kompozit Malzeme Mekaniği”, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, 2018.
4. Şahin, Y., 2000. Kompozit Malzemelere Giriş. Gazi Kitabevi, 1-16, 37- 41, 65-68, 79-88, Ankara.
5. Demirel, A., 2007. Karbon Elyaf Takviyeli Epoksi Kompozit Malzemelerin Karakterizasyonu. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 135s, Ankara.
6. Acar, V., Akbulut, H., Sarıkanat, M., Seydibeyoğlu, M.Ö., Seki Y., Erden S., 2013. Karbon Elyaf Takviyeli Prepreg Kompozitlerde Arayüzey Mekaniğinin Karbon Nanoyapı Katkısıyla İyileştirilmesi. Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi, 10, 43-51.
7. M.E. Tuttle, Structural Analysis of Polymeric Composite Materials, Marcel Dekker, Inc., 2004.
8. A. Brent Strong, Fundamentals of composite manufacturing: Materials, methods and application, Society of manufacturing Engineers, ISBN-10 0872638545, ISBN-13 9780872638549, 640 pages, 2008.
9. Çıracı, Si, Özbay, E., Gülseren., O., Demir, H, V., Bayındır, M., Oral, A., Senger, T., Aydınli, A., Dana, A., Türkiye’de Nanoteknoloji, Bilim ve Teknik Dergisi, Ağustos Sayısı, 4-23, 2005.
10. Kaya, M., Plastik Nanokompozitler, Pagev Plastik Dergisi, Mart-Nisan Sayısı, 84, 2003.
11. Saçaklı, Y., Değişik Partikül Boyutlarındaki Mg(OH)₂ Katkılı Polipropilen (Pp) Nanokompozitinin Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Marmara Üniversitesi, İstanbul, 2011.
12. Hudnut, S.W., Chung, D.D.L., 1995. Use of Submicron Diameter Carbon Filaments for Reinforcement Between Continuous CarbonFiber Layers in a Polymer-Matrix Composite. Carbon, 33(11):1627-31.
13. 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.
14. 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 NanocompositesExperimental Investigation. Compos A, 34, 689- 694.
15. 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.
16. 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.

17. 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.
18. Thostenson, E.T., Li, W.Z., Wang, D.Z., Ren, Z.F., Chou, T.W.J., 2002. *Appl.Phys.* 2002, 91, 6034- 6037.
19. Thostenson, E.T., 2003. Carbon Nanotube Reinforced Composites: Processing, Characterization and Modeling. Ph.D. Thesis, University of Delaware.
20. Kashiwagi T et al., 2005. Nanoparticle Networks Reduce the Flammability of Polymer Nanocomposites. *Nat Mater.*, 4(12):928-33.
21. Koo, J., 2006. *Polymer Nanocomposites: Processing, Characterization, and Applications*. McGraw-Hill.
22. Vlasveld, D.P.N., Bersee, H.E.N., Picken, S.J., 2005. Nanocomposite Matrix for Increased Fibre Composite Strength. *Polymer*, 46(23):10269-78.
23. Çelep, Ş., 2007. Nanoteknoloji ve Tekstilde Uygulama Alanları, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 171, Adana.
24. Rong, M, Z., Zhang, M, Q., Zheng, Y, X., Zeng, H, M., Friedrich, K, Improvement of tensile properties of nanoSiO₂/PP composites in relation to percolation mechanism. *Polymer*, 42 3301–3304, 2001.
25. Zhang, H., Zhang, Z., Friedrich, K., Eger, C., Property improvements of in situ epoxy nanocomposites with reduced interparticle distance at high nanosilica content. *Acta Mater.*, 54 1833–1842, 2006.
26. Alexandre, M., and Dubois, P., Polymer layered silicate nanocomposites: preparation, properties and uses of a new class of materials. *Materials Science and Engineering*, 28 1-63.
27. Zhou, Y., Pervin, F., Lewis, L., Jeelani, S., 2008. Fabrication and Characterization of Carbon/Epoxy Composites Mixed with Multiwalled Carbon Nanotubes. *Mater Sci Eng A*, 475, 157-65.
28. 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.