

## Farklı Parametreler Işığında Fiber/Epoksi Tabakalı Kompozitlerin Mukavemet Özelliklerinin Deneysel Olarak Değerlendirilmesi

Ercüment Uğur Yüncüoğlu<sup>1</sup>, Serdar Turgut İnce<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Yıldız Teknik Üniversitesi, Gemi İnşaatı ve Denizcilik Fakültesi, Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Bölümü, İstanbul, Türkiye, 34349

\*serince@outlook.com

(Geliş/Received: 03/09/2020;

Kabul/Accepted: 29/12/2020)

**Öz:** Mühendislik yapılarında fiber/epoksi kompozitler, dayanıklılık ve hafifliği nedeniyle yaygınca kullanılmaktadır. Tasarımcılar açısından kompozit malzemenin seçimi için fiber tipi, katman sayısı, yüklemeye maruz kalacağı açı, yükleme hızı gibi çeşitli durumlarda malzemenin mukavemetinin nasıl değiştiği önemlidir. Bu çalışmada, bu parametreler ışığında tam faktöriyel bir deney tasarımı kurulmuş ve parametrelerin birbirleri üzerindeki çapraz etkileri; maksimum çekme gerilmesi, birim şekil değiştirme ve yapı tarafından depo edilen enerji açısından değerlendirilerek tasarımcılar için kullanışlı sonuçlar ve gözlemler elde edilmiştir. Fiberlerin yönelim açısı mukavemet üzerinde çok etkili olsa da; değişik kalınlıklarda, hızlarda ve fiber tiplerinde farklı oranlarda mukavemeti değiştirmektedir. Bu açıdan bahsedilen parametrelerin birbirlerini çapraz olarak etkilediği söylenebilir.

**Anahtar kelimeler:** Fiber/epoksi, kompozit malzeme, malzeme mukavemeti, deneysel çalışma,

### Experimental Evaluation of Strength Properties of Fiber/Epoxy Laminated Composites in the Light of Different Parameters

**Abstract:** Fiber/epoxy composites are widely used in engineering structures due to their durability and lightness. How the strength of the material changes in various situations such as the fiber type, the number of layers, the angle it will be subjected to loading, the loading rate is important for the designers to choose the composite material. In this study, a full factorial experimental design was established in the light of these parameters and the cross effects of the parameters on each other were evaluated in terms of tensile stress, strain and absorbed energy, and useful results and observations were obtained for designers. Although the orientation angle of the fibers is very effective on the strength, it changes the strength differently at various thicknesses, different speeds and fiber types. In this respect, it can be stated that the parameters affect each other.

**Key words:** Fiber/epoxy, composite material, material strength of materials, experimental study

#### 1. Giriş

Makine, gemi, uçak ve inşaat mühendisliği gibi çok çeşitli mühendislik dallarında tabakalı fiber/epoksi kompozit malzemeler kullanılmaktadır. Kompozit malzemeler, birçok mekanik ve fiziksel özellikleri sebebiyle metallere göre tercih edilmektedir. Tasarımcılar açısından tabakalı fiber/epoksi kompozit malzemelerin seçiminde malzeme mukavemeti için belirlenmesi gereken birçok parametre söz konusudur. Bunlar malzemenin kullanım amacı ve kullanımı sırasında maruz kalacağı yükleme durumlarıyla alakalıdır. Bu parametrelerin en önemlileri fiber tipi, fiber yönü, katman sayısı, maruz kalabileceği yükleme hızı ve fiber yoğunluğu olarak sıralanabilir [1].

Fiber tipi olarak karbon fiber/epoksiler, cam fiber/epoksilere göre daha iyi bir performans gösterirler [2]. Yapı üzerine gelen kuvvet doğrultusunda seçilen fiber yönü ile kompozit malzeme en yüksek dayanımı gösterir ve yük doğrultusuyla yapılan açı ile malzemenin mukavemeti düşer [1-5]. Birim şekil değiştirmeler açısından en az uzama, fiber yönü ile yük yönünün aynı seçilmesi durumunda gerçekleşir [1]. Fiber yönündeki çekmelerde gevrek davranış gözlemlenir. En sünek davranış [45/-45]<sub>w</sub> oryantasyonunda görülür [1, 6]. Böylece ara açılarda gevrekten süneğe doğru bir davranış değişimi gözlenir.

Kompozit yapının elastisite modülü kalınlık azaldıkça artar. Katman sayısı arttıkça çekme dayanımı düşer ama çekme yönünde daha fazla uzama görülür [3]. Ayrıca katman sayısının artmasıyla çekme dayanımı artmaktadır [7]. Ancak bu artış miktarı sınırlıdır [8].

Yükleme hızının elastisite modülü üzerindeki etkisi oldukça sınırlıdır [9]. Maksimum çekme gerilmesi üzerinde ise etkilidir ve çekme hızının artmasıyla çekme gerilmesi de artar [10]. Fiberler ile matris arasında, çekme hızının artmasıyla daha sünek bir davranış gözlemlenir [11]. Diğer yandan kopma şekil değiştirmesi sünek

davranış artkça artar. Bu sebeple kompozit malzemelerin çekme sırasında malzeme içinde depoladıkları enerjiyi incelemek gerekir [12]. Bir çalışmaya göre [15/-75]<sub>w</sub> oryantasyondaki fiber/epoksi malzeme en yüksek enerji emiliminin gerçekleştiği açıdır [13]. Yüksek hızlarda yapılan testlerde, düşük hızlara göre %50 oranında daha fazla enerji emildiğini bulunmuştur [14]. Öte yandan sıcaklık da malzeme davranışını etkilemektedir. 0 derecenin altında karbon fiber/epoksilerde malzemenin kırılma tokluğu azalmaktadır [15].

Görüldüğü üzere literatürde parça parça yapılmış çalışmalardan bir takım çıkarımlar yapılsa da gerek deney ekipmanlarının ve deney amaçlarının farklılığı gerekse deneyde değiştirilen parametrelerin çapraz etkileri sebebiyle tasarımcılar açısından bu veriler yeterli değildir. Parametrelerin daha geniş bir perspektiften birbirleri ile olan etkilerini de içerecek şekilde değerlendirilmesinin daha kullanışlı ve anlamlı olacağı düşünülmüştür. Cam ve karbon fiberler 2 farklı hızda, 2 farklı kalınlıkta ve 4 farklı oryantasyon açısından incelenmiştir. Bu çalışmada tam faktöriyel deney tasarımıyla 24 farklı test gerçekleştirilmiş ve ölçülen parametrelerin birbirleri ile olan etkileri dâhil birçok sonuç, aynı test ekipmanlarıyla yapılmıştır. Parametrelerin etkisinin daha net anlaşılabilmesi ve kıyaslanabilmesi amacıyla elde edilen sonuçlar mümkün olan en az grafikte ifade edilmeye çalışılmıştır. Böylece tasarımcılar için kompozit malzeme seçiminde kullanışlı olabilecek sonuçlar görselleştirilmiş ve değerlendirilmiştir.

## 2. Deneysel Metot

Fiber/epoksi kompozit malzemelerle, 4 faktörlü; 2 (fiber tipi), 2 (çekme hızı), 2 (katman) ve 4 (oryantasyon) seviyeli; 3 tekrarlı olarak gerçekleştirilen toplam 72 çekme testi yapılmıştır. Numunelerin hazırlanması için ilk olarak vakum infüzyon yöntemi ile 650 x 650 mm boyutlarında cam fiber takviyeli epoksi (CFTE) ve karbon fiber takviyeli epoksi (KFTE) kompozit plakalar üretilmiştir. Vakum infüzyon yöntemi 1 atm basınç altında gerçekleştirilmiştir. KFTE ve CFTE kompozit plakalarının üretiminde aynı reçine ve sertleştirici kullanılmıştır. Kompozit malzemelerin matrisini oluşturan epoksi için reçine olarak Araldite LY 1564 ve sertleştirici olarak Aradur 3487 kullanılmıştır. Reçine ve sertleştiricinin kütlece karışım oranı 100/34' tür. Her bir plakanın kurlenme işlemi yaklaşık 7 saat sürmüştür. Plakalar kurlenme için önce 1 saat 100 °C de bekletilmiş ve sonra geri kalan sürede oda sıcaklığında soğumaya bırakılmıştır. CFTE kompozit plakalar üretilirken özelliği düz örgülü 300 g/m<sup>2</sup> olan cam fiber kumaşlar kullanılmıştır. Aynı şekilde KFTE kompozit plakalar üretilirken de özelliği düz örgülü 245 g/m<sup>2</sup> olan karbon fiber kumaşlar kullanılmıştır. Tablo 1'de testlerde kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri gösterilmiştir.

**Tablo 1.** Fiber ve matris malzemelerinin mekanik özellikleri

	Cam Fiber	Karbon Fiber	Matris
Çekme Gerilmesi	2306 MPa	3800 MPa	72-76 MPa
Elastisite Modülü	81.5 GPa	240 GPa	2940-3100 MPa
Çekme birim şekil değiştirmesi	% 2,97	% 1,6	% 8,0-9,0

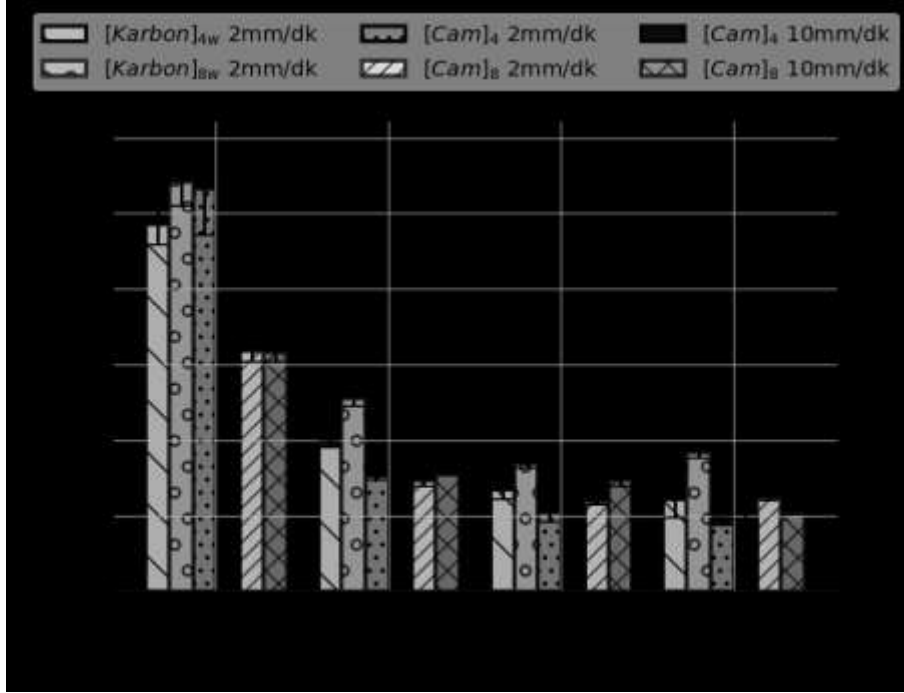
Kompozit plakalardan sırasıyla, oryantasyonları [0/90]<sub>w</sub>, [15/-75]<sub>w</sub>, [30/-60]<sub>w</sub> ve [45/-45]<sub>w</sub> olacak şekilde, bilgisayar kontrollü giyotin aracılığıyla numuneler kesilmiştir. Numunelerin boyutları ASTM D3039 standartlarına göre belirlenmiştir. Plakalardan, her bir test durumu için 3 numune hazırlanmıştır. Numune kesme işlemleri CFTE 4 katlı, CFTE 8 katlı, KFTE 4 katlı ve KFTE 8 katlı kompozit plakalar için tekrarlanmıştır. Kesme işlemleri sonunda toplam 72 numune 250 x 25 mm olarak hazırlanmıştır.

Numunelerin çekme testi esnasında, çekme cihazının çeneleri tarafından hasara uğramaması için uç kısımlarına 25 x 55 mm boyutlarında bakır parçalar yapıştırılmıştır. Yapıştırma işleminde siyanoakrilit bazlı MITREAPEL yapıştırıcısı kullanılmıştır. Testlerde bu yapıştırma bölgelerinde adezyon ya da kohezyon hasarı meydana gelmemiştir.

Hazırlanan numunelerin çekme dayanımları incelenmiştir. Çekme testleri ALŞA Universal Çekme Cihazında yapılmıştır. Çekme testleri ASTM D3039 standardına göre çekme hızı 2 mm/dk olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Çekme hızının etkisinin de gözlemlenebilmesi için CFTE numuneler için ek olarak 10 mm/dk testleri de gerçekleştirilmiştir. Testler sonunda maksimum gerilme, maksimum birim şekil değiştirme ve tokluk değerleri karşılaştırılmıştır. Çekme testlerinin tamamı oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Test işlemindeki süreçler Şekil 1'de şematik olarak özetlenmiştir. Numunelerin hazırlanışı, test düzeneği ve test sonrası numunelerin görüntüsü Şekil 2'de gösterilmiştir.



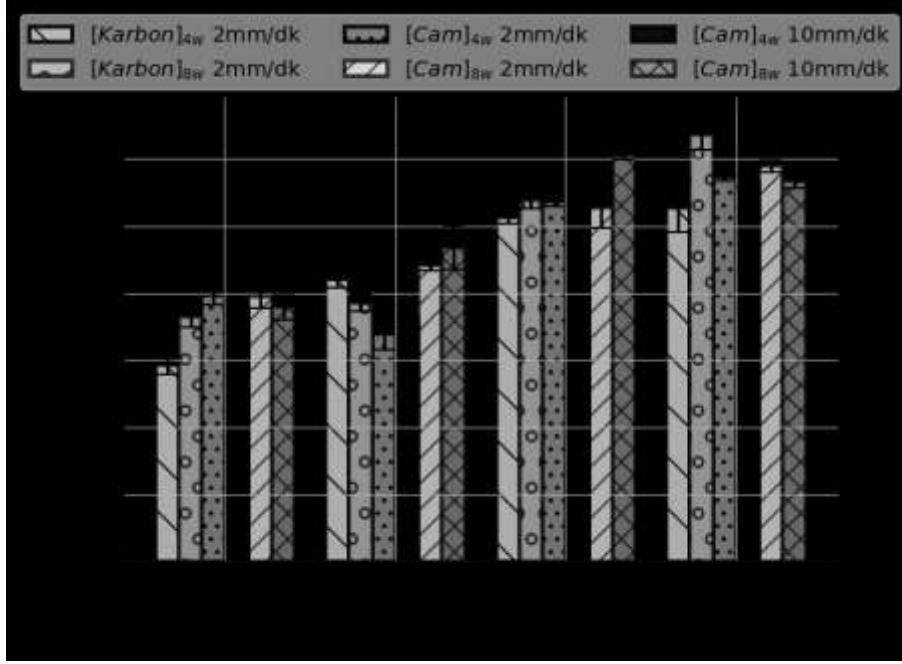
her iki fiber tipinde ve farklı test hızlarında da görülmektedir. Karbon fiber/epoksilerde katman sayısı arttıkça maksimum çekme gerilmesi artarken, cam fiber/epoksilerde  $[0/90]_w$  diziliminde ciddi düşüş gözlemlenmiştir. Diğer fiber açılarında kopma gerilmesi benzer niteliktedir. Çekme hızının maksimum çekme gerilmesi üzerinde önemli bir etkisi gözlemlenmemiştir.  $[0/90]_w$  oryantasyon haricindeki dizilimlerde karbon fiber/epoksiler cam fiber/epoksilere göre daha yüksek dayanım göstermektedir. Fiber yönündeki yüklemeler için 4 katmanlı karbon ve cam fiberlerin yakın mukavemet özellikleri göstermesi sebebiyle, bu tip durumlarda ekonomik olması açısından cam fiberlerin tercih edilmesi daha uygun olduğu değerlendirilmiştir.



Şekil 3. Maksimum çekme gerilmesinin oryantasyon, fiber tipi ve çekme hızı ile değişimi (Variation of failure stress with orientation, fiber type and tensile speed)

### 3.2 Kopma şekil değiştirmesi açısından deney sonuçları

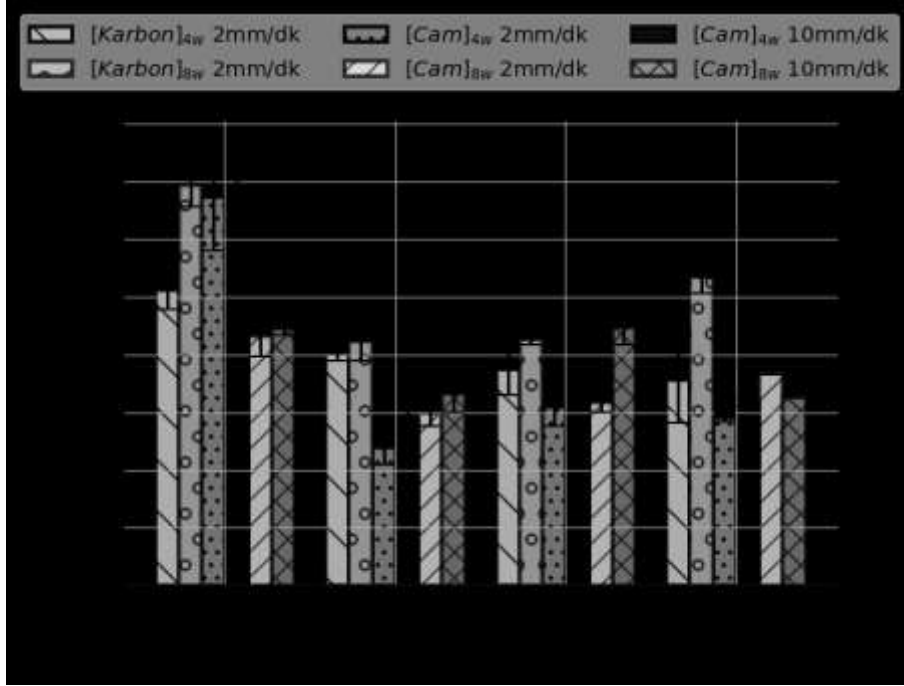
Şekil 4’de kopma şekil değiştirmesinin oryantasyon, fiber tipi ve çekme hızı ile değişimi gösterilmiştir. Birim şekil değiştirme açısından değerlendirildiğinde, çekme yönüyle yapılan açı arttıkça fiber/epoksi malzemeler gevrekten süneğe doğru bir davranış gösterir. Böylece oryantasyon açısı arttıkça genel olarak kopma şekil değiştirmesi de artmaktadır.  $[0/90]_w$  diziliminde karbon fiber/epoksiler cam fiber/epoksilere göre daha az uzarlar. Karbon fiber/epoksiler,  $[45/-45]_w$  oryantasyonda cam fiber/epoksilere göre daha fazla belirsizlik oluşturmuştur. Bu sebeple, bu oryantasyon diğer oryantasyonlarla beraber değerlendirildiğinde cam ve karbon fiber/epoksiler benzer kopma şekil değiştirmesi göstermiştir. Çekme hızının kopma şekil değiştirme üzerinde etkisi gözlemlenmemiştir. Çekme hızının ve oryantasyon açısının kopma şekil değiştirmesi üzerindeki etkileri birbirinden bağımsızdır.



Şekil 4. Kopma şekil değiştirmesinin oryantasyon, fiber tipi ve çekme hızı ile değişimi

### 3.3 Tokluk açısından deney sonuçları

Tokluk tasarımcılar açısından dikkate alınması gereken önemli bir parametredir. Böylece kırılma için birim hacimde harcanması gereken enerjiye göre malzeme seçimi yapılabilir. Tabakalı fiber/epoksi kompozitlerin tokluk açısından kıyaslanması Şekil 5’de gösterilmiştir. Şekil 3’de görüldüğü üzere maksimum çekme gerilmesi  $[0/90]_w$  de görülürken, Şekil 4’deki kopma şekil değiştirmesi  $[45/-45]_w$  oryantasyonda en yüksek değerine ulaşmıştır. Genel eğilim olarak  $[0/90]_w$  oryantasyon tokluk açısından en yüksek tokluğa sahiptir. Fiber tipleri açısından  $[0/90]_w$  oryantasyondaki cam fiber haricinde, karbon fiberler daha yüksek tokluğa sahiptir. Çekme hızının etkisi değerlendirildiğinde, genelde çekme hızıyla emilen enerji miktarı sınırlı seviyede artmıştır. Katman sayısının etkisine bakıldığında,  $[0/90]_w$  oryantasyondaki cam fiberler haricinde katman sayısı ile malzemede depolanan enerji artmıştır.



Şekil 5. Tokluğun oryantasyon, fiber tipi ve çekme hızı ile değişimi (Variation of toughness with orientation, fiber type and tensile speed)

#### 4. Sonuçlar

Bu çalışmada fiber/epoksi kompozit malzemelerin fiber tipinin (Cam ve Karbon fiber), çekme hızının (2 mm/dk ve 10 mm/dk), katman sayısının (4 kat ve 8 kat) ve oryantasyon açılarının ( $[0/90]_w$ ,  $[15/-75]_w$ ,  $[30/-60]_w$  ve  $[45/-45]_w$ ) mukavemete etkisi incelenmiştir. Bu amaçla tam faktöriyel deney tasarımıyla toplam 72 adet test gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar büyük veri işleme teknikleriyle parametrelerin birbirleriyle olan ilişkilerini içerecek şekilde değerlendirilmiştir. Bu çalışmada elde edilen bulgular genel olarak şu şekilde özetlenebilir:

- Oryantasyon açısı mukavemet üzerinde çok etkili olsa da, bu çalışmada incelenen diğer parametrelerle birlikte değerlendirildiğinde etkisi farklı oranlardadır.
- Maksimum çekme gerilmesi ve en yüksek enerji emilimi tüm durumlar için  $[0/90]_w$  oryantasyonunda gerçekleşmiştir. En fazla kopma şekil değiştirmesi  $[45/-45]_w$  oryantasyonunda oluşmuştur. Gerilme, kopma şekil değiştirmesi ve enerji emilimi ara dizilimlerde açıyla orantılı olarak değişmektedir.
- $[0/90]_w$  oryantasyonu haricindeki oryantasyonlarda karbon fiber/epoksiler, cam fiber/epoksilere göre daha yüksek dayanım göstermektedir. Fiber yönünde yüklemeye maruz kalacak az katmanlı tasarımlarda ekonomik açıdan cam fiberlerin, karbon fiberler ile benzer mukavemet özelliği göstermesi sebebiyle tercih edilmesi daha uygun olduğu değerlendirilmiştir.
- Karbon ve cam fiberlerde katman sayısının artmasıyla genelde bir mukavemet artışı olduğu gözlemlenmiştir.
- Cam fiber/epoksilerde 2 mm/dk ve 10 mm/dk hızları için yapılan testlerde, maksimum çekme gerilmesi ve kopma şekil değiştirmesinde önemli bir değişiklik gözlemlenmemiştir ve benzer davranış görülmüştür. Enerji emilimi açısından değerlendirildiğinde, çekme hızının armasıyla enerji emilimi sınırlı olarak artma eğilimindedir.

#### Teşekkür

Bu çalışma Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimince Desteklenmiştir. Proje Numarası: FBA-2020-3750.

### Kaynaklar

- [1] Tarfaoui M., Choukri S., Neme A., Effect of fibre orientation on mechanical properties of the laminated polymer composites subjected to out-of-plane high strain rate compressive loadings, *Compos. Sci. Technol.*, 68(2), 477-485, 2008.
- [2] Ekşi S., Genel K., Comparison of Mechanical Properties of Unidirectional and Woven Carbon, Glass and Aramid Fiber Reinforced Epoxy Composites, *Acta Phys. Pol. A*, 132(3-II), 879-882, 2017.
- [3] Banakar P., Shivananda H.K., Niranjan H.B., Influence of Fiber Orientation and Thickness on Tensile Properties of Laminated Polymer Composites, *Int. J. Pure Appl. Sci. Technol.*, 9, 2012.
- [4] Kaleemulla K.M., Siddeswarappa B., Influence of Fiber Orientation on the In-plane Mechanical Properties of Laminated Hybrid Polymer Composites, *J. Reinf. Plast. Compos.*, 29(12), 1900-1914, 2010.
- [5] Bie B.X., Huang J.Y., Fan D., Sun T., Fezzaa K., Xiao X.H., Qi M.L., Luo S.N., Orientation-dependent tensile deformation and damage of a T700 carbon fiber/epoxy composite: A synchrotron-based study, *Carbon*, 121, 127-133, 2017.
- [6] Wang H.W., Zhou H.W., Gui L.L., Ji H.W., Zhang X.C., Analysis of effect of fiber orientation on Young's modulus for unidirectional fiber reinforced composites, *Compos. Part B Eng.*, 56, 733-739, Oca. 2014.
- [7] Saad N.A., Hamzah M.S., Hamzah A.F., Numerical and Experimental Investigation for Tensile Properties of Polyphenylene Sulfide Basis Composite Material, *J. Babylon Univ.*, 10, 22, 2014.
- [8] Rahmani, H., Najafi, S. H. M., Saffarzadeh-Matin, S., Ashori, A., Mechanical properties of carbon fiber/epoxy composites: Effects of number of plies, fiber contents, and angle-ply layers. *Polymer Engineering & Science*, 54(11), 2676-2682, 2014.
- [9] Demircan G., Özen M., Kısa M., Flexural Properties of Glass Fiber Reinforced Epoxy Composites at Different Strain Rates, *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 22(64): 271-276, 2020.
- [10] Adem, E., Didwania, M., Reddy, G. M., Koricho, E. G., Experimental Analysis of E-Glass/Epoxy & E-Glass/polyester Composites for Auto Body Panel, *American International Journal of Research in Science, Technology, Engineering & Mathematics*, 10(4), 377-383, 2015.
- [11] Zhang Z., Hou S., Mao Y., He L., Han X., Rate-related study on the ply orientation of carbon fiber reinforced epoxy composite laminates, *Int. J. Mech. Sci.*, 1-37, 2020.
- [12] Zhou X.F., Wagner H.D., Fragmentation of two-Fiber hybrid micro composites: stress concentration factors and interfacial adhesion, *Compos. Sci. Technol.*, 60, 367-377, 2000.
- [13] Mahdi E., Hamouda A.M.S., Sebaey T.A., The effect of fiber orientation on the energy absorption capability of axially crushed composite tubes, *Mater. Des.* 1980-2015, 56, 923-928, 2014.
- [14] Okoli O.I., The effects of strain rate and failure modes on the failure energy of fibre reinforced composites, *Compos. Struct.*, 54, 299-303, 2001.
- [15] Darıcık F., Çelebi K., Karbon Lifi/Epoksi Tabakalı Kompozit Malzemelerin Farklı Ortam Şartlarındaki Mod I Kırılma Davranışı, *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 32(1): 223-234, 2017.