Pamukkale Univ Muh Bilim Derg, 28(1), 81-90, 2022

Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi

Pamukkale University Journal of Engineering Sciences

Karbon nanotüp ile güçlendirilmiş cam fiber/epoksi ve karbon fiber/epoksi kompozit borusal yapıların yarı-statik ezilme ve enerji emilimi davranışlarının incelenmesi

Investigation of quasi-static crushing and energy absorption behaviors of carbon nanotube reinforced glass fiber/epoxy and carbon fiber/epoxy composite tubular structures

Yasin YILMAZ[1*], *Hasan ÇALLIOĞLU*[2], *Ali BALBAY*[3]

[1]Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Pamukkale Üniversitesi, Denizli, Türkiye.
yyilmaz@pau.edu.tr

[2]Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Pamukkale Üniversitesi, Denizli, Türkiye.
hcallioglu@pau.edu.tr

[3]İnsansız Hava Aracı Teknolojisi ve Operatörlüğü Programı, Meslek Yüksekokulu, Ostim Teknik Üniversitesi, Ankara, Türkiye.
ali.balbay@ostimteknik.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 11.03.2021 Düzeltme Tarihi/Revision: 12.06.2021 doi: 10.5505/pajes.2021.68047
Kabul Tarihi/Accepted: 17.06.2021 Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Bu çalışmada, karbon nano tüp (CNT) katkılı cam fiber/epoksi (GFRP) ve karbon fiber/epoksi (CFRP) kompozit borusal yapıların ezilme ve enerji emilimi davranışları incelenmiştir. Çalışma iki ana kısımdan oluşmaktadır. Birinci kısım, deneysel çalışmalardan oluşmaktadır. Bu aşamada fonksiyonelleştirilmiş çok duvarlı CNT katkılı (ağırlıkça %0.1; 0.2; 0.3; 0.5; 1; 2 oranlarında) ve katkısız cam fiber/epoksi kompozit plakalar, el yatırması yöntemi ile üretilmiş ve çekme, basma ve kayma deneyleri gerçekleştirilerek kompozit malzemelerin mekanik özellikleri belirlenmiştir. Bu incelemeler sonucunda çeki, bası ve kayma mukavemeti açılarından kompozit numune için %0.5 CNT oranının en uygun olduğu görülmüştür. İkinci kısım ise, sayısal çalışmalardan oluşmaktadır. Bu aşamada belirlenen mekanik özellikler kullanılarak, sonlu elemanlar tabanlı bir paket programı (ABAQUS) yardımıyla kare ve dairesel kesitli cam elyaf/epoksi ve karbon elyaf/epoksi kompozit boruların yarı statik ezilme ve enerji emilimi davranışları sayısal olarak incelenmiştir. Karbon fiber/epoksi kompozit malzemeye ait malzeme özellikleri literatürden elde edilmiştir. Sayısal analizler sonucunda karbon fiber takviyeli dairesel kesitli kompozit boruların spesifik enerji emilimi kapasitesinin diğer borularla karşılaştırıldığında daha yüksek olduğu görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Kompozit malzeme, Karbon nanotüp, Cam fiber, Karbon fiber.

Abstract

In this study, crushing and energy absorption behavior of carbon nanotube (CNT) reinforced glass fiber/epoxy (GFRP) and carbon fiber/epoxy (CFRP) composite tubular structures has been investigated. The study consists of two main parts. First part deals with the experimental studies. At this stage, functionalized multi-walled CNT added (at weight percentages of 0.1; 0.2; 0.3; 0.5; 1; 2%) and additive free GFRP composite plates were produced using hand lay-up method and tension, compression and shear tests were carried out to determine mechanical properties of the composite materials. As a result of these investigations, 0.5% CNT addition is determined to be most suitable rate for the composite in terms of tension, compression, and shear strength. The second part deals with the numerical studies. At this stage, quasi-static crushing and energy absorption characteristics of circular and square cross-section GFRP and CFRP tubes were investigated numerically using the determined mechanical properties in a commercial finite element based software (ABAQUS). The mechanical properties of CFRP tubes were taken from the existing literature. As a result of numerical studies, the specific energy absorption capacity of circular CFRP tubes was found to be most efficient compared to the other tubes.

Keywords: Composite materials, Carbon nanotube, Glass fiber, Carbon fiber.

1 Giriş

Son yıllarda kompozit malzemelerin kullanımı birçok alanda olduğu gibi otomotiv sektöründe de artış göstermiştir. İki veya daha fazla bileşenin makroskobik seviyede birbirleri içinde çözünmeden birleşmesiyle oluşan yapısal malzemelere kompozit malzeme denilmektedir [1],[2]. Bileşenlerden biri takviye elemanıyken diğeri de matristir. Büyük otomotiv şirketleri araçların şaseleri de dâhil olmak üzere temel parçalarını cam fiber-karbon fiber/epoksi ve diğer kompozit malzemeler kullanarak yapmayı hedeflemektedirler.

Kompozit malzemeler otomotivde birçok parçanın yanında enerji sönümleyici parçalar olarak da kullanılmaktadırlar. Araçlarda tampon kirişi ve enerji emici yapılar kompozit malzemelerden imal edilerek hem daha sağlam hem daha hafif olabilmektedir. İnce duvarlı yapılar veya borular enerji emici eleman olarak çoğunlukla kare ve dairesel yüzey şekillerinde yaygın olarak kullanılmaktadırlar [3]. Bu yapıların amacı eksenel ve yanal yönden üzerine gelen kuvvetlerin enerjisini emmek ve bunun yanı sıra üzerine gelen maksimum kuvvet değerlerini düşürmektir. Bu da çarpışma esnasında enerjinin sönümlenmesi ile yolcu güvenliğinin artmasını sağlamaktadır.

Son zamanlarda sanayi ve araştırmacıların büyük ilgisini çeken kompozitlerin mekanik özelliklerini arttırmanın bir yolu, fiberle güçlendirilmiş kompozitlerin içerisine (grafen, karbon nanotüp veya nano kil gibi) nano boyutta güçlendirici parça

*Yazışılan yazar/Corresponding author

eklenmesidir [4]. Matrisin içerisine veya cam fiber-karbon fiberle güçlendirilmiş kompozitin içerisine CNT ilavesi kompozitin dayanımının artmasını sağlar. Bu kapsamda, Montazeri ve Montazeri [5], farklı ağırlık oranlarında (%0.1, 0.5, 1 ve 2) çok duvarlı karbon nanotüp (MWCNT) içeren, karbon nanotüp/epoksi kompozitlerin viskoelastik ve mekanik özelliklerini, çekme ve dinamik mekanik termal analiz testleri yaparak belirlemişlerdir. Epoksi reçinesine ağırlıkça %0.5 MWCNT yüklemesinin, saf ve diğer nanokompozitlere kıyasla viskoelastik özelliklerde en yüksek gelişmeyi gösterdiğini belirlemişlerdir. Saf epoksi ile karşılaştırıldığında, oda sıcaklığında ağırlıkça %0.5 MWCNT/epoksi de, depolama modülünde %46'lık bir gelişme olduğunu, bununla birlikte, nanokompozitlerdeki daha düşük çapraz bağ yoğunlukları nedeniyle, yüksek MWCNT içeriği ile camsı geçiş sıcaklığının düştüğünü gözlemlemişlerdir. Muthu ve Dendere [6] araştırmalarında; ağırlıkça farklı oranlardaki (%0.1, 0.5 ve 1) karbon nanotüpleri, cam-elyaf/polimer kompozite takviye ederek mekanik özelliklere etkisini incelemişlerdir. Sonuçlar, ağırlıkça %0.5 işlevselleştirilmiş CNT'ler ile güçlendirilmiş GDRP hibrit kompozitlerin, düz GFRP, ağırlıkça %0.1 ve ağırlıkça %1 işlevselleştirilmiş CNT kompozitlerden daha iyi mekanik özelliklere sahip olduğunu göstermektedir. Ağırlıkça %1 CNT oranında, topaklanmaların önlenemediği ve bunun, hibrit kompozitlerin zayıf mekanik özelliklerine yol açtığı belirlenmiştir. Jia ve diğ. [7], üç farklı tip çok duvarlı karbon nanotüpler (MWCNTs) eklenmiş filaman sarılmış CFRP silindirlerin basma ve çekme davranışlarını incelemişlerdir. MWCNTs olarak, ham MWCNTs, MWCNTs-NH2 ve MWCNTs-COOH kullanmışlardır. MWCNTs ilavesinin çekme elastisite modülünü az oranda attırırken basma modülünü önemli oranda artırdığını belirlemişlerdir. Özellikle MWCNTs-NH2 katkısının, MWCNTs-COOH ve ham MWCNTs katkısı ile karşılaştırıldığında, homojen dağılım ve daha iyi ara yüzey yapışması nedeniyle silindirin basma elastisite modülünü %63.7 oranında arttırdığını gözlemlemişlerdir. Zhou ve diğ [8] çalışmalarında, CNT katkısının karbon fiber/epoksi kompozitin dayanım ve kırılma davranışlarına olan etkisini deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. CNT çeşidi olarak MWCNT kullanılmıştır ve epoksi içerisine ağırlıkça %0.5 oranında ilave edilmiştir. Kısa kiriş kayma deneyleri yapılmış ve kompozitin içerisindeki hasarın yayılması SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) ile gözlemlenmiştir. Matris içerisindeki CNT lerin, kompozit içerisinde matris ve fiberin birbirine bağlanma yeteneğini, malzeme tokluğunu ve tabakalar arası çatlak yayılma dayanımını arttırdığını ifade etmişlerdir.

Kompozit borusal yapıların ezilme ve enerji emilim davranışlarıyla ilgili gerçekleştirilen sayısal ve deneysel araştırmalar kapsamında, Huang ve Wang [9], karbon fiber ile güçlendirilmiş kompozit tüplerin eksenel ezilme davranışlarını incelemek için yarı-statik testler gerçekleştirmişlerdir. Ayrıca gerçekleştirdikleri sayısal çalışmada Chang-Chang hasar kriterlerine dayalı iki katmanlı sonlu eleman modelinin, borusal kompozit numunelerin enerji emilim özelliklerini ve ezilme hasar modunu temsil etmede etkili olduğunu gözlemlemişlerdir. Kim ve diğ. [10], epoksi reçineli, karbon, Kevlar ve karbon-Kevlar hibrit elyaf kompozitlerden yapılan farklı türdeki dairesel kesitli tüplerin hasar modlarını ve enerji emilim davranışlarını belirlemek için çalışmalar yürütmüşlerdir. Farklı elyaf ve desenler için ezilme parametreleri (özgül enerji emilimi, maksimum tepe yükü, ortalama ezilme yükü) ile malzeme özellikleri arasındaki ilişki de araştırılmıştır. Çalışma sonucunda dokuma karbon/epoksi tüplerin en iyi enerji emilim kapasitesine (özgül enerji emilimi, %81.7) sahip oldukları belirtilmiştir. Sokolinsky ve diğ. [11], yarı-statik ezilmeye maruz kalan bir oluklu karbon-epoksi kumaş kompozit plakanın fizik tabanlı bir sonlu eleman modelini oluşturmuşlardır. Geliştirdikleri model hem düzlem içi hem de katmanlar arası delaminasyon hasar mekanizmasını hesaba katmaktadır. Analizlerde Abaqus/Explicit sonlu eleman paket programını kullanmışlardır. Zhang ve diğ. [12], örgülü kompozit boruların yarı statik eksenel ezilme sürecini simüle etmek için, Abaqus/Explicit ortamında örgülü kompozit malzemeler için bir kullanıcı malzeme modeli olarak geliştirilen aşamalı bir hasar modeli kullanmışlardır. Siromani ve diğ. [13] eksenel yükleme altındaki ince cidarlı grafit/epoksi tabakalı dairesel tüplerin enerji emilim ve ezilme davranışlarını belirlemek için LS-DYNA sonlu eleman programında bir sonlu eleman modelleme yöntemi geliştirmişlerdir. Chiu ve diğ. [14], tabakalı kompozit yapıların ezilmesinin simülasyonu için, tabaka içi ve tabakalar arası hasarı göz önünde bulunduran bir kompozit hasar modelinin teorisini ve uygulamasını detaylandırmışlardır. Geliştirilen hasar modeli, standart ve standart olmayan malzeme karakterizasyon testlerinin bir kombinasyonundan elde edilen bir dizi malzeme parametresini gerektirmektedir. Tabaka içi hasar modeli, bir VUMAT altyordamı olarak uygulanmış ve Abaqus/Explicit'te mevcut tabakalar arası bir hasar modeli ile birlikte kullanılmıştır. Tan ve diğ. [15], kompozit laminaların ezilme yüklemesi altındaki davranışını doğru bir şekilde temsil eden üç boyutlu bir hasar modeli sunmuşlardır. Hem tabaka içi hem de tabakalar arası hasar mekanizmalarını hesaba katmışlardır. Ezilme hasarı modeli ABAQUS/Explicit'te bir VUMAT alt yordamı olarak uygulanmıştır. Wang ve diğ. [16], farklı elyaf oryantasyonuna ve et kalınlığına sahip karbon elyaf / epoksi kompozit tüplerin çökme özelliklerini ve enerji emme kabiliyetlerini eksenel yarı statik ve darbeli ezilme koşulları altında incelemişlerdir. Çalışmada, elyaf oryantasyonu, duvar kalınlığı ve yükleme koşullarının ezilme modu ve enerji yutma kabiliyeti üzerindeki etkileri tartışılmıştır. Reuter ve diğ. [17], eksenel darbeli yükleme altında dairesel CFRP tüplerinin deneysel ve sayısal ezilme analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Bu amaçla, karbon fiber takviyeli plastik dairesel çarpma tüpleri, düşürme kulesi testlerinde incelenmiştir. Kalibrasyon parametrelerini belirlemek için düz numune testleri gerçekleştirilmiştir ve sonlu elemanlar simülasyonunda kullanılan enine izotropik bir malzeme kartının verimli bir şekilde yeniden parametrelendirilmesi için kullanılmıştır. Waimer ve diğ. [18], dinamik çarpma yüklerine maruz kalan karbon fiber takviyeli plastik elemanların ilgili hasar mekanizmalarını uygun şekilde temsil etmek için sayısal bir simülasyon yönteminin araştırılmasını yürütmüşlerdir. Sunulan çalışma, bir dizi sürekli kabuk elemanları ve birleşik elemanlar kullanarak yığılmış kabuk yaklaşımını ele almış ve simülasyon girdi parametrelerinin kalibrasyonuna odaklanmıştır. Ayrıca aşamalı ezilme simülasyonunda sonlu eleman ağ bağımlılıklarını azaltmak için modelleme yönleri tartışılmıştır. Zhang ve diğ. [19] ara çap, duvar kalınlığı ve üst uç çapı gibi geometrik parametrelerin kompozit tüplerin, metal tüplerin, köpük dolgulu tüplerin ve hibrit tüplerin spesifik enerji emilimi üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Bu tüplerin mekanik özellikleri (eksenel sıkıştırma tepkisi), ticari sonlu elemanlar paket programı LS-DYNA ile sayısal olarak tahmin edilmiştir. Kullanılan cam elyaf takviyeli polimerin hasar parametrelerini belirlemek için yarı statik eksenel sıkıştırma testleri yapılmıştır. Zhu ve diğ. [20] ticari sonlu elemanlar kodu Abaqus/Explicit'te uygulanan bir temel model oluşturarak

CFRP yapılarının hesaplamalı tasarımını gerçekleştirmişlerdir. Kare CFRP tüp üzerinde deneysel ezilme testlerini simüle etmek için iki farklı sayısal model (yani, tek katmanlı kabuk modeli ve istifli kabuk modeli) geliştirilmiştir. Doğrulanmış modelleme yaklaşımına dayanarak, farklı kesit geometrileri ve kalınlıkları olan birkaç CFRP ince duvarlı yapının ezme davranışları da araştırılmıştır. Dairesel tüpün, aynı duvar kalınlığına sahip tüm farklı tüp konfigürasyonlarında üstün özgül enerji absorpsiyon kapasitesi gösterdiği, yani dairesel kesitli tüpün çarpışmaya dayanıklı bir CFRP yapısı olarak iyi bir potansiyele sahip olduğu bulunmuştur. Patel ve diğ. [21], karayolu taşıt kazaları sırasında çarpışma kuvvetlerini dağıtırken bir enerji emicinin çarpışmaya dayanıklılık parametrelerini etkileyen tasarım değişkenlerini değerlendirmek için bir çalışma yürütmüşlerdir. Sebepleri bulmak için ABAQUS / Explicit yazılımının sonlu eleman kodu ile doğrusal olmayan ezilme analizi gerçekleştirmişlerdir. Eksenel ve eğik darbe yüklemeleri altında kompozit malzemelerin homojen ve heterojen kat oryantasyon modelli yapısı üzerinde çarpma dayanımına göre hafif araç uygulamaları için uygun model veya yapının belirlenmesi amacıyla bir araştırma yapılmıştır. Karbon fiber takviyeli plastik ve cam elyaf takviyeli plastik gibi malzemelerle, eksenel ve eğik yükleme koşulları altında kompozit bir tüpün enerji emilimini araştırmak için tepe kuvveti ve deformasyon uzunluğu gibi çarpmaya dayanıklılık parametreleri dikkate alınmıştır.

Bu çalışmada, CNT katkılı cam fiber/epoksi ve karbon fiber/epoksi kompozit yapıların ezilme ve enerji emilimi davranışları incelenecektir. İlk önce, CNT katkılı ve katkısız cam fiber/epoksi kompozit plakaların üretim basamakları anlatılacak ve bu plakalar ASTM standartlarında kesilerek malzemelerin mekanik özellikleri çekme, basma ve kayma testleri ile elde edilecektir. Katkı, yukarıda verilen literatüre uygun olarak epoksi içerisine ağırlıkça % 0.1; 0.2; 0.3; 0.5; 1; 2 oranlarında CNT ilavesi ile olacaktır. Karbon fiber/epoksi kompozite ait malzeme özellikleri mevcut literatürden elde edilecektir. Çalışmanın devamında kompozitlerin mekanik özellikleri kullanılarak sonlu elemanlar paket programı yardımıyla kare ve dairesel olmak üzere iki farklı profilde darbe emici boruların yarı statik ezilme ve enerji emilimi davranışları belirlenecektir.

2 Deneysel analiz

Bu kısımda katkısız, ağırlıkça % 0.1; 0.2; 0.3; 0.5; 1; 2 oranlarında karbon nanotüp katkılı 7 adet cam elyaf/epoksi kompozit plaka üretilmiş ve herbirine ait mekanik özellikler belirlenmiştir.

2.1 Kullanılan malzemeler

Üretimde kullanılan fiber kumaş, Metyx Composites firmasının üretmiş olduğu L300 E10C-0 Unidirectional Cam Elyaf adlı üründür. Bu üründe 330 gr/m^2 ağırlığındaki cam elyaf kumaş kullanılmıştır. Kullanılan matris EP828 EPIKOTE(TM) RESIN 828 adlı ürün ve kürleştirici EK875 EPIKURE(TM) Curing Agent 875 DRUM adlı üründür. Plakaların üretiminde ağırlıkça %60 cam elyaf fiber, %40 matris kullanılmıştır. Kompozit plakaların üretimi İzmir'de kompozit malzeme üretimi yapan İzoreel firmasında gerçekleştirilmiştir. Katkı maddesi olarak Ege Nanotek firmasından temin edilen karbon nanotüp kullanılmıştır. Kullanılan çok duvarlı karbon nanotüpün özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Karbon nanotüpün mekanik özellikleri.

Table 1. Mecanical properties of carbon nonotube.

Saflık	OH (kütlece)	Dış Çap (nm)	Uzunluk (μm)	Yoğunluk (g/cm^3)
%98	%1.76	10-20	0.5-2.0	0.22

2.2 Kompozit malzemelerin üretimi

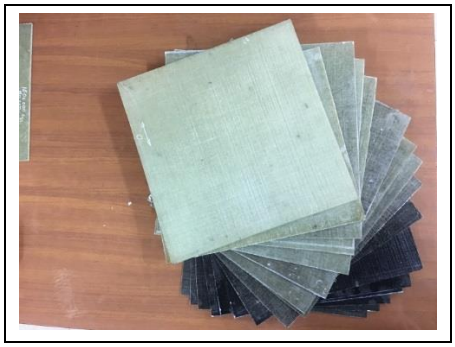
Öncelikle sayısal analizlerde (ABAQUS sonlu eleman paket programında) enerji emici yapıda kullanılacak kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla karbon nanotüp katkılı ve katkısız cam fiber/epoksi plakalar üretilmiştir. Çok duvarlı karbon nano tüp (MWCNT) katkılı kompozit plakalar ağırlıkça 6 farklı MWCNT katkı oranında (%0.1; 0.2; 0.3; 0.5; 1 ve 2) el yatırması yöntemi kullanılarak üretilmiştir. Karbon nanotüp katkısının mekanik özelliklere etkisini daha iyi görebilmek için katkısız kompozit plakalar da üretilmiştir. Kompozit plakaların üretiminde simetrik bir yapı oluşturması ve üretim kolaylığı sağlaması dikkate alınarak cam elyaftan çapraz takviyeli olarak 9 kat kullanılmıştır (0/90/0/90/0/90/0/90/0). Nano karbon tüpler Hielscher marka UP400S modeli ultrasonik karıştırıcı yardımıyla epoksi içerisine homojen olarak dağıtılmıştır. Ultrasonik karıştırıcı 400 watt gücündedir. Karıştırma işlemi soğutucu sistem yardımıyla 30 dk. boyunca yapılmıştır (Şekil 1).



Şekil 1. Karışımın ultrasonik karıştırıcıda karıştırılması.

Figure 1. Mixing of the mixture.

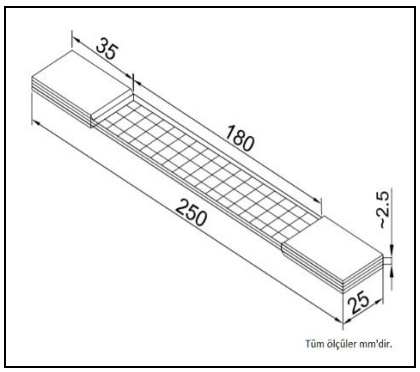
Elyaf dokuma kumaşlar yukarıda belirtilen sıralamaya göre teker teker elle serilerek her bir katmana hazırlanan epoksi karışımı sürülmüştür. Kompozit kumaşlar hidrolik preste 8 bar basınçta ve 130 ºC'de 2 sa. boyunca kürlenerek kompozit levha haline getirilmiştir. Numuneler 30x30 cm boyutunda olacak şekilde kenarlarından tıraşlanmıştır. Üretilen numuneler Şekil 2'de gösterilmiştir. Numunelerin ortalama yoğunluğu yaklaşık olarak 1.90 g/cm^3'tür.



Şekil 2. Üretilen 30x30 cm kompozit plakalar.

Figure 2. Produced 30x30 cm composite plates.

Hazırlanan plakalar su jeti ile ASTM D3039 standardına (Şekil 3) göre 250x25 mm ebatlarında kesilerek mekanik testler için deney numuneleri hazırlanmıştır.



Şekil 3. Deney numunesinin teknik resim çizimi.

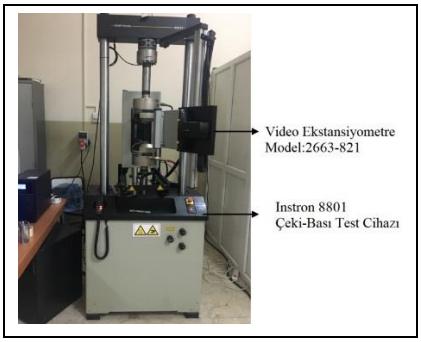
Figure 3. Technical drawing of experiment sample.

2.3 Mekanik testler

Karbon nanotüp katkısıyla hazırlanan plakalar ve katkısız plakanın mekanik özelliklerin tespiti için çekme, basma ve kayma deneyleri yapılmıştır.

2.3.1 Çekme deneyi

Üretilen numunelerin tek eksende çekme deneyleri yapılmıştır. Deneylerde katkısız ve katkı oranları belirlenmiş her bir malzeme için 3 deney yapılmış ve bunların ortalamaları alınmıştır. Deneyler Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünde bulunan Şekil 4'te gösterilen 50 kN kapasiteli Instron 8081 çekme-basma cihazında gerçekleştirilmiştir ve numunelerin uzaması video ekstansiyometre ile ölçülmüştür. Çekme hızı 1 mm/dk. olarak alınmıştır. Bu ölçümler sonucunda fiber doğrultusundaki boyuna elastisite modülü (E_1) ve boyuna çekme mukavemeti (X_t) parametreleri kaydedilmiş ve grafikleri çizdirilmiştir. Çekme deneyleri sonunda cihazdan elde edilen gerilme-şekil değiştirme grafikleri yardımıyla maksimum kopma yükü ve çekme gerilme değerleri belirlenmiştir.



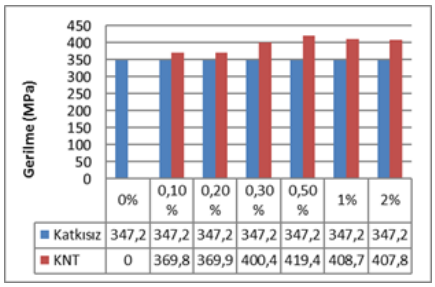
Şekil 4. Instron çekme-basma test cihazı.

Figure 4. Instron tension-compression test device.

2.3.1.1 1 yönündeki deney sonuçları

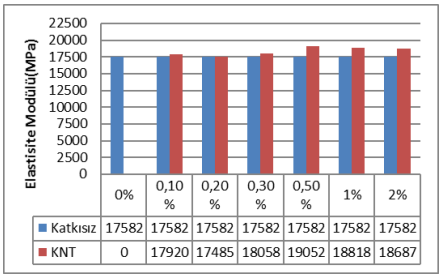
Katkı maddesi oranlarına göre 1 yönündeki, maksimum yük altında çekme gerilme değerleri Şekil 5'te ve Elastisite modülü (E_1) değerleri Şekil 6'da verilmiştir.

Fiber yönüne dik doğrultudaki (2 indisi ile gösterilmektedir) elastisite modülü, E_2, ve kopma mukavemeti, Y_t, kullanılan cam elyaf kompozit plaka içerisine simetrik yerleştirildiği için fiber doğrultusunda elde edilen mekanik özelliklere eşittir. Poisson oranı değerleri ise cihaz üzerine bağlanan video ekstansometre kullanılarak elde edilmiştir. Elde edilen değerler Tablo 2'de verilmiştir.



Şekil 5. Katkı maddesi oranlarına göre 1 yönündeki maksimum yük altında çekme gerilmesi.

Figure 5. Tensile stress at maximum tension load in direction 1 for different weight ratios of CNT.

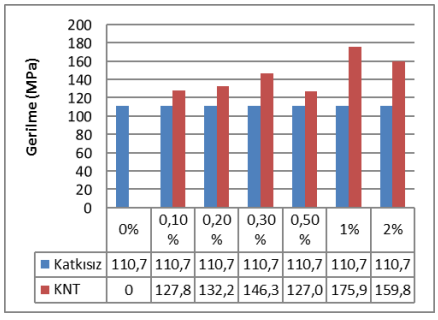


Şekil 6. 1 yönündeki elastisite modülü değerleri.

Figure 6. Elastic modulus values in direction 1.

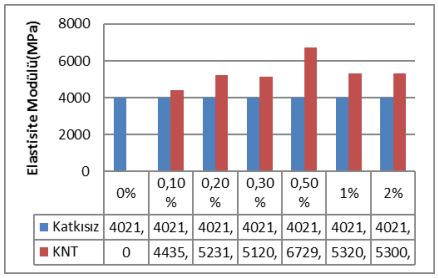
2.3.1.2 1-2 (45⁰) Yönündeki deney sonuçları

Katkı maddesi oranlarına göre 1-2 (45⁰) yönündeki, maksimum yük altında çekme gerilme değerleri Şekil 7'de ve Elastisite modülü (E_x) değerleri Şekil 8'de verilmiştir.



Şekil 7. Katkı maddesi oranlarına göre 1-2 (45⁰) yönündeki maksimum yük altında çekme gerilmesi.

Figure 7. Tensile stress at maximum tension load in direction 1-2 (45⁰) for different weight ratios of CNT.



Şekil 8. 1-2 (45⁰) yönündeki elastisite modülü değerleri.

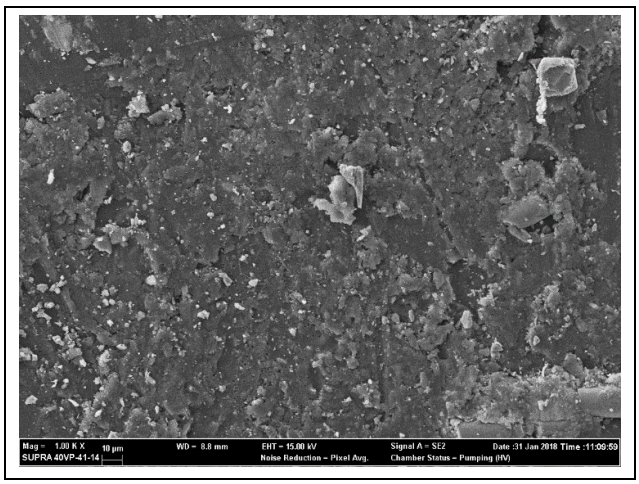
Figure 8. Elastic modulus values in Direction 1-2 (45⁰).

Tablo 2. Çekme deneyi sonuçları.

Table 2 Results for tension test.

Mekanik Özellikler	%0C	%0.1C	%0.2C	%0.3C	%0.5C	%1C	%2C
Elastisite Modülü, E_1=E_2 (MPa)	17.582	17.920	17.485	18.058	19.052	18.819	18.688
Poisson Oranı, ν_{12}	0.072	0.086	0.088	0.093	0.100	0.096	0.086
Kopma Mukavemeti, X_t= Y_t (MPa)	347.3	369.8	370.0	400.4	419.5	408.8	407.9

Çekme deneyi sonuçlarına göre epoksi içerisindeki karbon nanotüpün ağırlıkça %0.5 oranında doyuma ulaştığı ve %0.5 den sonra epoksi reçinesi ile bağ kuramamasından dolayı negatif etki oluşturduğu düşünülmektedir (Şekil 9).

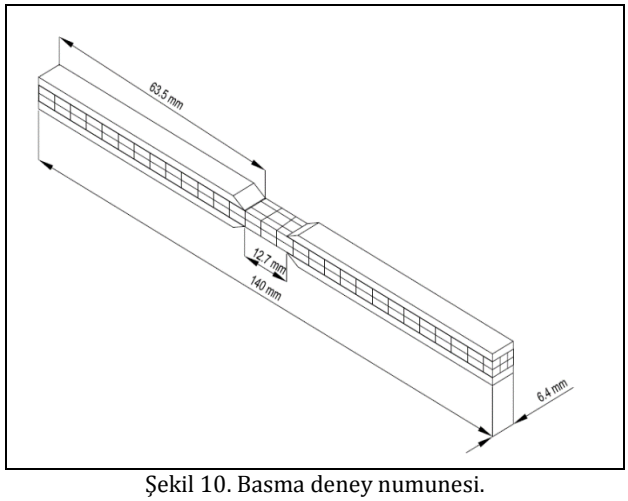


Şekil 9. %0.5 karbon nanotüp katkılı numunenin SEM görüntüsü.

Figure 9. The SEM image of 0.5% carbon nanotube weight fraction sample.

2.3.2 Basma deneyi

Basma deneyinden fiber yönü doğrultusundaki basma mukavemeti (X_c), fiber yönüne dik doğrultudaki basma mukavemeti (Y_c) değerleri bulunacaktır. Bu amaçla numuneler ASTM D3410 standardına göre su jeti ile kesilerek deney numuneleri hazırlanmıştır (Şekil 10). Bası yüklemeleri numunelerde hasar meydana gelene kadar uygulanmıştır. Kompozitleri hasara uğratan bası yükleri numune kesit alanına bölünerek kompozit malzemelere ait basma mukavemetleri X_c ve Y_c belirlenmiştir. Elde edilen değerler Tablo 3'te verilmiştir.

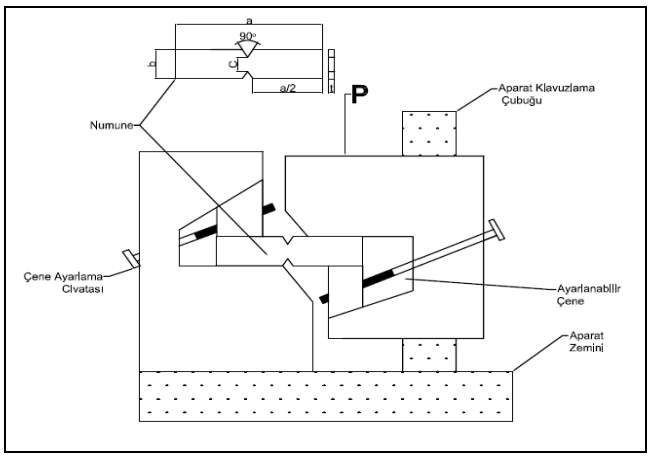


Şekil 10. Basma deney numunesi.

Figure 10. Compression test sample.

2.3.3 Kayma mukavemeti deneyi

Kayma mukavemetleri Şekil 11'de görülen Iosepescu aparatı kullanılarak Iosepescu kayma deneyine göre numunelere basma yüklerinin uygulanmasıyla elde edilmiştir.



Şekil 11. Iosepescu kayma deney aparatı.

Figure 11. Iosepescu shear experiment device.

Bu test düzeneği, iki çentik arasındaki numunenin ortasında bulunan yerde eğilme mukavemeti olmaksızın sadece kesme yükünün bulunması için yapılır. Kayma mukavemetlerinin belirlenmesi için numune ebatları ise a=76 mm, b=20 mm ve c=12 mm şeklindedir.

Ortalama kesme mukavemeti için aşağıdaki Denklem (1)'de verilmiştir.

$$S_{12} = \tau = \frac{P}{c.t} \tag{1}$$

Burada P uygulanan yük, c çentiklerin uçları arasındaki mesafe ve t ise numune kalınlığıdır. Çekme deneylerinden elde edilen veriler kullanılarak kayma modülü aşağıdaki Denklem (2)'den hesaplanabilir [22]. Elde edilen sonuçlar Tablo 4'te verilmiştir.

$$G_{12} = \frac{1}{\left(\frac{4}{E_x} - \frac{1}{E_1} - \frac{1}{E_2} + \frac{2\nu_{12}}{E_1}\right)} \tag{2}$$

3 Sayısal analiz

Geleneksel olarak bir yapının enerji emilim verimliliği açısından tasarımı deneysel testlere dayanmaktadır. Farklı doğrultulardan yükleme durumları göz önüne alındığında, kompozit bir yapının çarpışma analizinin deneysel olarak gerçekleştirilmesi yüksek maliyetler doğurmaktadır. Ek olarak ilk tasarım aşamasında anlamlı deneysel bir program oluşturmak zordur. Dolayısıyla kompozitlerin çapışma cevabının ve enerji emilim davranışının doğru olarak simule edilmesi ürün geliştirme sürecinin maliyetini ciddi oranda düşürebilmektedir. Fakat kompozitlerin çarpışmasının fiziksel olarak simule etmek çok karmaşıktır.

Tablo 3. Basma deneyi sonuçları.

Table 3 Results for compression test.

Mekanik Özellikler	%0C	%0.1C	%0.2C	%0.3C	%0.5C	%1C	%2C
Basma Mukavemeti, X_c= Y_c (MPa)	182	187	194	203	230	209	195

Tablo 4. Kayma deneyi sonuçları

Table 4 Results for shear test.

Mekanik Özellikler	%0C	%0.1C	%0.2C	%0.3C	%0.5C	%1C	%2C
Kayma Mukavemeti, S (MPa)	53	57	62	66	70	67	64
Kayma Modülü, G_{12} (MPa)	1125	1250	1515	1470	2000	1525	1522

Çünkü kompozitler enerjiyi laminalar arası (delaminasyon) ve birçok lamina içi (düzlem içi) kırılma mekanizmalarının birleşimi ile absorbe ederler.

Kompozit malzemelerin spesifik enerji emiliminin deneysel karakterizasyonu genellikle farklı geometrilerdeki ince cidarlı tüp numuneler kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Bir yapının enerji emilimi açısından tasarımındaki genel amaç, içerdiği personelin en az zarar görmesi için mümkün olduğunca darbe enerjisini sönümlemesi ve maksimum darbe yüklerini düşürmesidir. Bir çarpışma esnasındaki enerji emilimi matematiksel olarak aşağıdaki formülle hesaplanabilir.

$$EA = \int_0^d F(x)dx \tag{3}$$

Burada EA enerji emilimini; d çarpışma mesafesini ve $F(x)$ çarpışma kuvvetini temsi etmektedir. Bir yapının enerji emiliminin ağırlıkça verimini hesaplamak için spesifik enerji emilimi (SEA) kullanılır:

$$SEA = \frac{EA}{m} \tag{4}$$

Burada m çarpışan yapının kütlesidir. Yüksek SEA değeri yapının yüksek enerji emilim verimliliğini gösterir. Maksimum çarpışma kuvveti (PCF) çarpışma sürecindeki maksimum darbe yükü anlamına gelmektedir ve sıklıkla dinamik çarpışmada yavaşlama ile ilişkilidir. Çarpışma kuvveti verimliliği (CFE) ortalama çarpışma kuvvetinin F_{ort}, PCF'ye oranı olarak tanımlanır:

$$CFE = \frac{F_{ort}}{PCF} \tag{5}$$

Maksimum kuvvet ve enerji emilim verimliliğini dengelemek için CFE mümkün olduğunca yüksek bir değer olmalıdır.

Bu bölümünde bir önceki bölümde elde edilen malzeme özellikleri kullanılarak cam fiber/epoksi ve karbon fiber/epoksi kompozit yapıların enerji emilim davranışları sonlu eleman tabanlı bir program olan Abaqus/Explicit ortamında gerçekleştirilecektir. Karbon fiber/epoksy kompozit yapılara ait malzeme özellikleri mevcut literatürden temin edilecektir. İki farklı geometrik yapıda (dairesel ve karesel) ince cidarlı kompozit tüpün modellemesi yapılacaktır.

3.1 Yapı modeli

Bu bölümde Abaqus/Explicit ortamında modellenecek kompozit katmanlar için kullanılacak yapısal model tanımlanacaktır. Fabrik fiberlerle güçlendirilmiş kompozit katman, homojen ortotropik malzeme olarak modellenmiştir. Bu malzeme modeli fiber/matris kırılmasından dolayı katılık azalmasını ve kesme yüklemesi altında plastik deformasyonu analiz etme kabiliyetine sahiptir.

Fabrik elyaf takviyeli kompozit katmandaki fiber yönleri birbirine dik olarak alınmıştır. Gerilme-birim şekil değiştirme ilişkileri, taban vektörü fiber doğrultusunu gösterecek şekilde lokal bir Kartezyen koordinat sistemi kullanılarak formülize edilmiştir. Düzlem içi elastik gerilme-birim şekil değiştirme ilişkileri, ortotropik hasar elastikliği kriterine göre şu şekilde ifade edilebilir [11],[20],[23]:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{12}^{el} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{(1-d_1)E_1} & -\frac{\nu_{12}}{E_1} & 0 \\ -\frac{\nu_{21}}{E_2} & \frac{1}{(1-d_2)E_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{(1-d_{12})2G_{12}} \end{bmatrix} \tag{6}$$

Bu denklemde 1 ve 2 alt indisleri (1 boylamasına, 2 enlemesine) fiber yönlerini, $\varepsilon = \{\varepsilon_{11} \quad \varepsilon_{22} \quad \varepsilon_{12}^{el}\}^T$ elastik birim şekil değiştirme vektörünü, $\sigma = \{\sigma_{11} \quad \sigma_{22} \quad \sigma_{12}\}^T$ gerilme vektörünü, E_1 ve E_2 sırasıyla boylamasına ve enlemesine yönlerdeki Young modülünü, G_{12} düzlem içi kayma modülünü; ν_{12}ve ν_{21}temel Poisson oranlarını, d_1 ve d_2 temel ortotropik yönler boyunca fiber kırılması ile alakalı hasar parametrelerini ve d_{12} düzlem içi kayma deformasyonu dolayısıyla oluşan matris mikro-çatlaması ile ilgili hasar parametresini göstermektedir. Hasar parametreleri 0 ile 1 arasında değişmektedir ve malzemedeki mikro hasarın sebep olduğu sağlamlıktaki azalmayı temsil etmektedir.

Çekme ve basma fiber hasar modlarını ayırt edebilmek için, karşılık gelen hasar değişkenleri, fiber yönlerindeki gerilme durumuna bağlı olarak aşağıda gösterildiği şekilde hesaplanır (i=1, 2):

$$d_i = d_{i+}\frac{\langle \sigma_{ii} \rangle}{|\sigma_{ii}|} + d_{i-}\frac{\langle -\sigma_{ii} \rangle}{|\sigma_{ii}|} \tag{7}$$

Burada, d_{i+} ve d_{i-} sırasıyla i yönündeki fiberlerin çekme ve basma hasar değişkenlerini, $\langle\ \rangle$ ise Macaulay operatörünü temsil etmektedir.

Hasar gelişim denklemlerinin aşağıdaki formda olduğu kabul edilir:

$$d_{1+} = d_{1+}(\tilde{\sigma}_{1+}), \quad d_{1-} = d_{1-}(\tilde{\sigma}_{1-}), \quad d_{2+} = d_{2+}(\tilde{\sigma}_{2+}), \quad d_{2-} = d_{2-}(\tilde{\sigma}_{2-}), \quad d_{12} = d_{12}(\tilde{\sigma}_{12}) \tag{8}$$

Bu denklemdeki efektif gerilmeler olan $\tilde{\sigma}_{i+}$ ve $\tilde{\sigma}_{i-}$ (i = 1, 2) aşağıdaki şekilde tanımlanır:

$$\tilde{\sigma}_{i+} = \frac{\langle \sigma_{ii} \rangle}{1 - d_{i+}}, \quad \tilde{\sigma}_{i-} = \frac{\langle -\sigma_{ii} \rangle}{1 - d_{i-}}, \quad \tilde{\sigma}_{12} = \frac{\sigma_{12}}{1 - d_{12}} \tag{9}$$

Efektif gerilmeler hasar değişkenlerinin eşleniği olan termodinamik kuvvetlerle aşağıda verilen ifadeler vasıtasıyla doğrudan ilişkilidir (i = 1, 2).

$$\tilde{\sigma}_{i+} = \sqrt{2E_i Y_{i+}}, \quad \tilde{\sigma}_{i-} = \sqrt{2E_i Y_{i-}}, \quad \tilde{\sigma}_{12} = \sqrt{2G_{12} Y_{12}} \tag{10}$$

Bu eşitliklerde termodinamik kuvvetler olan Y_{i+}, Y_{i-} ve Y_{12} hasar ilerlemesinden sorumludur. Böylece fiber ve kayma hasar modlarının birbirinden ayrık oldukları görülebilir.

Herhangi bir zamanda, elastik alan, aktivasyon fonksiyonları olan F_{i+}, F_{i-} ve F_{12} cinsinden şu şekilde tanımlanır:

$$F_{i+} = \phi_{i+} - r_{i+} \leq 0, \quad F_{i-} = \phi_{i-} - r_{i-} \leq 0, \quad F_{12} = \phi_{12} - r_{12} \leq 0 \tag{11}$$

Burada, r_{i+}, r_{i-} ve r_{12} sırasıyla çekme, basma ve kayma hasar eşiklerini ve ϕ_{i+} ve ϕ_{i-} fonksiyonları fiber hasarı için kriterleri sağlarlar ve şu şekilde ifade edilirler.

$$\phi_{i+} = \frac{\tilde{\sigma}_{i+}}{X_{i+}}, \qquad \phi_{i-} = \frac{\tilde{\sigma}_{i-}}{X_{i-}} \tag{12}$$

Burada X_{i+} ve X_{i-} fiber doğrultusunda tek eksenli yükleme için çekme ve basma mukavemetlerini göstermektedir. Hasar eşikleri olan r_{i+} ve r_{i-} başlangıçta 1'e eşitlenirler. Hasar başlangıcından sonra, yani $\phi_{i+} = 1$ ve/veya ϕ_{i-}=1 olduğu zaman, bu değerler hasar ilerlemesiyle aşağıda verilen ilişkilere bağlı olarak yükselirler:

$$r_{i+}(t) = \max_{\tau \leq t} \emptyset_{i+}(\tau), \qquad r_{i-}(t) = \max_{\tau \leq t} \emptyset_{i-}(\tau) \tag{13}$$

Bu tanımlama hasar eşiklerinin düşmeyen değerler olmasını yani $\dot{r}_\alpha(t) \geq 0$ $(\alpha = \pm 1, \pm 2)$ olmasını garanti eder. Hasar eşiklerinin, Kuhn-Tucker tümler koşuluna ve tutarlılık koşuluna $\left(\dot{r}_\alpha \dot{F}_\alpha = 0\right)$ uyduğu kabul edilmiştir.

Hasar değişkenlerinin değişimi, aşağıda verilen ifade ile belirlenir $(\alpha = \pm 1, \pm 2)$:

$$d_\alpha = 1 - \frac{1}{r_\alpha} \exp\left[-\frac{2 g_0^\alpha L_c}{G_f^\alpha - g_0^\alpha L_c} (r_\alpha - 1) \right] \tag{14}$$

Bu denklemde L_c elemanın karakteristik boyunu; G_f^α çekme veya basma yüklemesi altında birim alana düşen kırılma enerjisini; g_0^α hasar başlangıç noktasında birim hacme düşen elastik enerjiyi (elastik enerji yoğunluğunu) göstermektedir.

Hasar gelişim kanununun formülasyonu şunları sağlar: (a) hasar değişkenleri monotonik olarak artan değerlerdir (yani $\dot{d}_\alpha \geq 0$) ve (b) lamina fiber doğrultusunda tek eksenli yüklemeye maruz kaldığı zaman, eleman boyutundan bağımsız olarak doğru miktarda enerji yayılmaktadır. İkincisi, denklem 14'te ifade edilen hasar gelişim kanunu formülasyonunda karakteristik eleman boyu L_c kullanılarak sağlanmaktadır. Böylece, L_c'nin kullanımı ağ inceliğine göre sayısal sonuçların objektifliğini sağlamak için önemlidir. Formülasyon sonlu eleman ağında L_c için bir üst sınır da, $L_{max} = G_f^\alpha / g_0^\alpha$, koymaktadır.

Benzer şekilde kayma hasarının başlangıcı için bir kriter sağlayan ϕ_{12} fonksiyonu aşağıdaki formdadır.

$$\phi_{12} = \frac{\tilde{\sigma}_{12}}{S} \tag{15}$$

Burada S kayma mukavemetini göstermektedir. Kayma hasarı başlangıcından sonra ($\phi_{12} = 1$), hasar eşiği, r_{12} şu şekilde belirlenir:

$$r_{12}(t) = \max_{\tau \leq t} \phi_{12}(\tau) \tag{16}$$

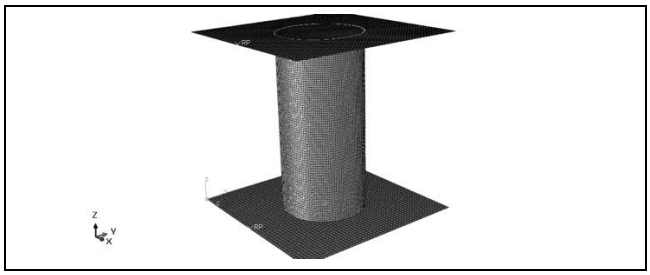
Ek olarak, Johnson [23] de belirtildiği üzere, kayma hasar değişkeninin, maksimum bir değere ulaşılana kadar, r_{12}'nin logaritması ile artış gösterdiği kabul edilmiştir, yani:

$$d_{12} = min(\alpha_{12} \ln(r_{12}), d_{12}^{max}) \tag{17}$$

Bu denklemde $\alpha_{12} > 0$ ve $d_{12}^{max} \leq 1$ malzeme özellikleridir.

3.2 Sonlu eleman modeli

Cam fiber/epoxy ve karbon fiber/epoxy kompozit yapıların enerji emilim davranışlarını incelemek için ince cidarlı kompozit tüpler Abaqus/CAE ortamında modellenecektir. İki farklı geometrik yapı (kare ve dairesel) göz önüne alınacaktır. Çarpışma elemanlarının enerji emiliminin eşit şartlarda değerlendirilebilmesi için çevre uzunlukları birbirine eşit olarak alınacaktır (Kare profil:75x75 mm, boru profil: çap 95.5 mm). Profil boyları 200 mm ve kalınlıkları 2 mm'dir. Şekil 12'de ağ yapısı oluşturulmuş örnek bir profil görülmektedir.



Şekil 12. Dairesel kesite sahip kompozit tüp için ağ yapısı.

Figure 12. Mesh for circular cross-section composite tube.

Eleman boyutları 1mm'ye 1 mm olarak alınmıştır. Profilin ağ yapısında S4R kabuk elemanlar kullanılmıştır. Sonlu eleman modeli oluştururken cam fiber/epoxy kompozit için bir önceki bölümde elde edilen sonuçlar değerlendirilerek Tablo 5'te verilen malzeme özellikleri kullanılmıştır.

Tablo 5. Cam fiber/epoxy kompozitin malzeme özellikleri.

Table 5. Material properties of glass fiber/epoxy composite.

Tanım	Değişken	Değer
Yoğunluk (kg/m³)	ρ	1900
Elastik Özellikler (GPa)	E_1	19.1
	E_2	19.1
	G_{12}	2.0
	ν_{12}	0.1
Hasar Başlangıç (MPa)	X_{1+}	419.5
	X_{1-}	230
	X_{2+}	419.5
	X_{2-}	230
	S	70
Kırılma Enerjileri (kJ/m²)	G_{fc}^{1+}	12.5
	G_{fc}^{1-}	12.5
	G_{fc}^{2+}	12.5
	G_{fc}^{2-}	12.5

Kırılma enerjisi değerleri için Patel ve diğ. [21] çalışmasında verilen değerler kullanılmıştır. Karbon fiber/epoxy kompozit için Zhu ve diğ. [20] çalışmasında verilen malzeme özellikleri kullanılmıştır ve bu değerler Tablo 6'da verilmiştir. Bu malzeme özellikleri T700/2510 TORAYCA fabrik karbon fiber/epoxy malzemeye aittir. Ayrıca kayma hasar değişkenindeki katsayı, $\alpha_{12} = 0.18$ ve kayma hasar değişkeninin maksimum değeri $d_{12}^{max} = 0.99$ olarak alınmıştır.

Tablo 6. Karbon fiber/epoxy kompozitin malzeme özellikleri.

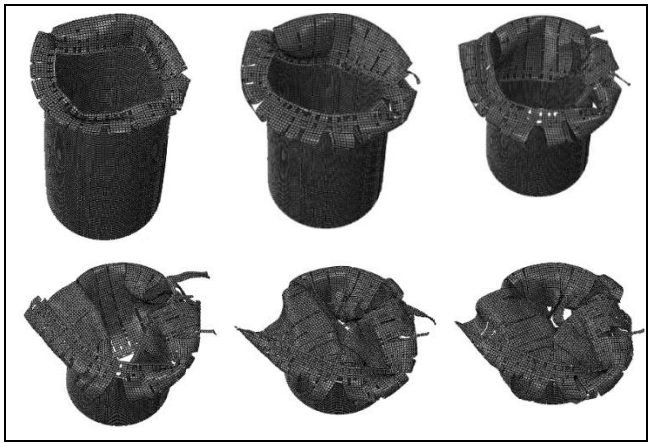
Table 6. Material properties of carbon fiber/epoxy composite.

Tanım	Değişken	Değer
Yoğunluk (kg/m³)	ρ	1560
Elastik Özellikler (GPa)	E_1	65.1
	E_2	64.4
	G_{12}	4.5
	ν_{12}	0.037
Hasar Başlangıç (MPa)	X_{1+}	776
	X_{1-}	704
	X_{2+}	760
	X_{2-}	698
	S	95
Kırılma Enerjileri (kJ/m²)	G_{fc}^{1+}	125
	G_{fc}^{1-}	250
	G_{fc}^{2+}	95
	G_{fc}^{2-}	245

Kompozit tüpler, (0/90/0/90/0/90/0/90/0) fiber yönleri olmak üzere 9 katmandan oluşmaktadır ve dikey olarak rijit çelik plaka üzerine yerleştirilmiştir. Çarpışma yükü kompozit profile, sabit hızda hareket eden diğer bir rijit plaka vasıtasıyla uygulanmıştır. Alt ve üst plakalar rijit yüzey olarak modellenmişlerdir. Üst plakanın hareket hızı 15 m/s (54 km/h) olarak alınmıştır. Üst plakanın kütlesi 275 kg olarak alınmıştır. Alt plaka bütün yönlerden sabitlenmiştir. Profil ve plakalar arasındaki sürtünme katsayısı 0.15 olarak alınmıştır. Temas modeli olarak Abaqus/Explicit'in genel temas modellemesi kullanılmıştır.

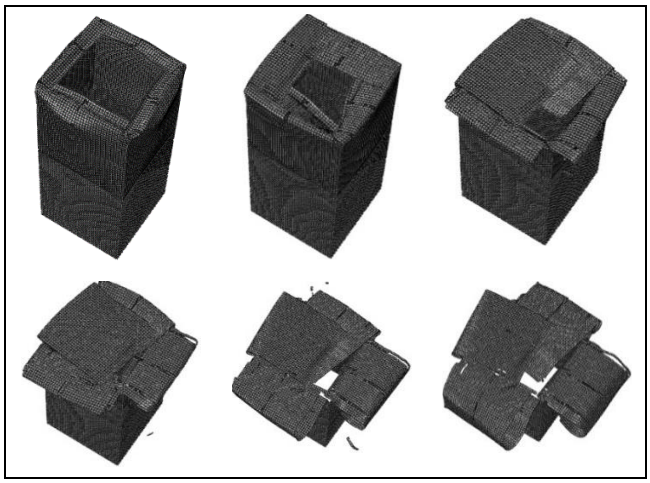
3.3 Simülasyon sonuçlari ve tartışma

Yarı statik ezilme simülasyonu esnasında cam fiber/epoksi dairesel ve kare kompozit tüpler için farklı zamanlardaki deforme olmuş şekiller sırasıyla Şekil 13 ve Şekil 14'te verilmiştir.



Şekil 13. Dairesel kesitli GFRP tüpün deformasyonu.

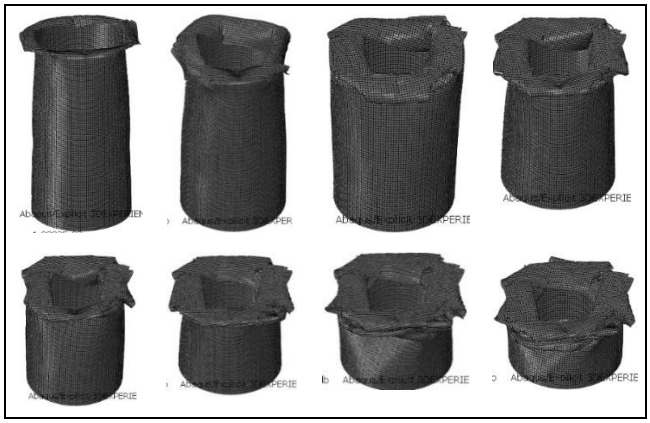
Figure 13. Deformation of GFRP tube of circular cross-section.



Şekil 14. Kare kesitli GFRP tüpün deformasyonu.

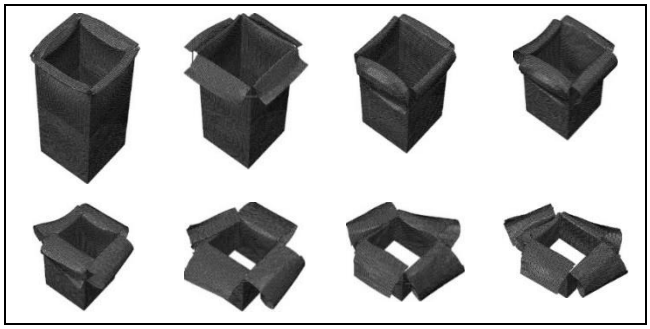
Figure 14. Deformation of GFRP tube of square cross-section.

Karbon fiber/epoksi dairesel ve kare tüpler için farklı zamanlardaki deforme olmuş şekiller ise sırasıyla Şekil 15 ve Şekil 16'da verilmiştir. Bu profillere ait yük-deplasman grafikleri ise Şekil 17 ve Şekil 18'de verilmiştir. Bu şekillerden görülebileceği üzere çarpışma sonrası kompozit tüpün boyu yaklaşık olarak dörtte birine düşmüştür. Yük-deplasman grafikleri altında kalan toplam alan, enerji emilimini (EA) vermektedir. Cam fiber/epoxy ve karbon fiber/epoxy kompozit tüplere ait enerji emilim grafikleri, çarpışma esnasında deformasyona uğrayan kısmının uzunluğuna bağlı olarak sırasıyla Şekil 19 ve Şekil 20'de verilmiştir.



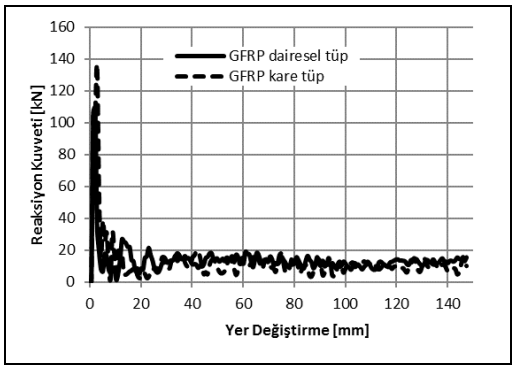
Şekil 15. Dairesel kesitli CFRP tüpün deformasyonu.

Figure 15. Deformation of CFRP tube of circular cross-section.



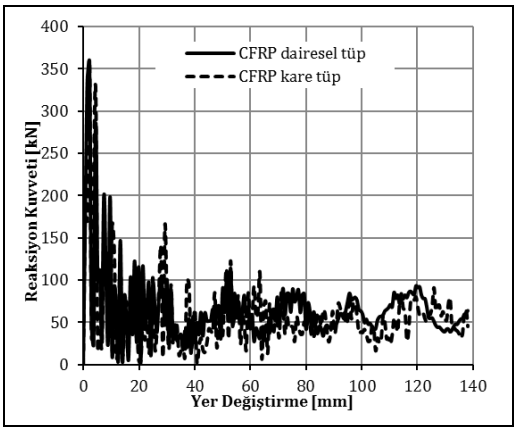
Şekil 16. Kare kesitli CFRP tüpün deformasyonu.

Figure 16. Deformation of CFRP tube of square cross-section.



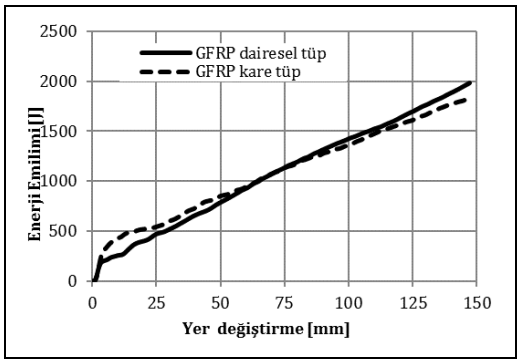
Şekil 17. GFRP tüplere ait yük-deplasman grafiği.

Figure 17. Load-displacement graph for GFRP tubes.



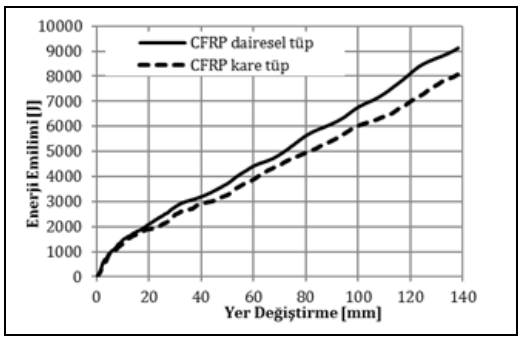
Şekil 18. CFRP tüplere ait yük-deplasman grafiği.

Figure 18. Load-displacement graph for CFRP tubes.



Şekil 19. GFRP tüplere ait enerji emilimi grafiği.

Figure 19. Energy absorption graph for GFRP tubes.



Şekil 20. CFRP tüplere ait enerji emilimi grafiği.

Figure 20 Energy absorption graph for CFRP tubes.

Ayrıca EA'yı kompozitin deformasyona uğrayan kısmının kütlesine (deformasyona uğrayan kısmın uzunluğunu, kesit alanı ve kompozitin yoğunluğu ile çarparak elde edilebilir) bölerek spesifik enerji emilimi (SEA) hesaplanabilir. Cam fiber/epoksi ve karbon fiber/epoksi için simülasyon sonucu elde edilen bütün değerler Tablo 7'de verilmiştir. Bu tablodan da görüleceği üzere genel olarak dairesel kesitli ince cidarlı tüp daha yüksek enerji emilimine sahip olmakla birlikte, karbon fiber/epoksi dairesel kesitli profil diğerlerine göre daha yüksek spesifik enerji emilim kapasitesine sahiptir ve enerji emilim elemanı olarak kullanılmasında büyük potansiyele sahip olduğu değerlendirilmektedir.

Tablo 7. Cam fiber/epoksi ve karbon fiber/epoksi kompozitlerin enerji emilim davranışları.

Table 7. Energy absorption behavior of glass fiber/epoxy and carbon fiber/epoksi composites.

Tip	*EA*(J)	F_{ort} (kN))	*PCF* (kN)	*CFE*	*SEA* (J/g)
GFRP dairesel	1981.57	13.41	109.39	0.12	11.8
GFRP kare	1839.61	12.39	135.46	0.09	10.93
CFRP dairesel	9112.54	65.41	358.13	0.18	70.49
CFRP kare	8081.48	57.22	359.63	0.16	61.63

4 Sonuçlar

Bu çalışma kapsamında cam fiber/epoksi ve karbon fiber/epoksi kompozit yapıların ezilme ve enerji emilim davranışları incelenmiştir. Bu kapsamda ilk önce sonlu eleman analiz programında kullanılmak üzere cam fiber/epoksi kompozitlerin malzeme özellikleri deneysel olarak belirlenmiştir. Deneysel çalışmalar sonucunda epoksi malzemenin ağırlıkça %0.5 karbon nanotüp oranında doyuma ulaştığı ve %0.5 den sonra karbon nanotüplerin epoksi reçinesi ile bağ kuramadığı ve çentik etkisi oluşturarak mukavemet değerlerinin düşmesine sebep olduğu tespit edilmiştir. Sayısal analizlerde GFRP tüpler için %0.5 karbon nanotüp oranına sahip kompozit malzeme için elde edilen sonuçlar kullanılmıştır. Karbon fiber/epoksi kompozitler için malzeme özellikleri ise literatürde mevcut olan çalışmalardan temin edilmiştir. Sayısal analizler sonucunda dairesel ve kare profile sahip tüpler için elde edilen spesifik enerji emilim değerleri karşılaştırıldığında dairesel kesite sahip karbon fiber/epoksi kompozitlerin diğerlerine göre daha iyi enerji emilimi sağladığı ve bu kompozitlerin spesifik enerji emilimi değerinin 70.49 J/g seviyesine ulaşarak cam fiber kompozitlere göre yaklaşık yedi kat daha yüksek enerji emilimi davranışı gösterdiği görülmüştür. Bu yapıların otomotiv sektöründe ve enerji emilimi sağlanması gereken diğer sektörlerde enerji yutucu eleman olarak kullanılmasının fayda sağlayacağı değerlendirilmektedir.

5 Conclusions

In this study, crushing and energy absorption behaviors of glass fiber/epoxy and carbon fiber/epoxy composite structures were investigated. In this context, the material properties of glass fiber/ epoxy composites were determined experimentally to be used in the finite element analysis program. As a result of the experimental studies, it has been determined that the epoxy material reaches 0.5% carbon nanotube saturation and after 0.5%, the carbon nanotubes cannot bond with the epoxy resin and cause a notch effect to decrease the strength values. The results obtained for the composite material with a ratio of 0.5% carbon nanotube for CFRP tubes were used in numerical analysis. Material properties for carbon fiber/epoxy

composites were obtained from studies available in the literature. As a result of numerical analysis, when the specific energy absorption values obtained for tubes with circular and square profiles were compared, it was observed that carbon fiber / epoxy composites with circular cross section provided seven times better energy absorption capacity than glass fiber / epoxy composites with a value of 70.49 J/g. It is considered that it will be beneficial to use these structures as energy absorbing elements in the automotive sector and other sectors where energy absorption is required.

6 Yazar katkı beyanı

Gerçekleştirilen çalışmada, Yasin YILMAZ fikrin oluşturulması, literatür taraması, deneysel ve sayısal çalışmaların yürütülmesi ve sonuçların değerlendirilmesi başlıklarında, Hasan ÇALLIOĞLU yazım denetimi, içerik açısından makalenin kontrol edilmesi ve deneysel çalışmaların değerlendirilmesi başlıklarında, Ali BALBAY ise malzeme temini ve deneysel çalışmaların yürütülmesi başlıklarında katkı sunmuşlardır.

7 Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur.

Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

8 Teşekkür

Bu çalışma Pamukkale Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından 2016FEBE031 No.lu proje ile desteklenmiştir.

9 Kaynaklar

[1] Kaw KA. *Mechanics of Composite Materials*. 2nd ed. New York, USA, Taylor and Francis Group, 2006.

[2] Balasubramanian M. *Composite Materials and Processing.* New York, USA, Taylor and Francis Group, 2013.

[3] Tarlochan F, Samer F, Hamouda AMS, Ramesh S., Khalid K. "Design of thin wall structures for energy absorption applications: Enhancement of crashworthiness due to axial and oblique impact forces". *Thin-Walled Structures* 71, 7-17, 2013.

[4] Mishnaevsky Jr L, Dai G. "Hybrid carbon/glass fiber composites: Micromechanical analysis of structure-damage resistance relationships". *Computational Materials Science*, 81, 630-640, 2014.

[5] Montazeri A, Montazeri N. "Viscoelastic and mechanical properties of multi walled carbon nanotube/epoxy composites with different nanotube content". *Materials and Design*, 32, 2301-2307, 2011.

[6] Muthu J, Dendere C. "Functionalized multiwall carbon nanotubes strengthened GRP hybrid composites: Improved properties with optimum fiber content". *Composites: Part B*, 67, 84-94, 2014.

[7] Jia X, Zhu J, Li W, Chen X, Yang X. "Compressive and tensile response of CFRP cylinders induced by multi-walled carbon nanotubes". *Composites Science and Technology*, 110, 35-44, 2015.

[8] Zhou HW, Mishnaevsky L, Yi HY, Liu YQ, Hu X, Warrier A, Dai GM. "Carbon fiber/carbon nanotube reinforced hierarchical composites: Effect of CNT distribution on shearing strength" *Composites Part B: Engineering*, 88, 201-211, 2016.

[9] Huang J, Wang X. "Numerical and experimental investigations on the axial crushing response of composite tubes". *Composite Structures*, 91, 222-228, 2009.

[10] Kim JS, Yoon HJ, Shin KB. "A study on crushing behaviors of composite circular tubes with different reinforcing fibers". *International Journal of Impact Engineering*, 38, 198-207, 2011.

[11] Sokolnisky, VS, Indermuehle KC, Hurtado JA. "Numerical simulation of the crushing process of a corrugated composite plate". *Composites: Part A*, 42, 1119-1126, 2011.

[12] Zhang P, Gui LJ, Fan ZJ, Yu Q, Li ZK. "Finite element modeling of the quasi-static axial crushing of braided composite tubes". *Computational Materials Science*, 73, 146-153, 2013.

[13] Siromani D, Awerbuch J, Tan TM. "Finite element modeling of the crushing behavior of thin-walled CFRP tubes under axial compression". *Composites: Part B*, 64, 50-58, 2014.

[14] Chiu LNS, Falzon BG, Boman C, Yan Wenyi. "Finite element modelling of composite structures under crushing load". *Composite Structures*, 131, 215-228, 2015.

[15] Tan W, Falzon BG, Price M. "Predicting the crushing behaviour of composite material using high-fidelity finite element modelling". *International Journal of Crashworthiness*, 20(1), 60-77, 2015.

[16] Wang Y, Feng J, Wu J, Hu D. "Effects of fiber orientation and wall thickness on energy absorption characteristics of carbon-reinforced composite tubes under different loading conditions". *Composite Structures*, 153, 356-368, 2016.

[17] Reuter C, Sauerland KH, Tröster T. "Experimental and numerical crushing analysis of circular CFRP tubes under axial impact loading". *Composite Structures*, 174, 33-44, 2017.

[18] Waime M, Siemann MH, Feser T. "Simulation of CFRP components subjected to dynamic crash loads". *International Journal of Impact Engineering*, 101, 115-131, 2017.

[19] Zhang Z, Sun W, Zhao Y, Hou S. "Crashworthiness of different composite tubes by experiments and simulations". *Composites Part B*, 143, 86-95, 2018.

[20] Zhu G, Sun G, Li G, Cheng A, Li Q. "Modeling for CFRP structures subjected to quasi-static crushing". *Composite Structures*, 184, 41-55, 2018.

[21] Patel S, Vusa VR, Soares CG. "Crashworthiness analysis of polymer composites under axial and oblique impact loading". *International Journal of Mechanical Sciences*, 156, 221-234, 2019.

[22] Gibson RF. *Principles of Composite Material Mechanics.* New York, USA, Taylor and Francis Group, 2011.

[23] Johnson AF. "Modelling fabric reinforced composites under impact loads". *Composites Part A*, 32, 1-2, 2001.