



Tek Duvarlı Karbon Nanotüp Takviyesinin Levha Kalıplama Bileşiğinin Mekanik ve İletkenlik Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi

Investigation of the Effect of Single-Walled Carbon Nanotube Reinforcement on Mechanical and Conductivity Properties of Sheet Molding Compound

Aykut Ilgaz ^{1*}, **Deniz Perin** ²

¹ Balıkesir Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, 10185, Balıkesir, Türkiye

² Literatür Kimya, Balıkesir Organize Sanayi, 10100, Balıkesir, Türkiye

Sorumlu Yazar / Corresponding Author *: aykutilgaz@balikesir.edu.tr

Geliş Tarihi / Received: 17.07.2019

Araştırma Makalesi/Research Article

Kabul Tarihi / Accepted: 04.11.2019

DOI: 10.21205/deufmd.2020226510

Atıf şekli/How to cite: ILGAZ, A., PERİN, D.(2020). Tek Duvarlı Karbon Nanotüp Takviyesinin Levha Kalıplama Bileşiğinin Mekanik ve İletkenlik Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi. DEUFMD, 22(65), 417-423.

Öz

Bu çalışmada, tek duvarlı karbon nanotüp takviyesinin doymamış polyeester bazlı levha kalıplama bileşiğinin mekanik ve iletkenlik özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Malzemenin rijitliğinin ölçüsü olan elastisite modülü, gerilme testlerinden elde edilen gerilme dayanımı-uzama grafiklerinin elastik bölgesinden hesaplanmıştır. Karbon nanotüp katkısının standart numunenin elastisite modülünü % 18, maksimum gerilme kuvvetini % 47 ve tokluğunu da % 38 oranında arttırdığı tespit edilmiştir. Doğru akım iletkenliği ise akım-voltaj ölçümleri kullanılarak hesaplanmıştır. Sonuçlar, tek duvarlı karbon nanotüp katkısının malzemenin direncini önemli ölçüde azaltıp doğru akım iletkenliğini bir milyon kat arttırdığını ortaya koymaktadır. Yalıtkan olan kompozit malzemenin, karbon nanotüp katkısıyla yalıtkanlıktan yariletkenlik seviyesine geldiği görülmektedir.

Anahtar Kelimeler: *Tek duvarlı karbon nanotüp, Levha Kalıplama Bileşiği, Elastisite modülü, Doğru akım iletkenliği.*

Abstract

In this study, the effect of single walled carbon nanotube reinforcement on mechanical and conductivity properties of unsaturated polyester-based sheet molding compound was investigated. Elasticity modulus, a measure of the stiffness of the material, was calculated from the slope in the elastic region of the tensile strength-elongation graphs obtained from tensile tests. It has been found that carbon nanotube additive increases the modulus of elasticity of standard sample by 18%, maximum tensile strength by 47% and toughness by 38%. The dc conductivity was also obtained for standard and carbon nanotube reinforced materials using current-voltage measurement. The results show that the addition of single-walled carbon nanotube significantly reduces the resistance of the material and increases the direct current conductivity by one million times. It is seen that the composite material, which is insulator, has increased from insulator to semiconductor level with the contribution of carbon nanotube.

Keywords: *Single walled carbon nanotube, Sheet molding compound, Elasticity modulus, Direct current conductivity.*

1. Giriş

Kompozitler, 20.yüzyılın ikinci yarısından itibaren enerji sektöründe, doğal gaz boru hatlarında, denizcilik uygulamalarında ve sanayi alanında dayanıklılıkları, uzun ömürlü oluşları ve en önemlisi düşük maliyetleri nedeniyle en çok tercih edilen malzemeler arasında kendilerine yer bulmuşlardır [1-3]. İki ya da daha fazla bileşenden oluşan kompozit malzemelerin; kullanılan reçine çeşidine ve takviye malzemesine göre pek çok çeşidi mevcuttur [4].

Pres kalıplama pestili ya da piyasada bilinen adıyla SMC (sheet moulding compound); üretim hızı ve mukavemeti sayesinde otomotiv sektöründe kaput, çamurluk, far yuvaları gibi parçalarda yaygın biçimde kullanılırken korozyona ve kimyasal etkilere karşı dayanımı sayesinde de bulaşık makinesi, klima, buzdolabı gibi ev aletleri endüstrisinde öne çıkan kompozitlerden biridir [5]. Kompozitlerin bu başarısının sırrı her dönem yenilenmeye ve gelişmeye açık olmalarıdır. Özellikle son yirmi yılda kompozitlerin bu revizyon ve gelişimini sağlayan en önemli bileşenlerden birisi de karbon nanotüplerdir. İlk olarak lijima [6] tarafından keşfedilen karbon nanotüplerin fonksiyonelleştirilmeleri ve geliştirilmeleriyle [7, 8] birlikte standart malzemeye katılanması, malzemenin elastisite modülünü (Young modülü), gerilme mukavemetini ve elektrik iletkenliğini kayda değer biçimde etkilediğini göstermiştir [9, 10]. Allaoui ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, % 1'lik karbon nanotüp katkısının malzemeyi hem mekanik hem de elektrik iletkenliği bakımından başka bir seviyeye taşıdığı ortaya konulmuştur [11]. Benzer bir çalışma ve derleme Sengupta ve arkadaşları tarafından yapılmış ve karbon nanotüplerin sahip oldukları mukavemet özelliklerini entegre oldukları malzemeye başarıyla aktarabildiklerini ispatlamıştır [12].

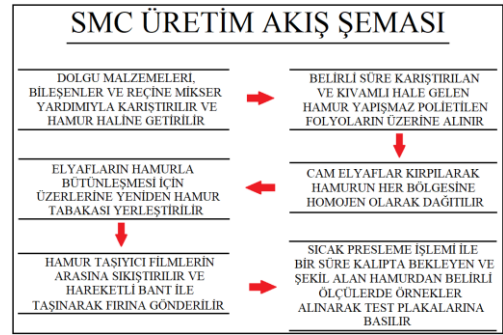
Bu çalışma kapsamında, standart prosedürlerle üretilen SMC malzeme ile %1 oranında tek duvarlı karbon nanotüp (TDKN) katkılı olarak üretilen SMC malzemenin mekanik özellikleri ve doğru akım (direct current-dc) iletkenliği incelenmiştir. Malzemelerin mekanik özellikleri çekme testlerinden elde edilen grafiklerden karşılaştırmalı olarak analiz edilirken, dc iletkenlikleri ise yüksek hızlı akım-voltaj ölçümlerinden elde edilen sonuçlara bağlı olarak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçların

ışığında katkılı kompozit malzemelerin daha nitelikli ve daha üstün özelliklere sahip olduğu ve çeşitli alanlarda kullanılabileceği değerlendirilmektedir.

2. Materyal ve Metot

2.1. Materyal ve Üretim

Üretilen standart numune, % 24 oranında doymamış polyester, % 6 oranında dolgu maddesi, % 1,7 oranında stiren, % 0,4 oranında peroksit, % 1,5 oranında çinko sülfid, % 27,5 oranında kalsiyum karbonat, % 0,8 oranında kıvam verici madde ve % 37 oranında cam elyaf içerir. Eklenen karbon nanotüp miktarı ise ağırlıkça %1 oranındadır. Numunelerin üretim akış diyagramı Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Numunelerin üretim akış diyagramı

Üretim aşamasında ilk olarak dolgu malzemelerinin, bileşenlerin ve karbon nanotüpün topaklanmasını önlemek ve birbirlerine entegrasyonunu arttırarak homojen bir dağılım elde etmek için bu malzemeler ve doymamış polyester reçine mikser yardımıyla mekanik olarak sürekli karıştırılmış ve sonunda kıvamlı hamur haline getirilmiştir. Elde edilen hamur, taşıyıcı ve yapışmaz polietilen folyoların üzerine aktarılmıştır. Bundan sonra cam elyaflar kırılarak homojenliğim sağlanabilmesi adına hamurun her bölgesine eşit miktarda dağıtılmaya çalışılmıştır. Kırılan elyafların malzemeyle bütünleşmesini sağlamak amacıyla üzerlerine yeniden hamur serilmiştir. Doymamış polyesterin uçuculuğunu engellemek ve hamurlarda boşluk oluşumunun önüne geçmek için hamur taşıyıcı film arasına sıkıştırılarak optimum viskozite değerine gelinceye kadar fırına gönderilmiş ve sıcak presleme işlemiyle kalıpta bekletilmiştir. 8-10 dakika kalıpta bekleyen ve şekil alan hamurdan

240 mm x 140 mm x 4 mm'lik örnekler test plakalarına basılarak üretilmiştir.

2.2. Yöntem

2.2.1. Mekanik Özellikler

Dayanıklılık ve esneklik gerektiren uygulamalarda kompozit malzemelerden istenen özellik, dış bir kuvvet veya basınç altında olabildiğince yüksek gerilme kuvvetine ve esnekliğine sahip olması ve dağılıp kopmadan formunu koruyabilmesidir. Malzemenin bu özelliklerinin ne kadar üst düzeyde olup olmadığını anlamının en etkin yolu malzemeye çekme testleri uygulamaktır. Testlerin sonucunda, malzemeye uygulanan gerilmenin boyuna uzamaya göre değişim grafiği elde edilmektedir. Gerilmenin boyuna uzamaya göre çizgisel değiştiği yani Hooke yasasına uyduğu elastik bölgede grafiğin eğimi bize elastisite modülünü vermektedir [13].

$$s = E \cdot e \quad (1)$$

Burada E malzemenin rijitliğinin ölçüsü olan elastisite modülü, s gerilmeyi ve e biçimdeki değişim oranını temsil etmektedir. Biçim değiştirme oranı

$$e = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (2)$$

ile verilmektedir. Denklemden ΔL malzemedeki uzama miktarını temsil ederken L_0 da malzemenin uzamadan önceki boyudur.

Bu çalışmada, standart ve TDKN katkılı SMC malzemeler 12 mm x 200 mm boyutlarında kesilerek Zwick Roell Z250 model çekme testi cihazına yerleştirilmiştir. Cihazın çekme hızı, her iki numune için de aynı sabit değere sahip olup 6 mm/dak olarak ayarlanmıştır. Kuvvet kalibrasyonu 7500-1 standardına göre yapılan cihazın sınıfı 1 olarak kaydedilmiştir [14]. Numunenin uzunluğundaki değişimin tespiti için cihaza tak kullan özelliği olan iki uzama ölçer (ekstansometre) monte edilerek kalibrasyonu ISO 7500-1 standardına uygun biçimde yapılmış olup sınıfları 1 olarak belirlenmiştir [15]. Çekme test cihazı ile eşzamanlı olarak çalıştırılan uzama ölçerlerden alınan bilgiler ölçüm sistemine bağlı datalogger kullanılarak bilgisayara aktarılmış ve TestXpert yazılım programı sayesinde çekme kuvvetine karşılık gelen uzama miktarları şeklinde veriler

elde edilmiştir. Elde edilen verilerden ayrıca elastisite modülü hesaplanmış ve TDKN katkısının malzemeyi nasıl etkilediği analiz edilmiştir.

2.2.2 Elektriksel Özellikler

Elektrostatik boşalma veya elektromanyetik-radyo parazit koruması gibi yeterli matris iletkenliği gerektiren durumlar için karbon nanotüpler, malzeme içindeki iletken bir dolgu maddesi olarak kullanılmaktadır. İçerdiği bileşenlerin doğasına bağlı olarak yalıtkan özellik gösteren kompozitlerin elektriksel iletkenliğini açıklayan mekanizma perkolasyon ya da süzülme teorisidir [16]. Düşük katkılama yoğunluklarında karbon nanotüpler, matris içinde çeşitli bölgelere dağılırlar ancak diğer takviye bileşenlerinden boyutsal olarak daha küçük oldukları için matris içindeki görüntüleri küçük ve bağımsız kümeler halindedir. Matris içindeki karbon nanotüp miktarı artmaya başlayınca birbirlerinden ayrı olan kümeler yavaş yavaş büyümeye ve birbirlerine yakınlaşmaya hatta belirli noktalarda birbirlerine değmeye başlarlar. Süzülme eşiği adı verilen kritik konsantrasyon değerinde ise karbon nanotüpler malzeme içerisinde iletken bir ağ meydana getirirler. Bu eşik değeri, kompozit maddenin direncindeki ani bir azalmayla karakterize edilir. Kompozit malzemenin çeşidi, üretim şekli ve matrisin katkı maddesi ile etkileşimi gibi faktörler de iletkenliği etkileyen olaylardır [17].

Bu çalışmada malzemelerin doğru akım iletkenliklerini hesaplamak için ise akım-voltaj ölçümleri kullanılmıştır. $L=150$ mm'lik uzunluğa sahip çubuk şeklindeki numunelerin akım-voltaj ölçümlerinden elde edilen eğrilerin eğimlerinin terslerinden direnç değerleri hesaplanmıştır. Direnç ile birlikte numunenin boyutları kullanılarak malzemelerin öz direnç değeri [18]

$$\rho = R \frac{t}{Lw} \quad (3)$$

denklemleri ile hesaplanır. Denklemden, t numunenin kalınlığı ve w numunenin genişliği olup hesaplamalarda $t=10$ mm ve $w=10$ mm olarak alınmıştır.

3. Bulgular

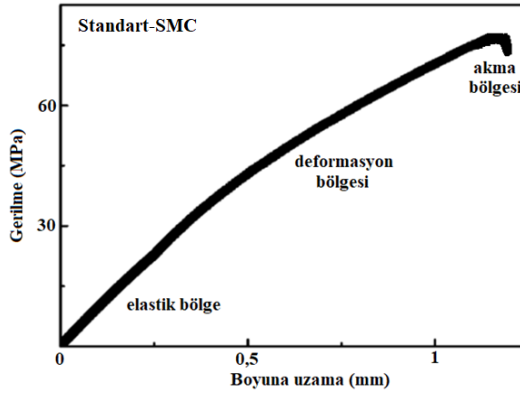
Standart SMC için gerilmeye karşılık gelen boyuna uzama grafiği Şekil 2’de verilmiştir. Çekme testinde malzemeye uygulanan küçük zorlama ve gerilme durumlarında malzemede oluşan uzama miktarlarının küçük ve doğru orantılı artışları gözlenmiştir. Tersinir bir bölge olarak tanımlanan bu elastik bölgede malzemenin davranışı Hooke yasasına uymuş ve bu bölgeden elastisite modülü hesaplanarak Tablo 1’e kaydedilmiştir.

Tablo 1. Malzemelerin elastisite modülü, maksimum gerilme ve boyca uzama değerleri.

Malzeme	Elastisite Modülü	Maksimum Gerilme	Boyca Uzama
Standart SMC	18,2 GPa	77 MPa	1,16 mm
TDKN katkılı SMC	21,3 GPa	113 MPa	1,44 mm

Test cihazındaki malzemeyi tutan çeneler birbirlerinden uzaklaştıkça SMC içinde kalıcı deformasyonlar meydana gelmeye başlamıştır. Kısmen de olsa esnekliğin var olduğu bu durumda malzeme içinde tersinmez yani geri döndürülemez bir süreç başlamıştır. SMC malzemenin kimyasal yapısının bozulmaya başladığı bu durum yaklaşık 77 MPa’lık gerilme değerine kadar devam eder. Giderek deforme olan malzeme bu gerilme değerinde 1,16 mm’lik uzama gösterdikten sonra kopma göstermiştir.

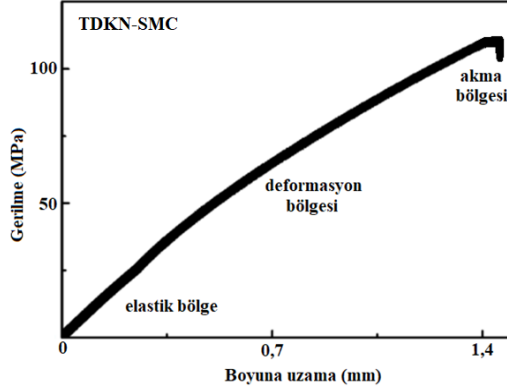
Şekil 3’de görüldüğü gibi TDKN ile güçlendirilen SMC malzemede de fonksiyonun davranışı benzer olmakla beraber gerilme ve uzama miktarı artmıştır. Elastik bölgeden elastisite modülü hesaplanmış ve Tablo 1’e kaydedilmiştir. Değerlerden görüldüğü gibi kendini oluşturan karbon atomlarının dizilişleri nedeniyle kırılmaya karşı dayanıklı ve yüksek elastisite modülüne sahip olan tek duvarlı karbon nanotüplerin standart malzemeye eklenmesi malzemenin de elastisite modülünü artırıcı etki yapmıştır.



Şekil 2. Standart SMC’ye uygulanan gerilimin malzemede oluşan boyuna uzama miktarına göre değişimi.

Bununla birlikte grafiklerin karşılaştırılmalarından görüleceği üzere TDKN katkısı malzemenin gerilme ve uzama değerini arttırmıştır. Standart numune için 77 MPa olan maksimum gerilme değeri 113 MPa’ya, maksimum uzama miktarı da 1,16 mm’den 1,44 mm’ye artış göstermiştir. Çekme ölçümleri göstermiştir ki malzemeye TDKN eklenmesi bileşenler arasındaki bağların şiddetini artırarak malzemeyi mukavemet gerektiren uygulamalarda bir adım öne çıkarmaktadır. Malzemenin kopana

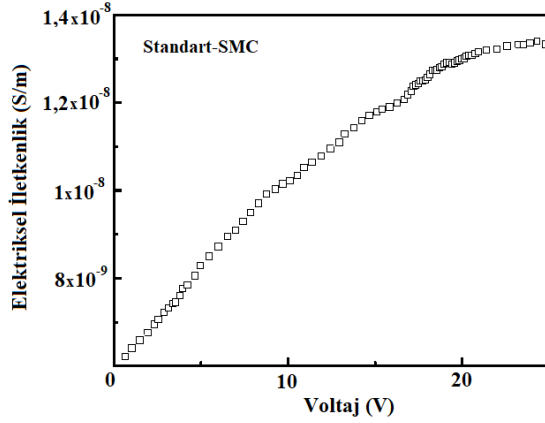
değin soğurduğu toplam enerjiyi ifade eden tokluk değeri gerilme-uzama grafiklerinin altında kalan alandan bulunur. Kompozitin ana bileşeni olan matrisin ve polyeester gibi kullanılan reçinenin hasar uzaması geciktikçe tokluk değeri artmaktadır. Eğer malzemenin hasar uzaması düşükse malzeme kırılğan hale gelir. Grafikler incelendiğinde TDKN katkısının malzemenin gerilmeye dayanımını arttırarak tokluğunu da % 38 oranında arttırdığı tespit edilmiştir.



Şekil 3. TDKN-SMC'ye uygulanan gerilimin malzemede oluşan boyuna uzama miktarına göre değişimi.

Standart SMC'nin doğru akım iletkenliğinin voltaja bağlı olarak değişimi Şekil 4'de verilmiştir. Yaklaşık olarak 10 V değerine kadar grafiğin fonksiyonu çizgisel davranış göstererek Ohm yasasına uymaktadır. Voltaj

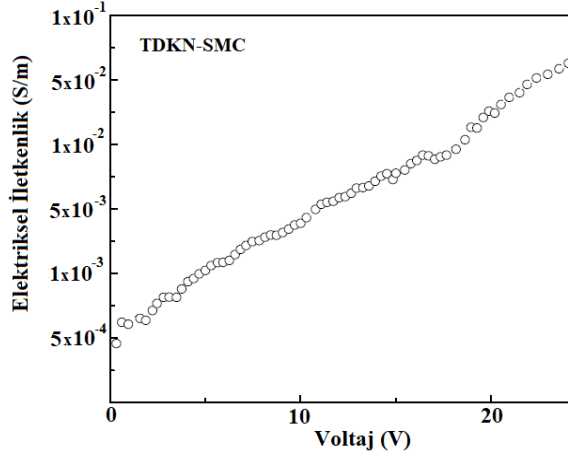
değeri küçük aralıklarla arttırıldığında ise akımın artış hızı yavaşlar ve fonksiyon çizgisellikten sapar. 25 V'luk maksimum voltaj değerinde ise numune içinden geçen akım ancak nanoamper seviyelerine ulaşır.



Şekil 4. Standart SMC'nin doğru akım iletkenliğinin voltaja bağlı olarak değişimi.

TDKN ile güçlendirilmiş SMC malzemenin akım-voltaj karakteristiğinden çıkarılan iletkenlik-voltaj grafiği ise Şekil 5'te görülmektedir. Grafiklerin davranışları benzer olmakla beraber iletkenlik değerleri arasındaki fark dikkat çekicidir. Sahip oldukları uzunluk, vektör ve yarıçaplara bağlı olarak yarıiletken veya iletken özelliklere

sahip olabilen TDKN'lar % 1 oranında bir katkıyla dahi yalıtkan bir malzemeyi kendi iletkenlik seviyelerine yaklaştırabilmişlerdir. Sonuç olarak kullanım amacına uygun olarak TDKN'lerin kompozit malzemelerin elektriksel özelliklerini kontrol etmede ideal malzemelerden biri olduğu ortaya konulmuştur.



Şekil 5. TDKN-SMC'nin doğru akım iletkenliğinin voltaja bağlı olarak değişimi.

4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada, standart bileşenler ve prosedürler ile üretilen SMC malzemeye TDKN takviyesi yapılarak mekanik ve iletkenlik özelliğinin değişimi özel ölçüm teknikleri kullanılarak karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Çekme testi deneylerinde, standart ve TDKN katkılı numunelerden eşit boylarda kesilerek ayrı ayrı 2 adet hazırlanmış olup her malzeme için ölçüm numune kopana kadar devam ettirilmiştir. Elde edilen değerlerin ortalaması, standart ve TDKN katkılı SMC için deney sonucu olarak kullanılmıştır. Düşük gerilme değerlerinde her iki malzemede oluşan uzama değerleri lineer bir davranış gösterirken gerilmenin artmasıyla standart malzeme daha erken deformasyon ve akma bölgesine girerek sonucunda da kopmuştur. Karbon nanotüp takviyesinin ise malzemenin dayanabildiği gerilme değerini ve malzemenin sahip olduğu elastisite modülünü önemli ölçüde arttırdığı görülmüştür. Nanotüp konsantrasyonu artırıldığında ve malzemenin homojenliği artırıldığında bu etkinin daha belirgin olacağı düşünülmektedir. Gerilme-boyuna uzama grafiğinin altında kalan malzemenin tokluğunu verdiğinden tek duvarlı karbon nanotüp katkısının reçine ve diğer bileşenlerle kimyasal

uyumu arttırarak malzemenin tokluğunu da arttırdığı söylenebilir.

Standart üretilen SMC, içerdiği bileşenlerin doğasına uygun olarak GΩ mertebelerinde dirence sahip olup yalıtkan bir yapıdadır. % 1 oranında eklenen tek duvarlı karbon nanotübün kritik konsantrasyonu aştığı, kompozit içinde birbirleriyle temas eden iletken bir ağ oluşturup direnç seviyesini kΩ seviyelerine çektiği ve bunun sonucu olarak da doğru akım iletkenliğini bir milyon kat arttırdığı ortaya konulmuştur. Nanotüp konsantrasyonunun artırılması dayanıklılığı etkilediği kadar elektriksel iletkenliği de birinci derecede etkileyen parametrelerdendir. Nanotüp yoğunluğu arttırılırsa malzemenin iletkenliğinin yarıiletken seviyesinden iletken seviyesine çekilebileceği düşünülmektedir.

Sonuç olarak sahip olduğu eşsiz özellikler nedeniyle tek duvarlı karbon nanotübün malzemenin hem mekanik hem de elektriksel özelliklerini olumlu olarak etkilediği ispatlanmıştır. Dolayısıyla hem mukavemet gerektiren uygulamalarda hem de elektriksel iletkenliğin gerekli olduğu durumlarda TDKN katkılı SMC malzemelerin kendilerine önemli bir uygulama alanı yaratacakları açıkça görülmektedir.

Teşekkür

Yazarlar, çalışma sırasında kullanılan takviye malzemelerinin temininde ve numunelerin üretilmesindeki katkılarından dolayı Literatür Kimya'ya teşekkürlerini sunar.

Kaynakça

- [1] Zingaro, J.R. 1996. Phenolic Composites in the Aircraft Industry and the Necessary Transition to the Mass Transit Rail Industry, paper presented at the 51st Annual Conf., Composites Institute, Society of the Plastics Industry Inc.
- [2] Çizmeçi, Ö.S. 2006. Roket ve Füzelerde Kompozit Malzeme Kullanımının İncelenmesi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Malzemesi ve İmalat Teknolojisi Anabilim Dalı, Lisans Bitirme Tezi, İstanbul.
- [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, Cilt.10, s.43-51.
- [4] Thomason J.L. 1995. The interface region in glass fibre-reinforced epoxy resin composites: 2, Water absorption, voids and the interface. Composites, Cilt.26, s.477-485. DOI: 10.1016/0010-4361(95)96805-G.
- [5] Borrachero, B. O., Caballero, S. S., Fenollar, O., Selles, M. A. 2019. Natural-Fiber-Reinforced Polymer Composites for Automotive Parts Manufacturing, Key Engineering Materials, Cilt.793, s.9-16. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.793.9.
- [6] Lijima, S. 1991. Helical Microtubules of Graphitic Carbon, Nature, Cilt.354, s.56-58. DOI: 10.1038/354056a0.
- [7] Bethune, D. S. and Klang, C. H. and de Vries, M. S. and Gorman, G. and Savoy, R. and Vazquez, J. and Beyers, R. 1993. Cobalt-catalysed growth of carbon nanotubes with single-atomic-layer walls. Nature, Cilt.363, s.605-607. DOI: 10.1038/363605a0.
- [8] Chen, G.X., Kim, H.S., Park, B.H., Yoon, J.S. 2005. Controlled Functionalization of Multiwalled Carbon Nanotubes with Various Molecular-Weight Poly(Llactic acid), J. Phys. Chem., Cilt.109, s. 22237-22243. DOI: 10.1021/jp054768n.
- [9] Xiong, J., Zheng, Z., Qin, X., Li, M., Li, H., Wang, X. 2006. The thermal and mechanical properties of a polyurethane/multi-walled carbon nanotube composite, Carbon, Cilt.44, s.2701-2707. DOI: 10.1016/j.carbon.2006.04.005.
- [10] Chen, W., Tao, X., Liu, Y. 2006. Carbon nanotube-reinforced polyurethane composite fibers, Composites Science and Tech., Cilt.66, s.3029-3034. DOI:10.1016/j.compscitech.2006.01.024.
- [11] Allaoui, A., Bai, S., Cheng, H. M., Bai, J. B. 2002. Mechanical and electrical properties of a MWNT/epoxy composite, Composites Science and Technology, Cilt.62, s.1993-1998. DOI: 10.1016/S0266-3538(02)00129-X.
- [12] Sengupta, R., Bhattacharya, M., Bandyopadhyay, S., Bhowmick, A. K. 2011. A review on the mechanical and electrical properties of graphite and modified graphite reinforced polymer composites, Progress in Polymer Science, Cilt.36, s.638-670. DOI: 10.1016/j.progpolymsci.2010.11.003.
- [13] Hosford, W.F. 1992. Overview of Tensile Testing, Tensile Testing. 2nd edition. ASM International, s. 1-24.
- [14] ISO 7500-1, 2004. Metallic materials -- Verification of static uniaxial testing machines -- Part 1: Tension/compression testing machines -- Verification and calibration of the force-measuring system.
- [15] TS EN ISO 9513, 2005. Metal malzemeler-Tek eksenli deneylerde kullanılan ekstansometrelerin kalibrasyonu.
- [16] Coleman, J. N., Curran, S., Dalton, A. B., Davey, A. P., McCarthy, B., Blau, W. 1998. Percolation-dominated conductivity in a conjugated-polymer-carbon nanotube composite, Phys. Rev. B – Condens. Matter Phys., Cilt.58, s. 7492-7495. DOI: 10.1103/PhysRevB.58.R7492.
- [17] Yuan, X. 2007. Experimental study of Electrical conductivity of carbon nanotube, nanofiber buckypapers and their composites. A Thesis submitted to the Department of Industrial & Manufacturing Engineering, Maste of Science thesis, 118S, Florida.
- [18] Pathania, D. and Singh, D. 2009. A review on electrical properties of fiber reinforced polymer composites, International Journal of Theoretical & Applied Sciences, ISSN : 0975-1718, Cilt.1, s.34-37.