



# Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

*Araştırma Makalesi*

## Titanyum Karbür (TiC) Takviyeli Epoksi ile Güçlendirilmiş Hibrit Kompozitlerin Çarpma Davranışının Deneysel ve Sayısal İncelenmesi

 Mustafa Reşit USAL<sup>a,\*</sup>,  Mustafa TAŞLIDERE<sup>b</sup>,  Mehmet Fahri SARAÇ<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, TÜRKİYE

<sup>b</sup> İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı, Fen Bilimler Enstitüsü, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, TÜRKİYE

\* Sorumlu yazarın e-posta adresi: resitusal@sdu.edu.tr

DOI : 10.29130/dubited.606515

### ÖZET

Bu çalışmada, titanyum karbür (TiC) ile güçlendirilmiş ağırlıkça katkısız, %1, %3 ve %5 oranında TiC içeren epoksi reçineli cam/kevlar kumaş hibrit kompozit plakalar hazırlanmıştır. Tüm hazırlanan kompozit panellerin deneysel ve sayısal olarak mekanik özellikleri ve darbe davranış ölçümleri incelenmiştir. Kompozit plakalar elle yatırma yöntemi ile hazırlanmıştır. 207gr/m<sup>2</sup> yüzey alanına sahip düz aramid fiber (Kevlar 49), 300gr/m<sup>2</sup> yüzey alanına sahip cam fiber ve F-1564 epoksi reçineler sırası ile takviye edici ve matris malzeme olarak kullanılmıştır.

Kompozit panellerin mekanik özelliklerini belirlemek için elastisite modülü, kayma modülü ve poisson oranı universal çekme test cihazı ile elde edilmiştir. Kompozit paneller 100x100 mm boyutlarında kesilmiştir. 12 tabakalı plakaya sahip numuneler 3 sıra kevlar 1 sıra cam elyaf tabaka olmak üzere sıralanmıştır. ANSYS dinamik analiz programı ile elde edilen ölçüm verileri sayısal olarak kıyaslanmıştır.

Sonuç olarak, 10J, 20J ve 30J darbe enerjileri altında elde edilen kuvvet-çökme, kuvvet-zaman, absorbe edilen enerji-zaman ve hız-zaman grafikleri darbe testinde elde edilmiştir. Farklı konsantrasyonlar oranlarında eklenen TiC takviyeli hibrit kompozit plakalara yapılan mekanik ve darbe testleri sonucunda %3 ağırlıkça TiC takviye edilmiş kompozit plakalarda saf kompozit plakaya nazaran elastisite modülünde %15 oranında iyileşme ve darbe direncinde %6 oranında daha fazla enerji absorplandığı görülmüştür. Fiber dağılımları ve kırılması uygulanan yükler altında tüm numunelerde görülürken herhangi bir delinme olayı kompozit panellerin alt yüzeyinde görülmemiştir. Sayısal analizlerle elde edilen sonuçlar ise deneysel sonuçları arasında uyumlu bir ilişki görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Epoksi reçine, titanyum karbür, kevlar, cam fiber, darbe testi, kompozit, ANSYS dinamik analiz programı.

## An Experimental and Numerical Investigation of Impact Behavior of TiC Added Epoxy Reinforced Hybrid Composites

### ABSTRACT

In this study, hybrid composite plates were prepared by titanium carbide (TiC) reinforced epoxy resin including none-additive, 1%, 3%, 5%wt. with mixture of kevlar/glass fabrics. For all prepared composite panels, mechanical properties and impact behaviour measurements were investigated experimentally and numerically. Hand lay-up method was used to prepare polymer composite materials. Plain aramid fiber (Kevlar 49) with

surface area of 207 g/m<sup>2</sup>, E-glass fibers with 300 g/m<sup>2</sup> and F-1564 epoxy resin were used as reinforcement fiber and matrix materials, respectively.

To determine the mechanical properties of the composite panels, modulus of elasticity, shear modulus and poisson ratio was obtained from universal tensile test equipment. The composite plates were cut into dimensions of 100 x 100 mm. Three layers of aramid fiber are set in type as one layer E-glass and totally prepared a 12-layer plate for each set sample. The data obtained from the measurements were compared with the numerical data calculated by ANSYS-dynamic analysis program.

As a result, impact test such as load-deflection, force-time, absorbed energy-time, velocity-time curves were performed under 10J, 20J and 30J impact energy. Depending on the concentration of TiC in the composite panel, it is clearly seen that 3% wt. of TiC addition gives the highest mechanical properties (increases %15 of elastisite modulus) and impact resistance (increases upto 6% of absorbed energy). Fiber segregations and breakage was observed for all applied loads while no perforation appeared on the bottom faces of composite panels. Numerical analysis correlates the experimental results in good agreement.

**Keywords:** Epoxy resin, titanium carbide, kevlar, glass fiber, impact test, composite, ANSYS analysis programme

## I. GİRİŞ

Günümüzde fiberler ile güçlendirilmiş polimer esaslı kompozitler yüksek özgül sertlik ve mukavemetlerinin yanı sıra çevresel oluşları ile de çok çeşitli mühendislik uygulamalarında kullanılmaktadır. Bu bağlamda güvenlik uygulamaları için cam ve aramid (Kevlar) lifleri, yüksek tokluk ve hasar toleransının bir sonucu olarak ileri kompozitlerin takviye elemanları olarak günümüzde oldukça yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [1-4].

Epoksi reçinelerinin darbe mukavemetini arttırmaya yönelik yaklaşımlar mevcuttur; (a) epoksi omurgasının daha esnek yapıya dönüştürülmesi için kimyasal modifikasyonu; (b) epoksinin moleküler ağırlığının artırılması; (c) matrisin çapraz bağlantı yoğunluğunu düşürülmesi; (d) sertleştirilmiş polimer matris içerisine dağılmış kuvvetlendirici malzemenin eklenmesi; ve (e) inorganik parçacıkların veya elyafların saf reçineye dahil edilmesi şeklindedir. Kompozit plakaların mukavemetini, aşınma direncini ve termal özelliklerini iyileştirmek için metal, seramik ve polimer esaslı birçok malzeme takviye edici malzeme (kil, cam, alümina, silika, grafen vb.) kullanılmaktadır [5-10].

Mohaparta ve ark. [11], e-cam elyaf takviyeli epoksi reçine ve TiC parçacıklarından oluşan çok-fazlı bir kompozitin işlenmesi ve kompozitin katı parçacık erozyon davranışı incelenmiştir. TiC partikül yüzdesel (% 0-10-15-20 ağırlık) olarak artması ile sertlik değerini 29'dan 53 HV'ye ve erozyon aşınma davranışlarında da ciddi bir oranda iyileşme olduğu gözlemlenmiştir ve darbe hızının TiC oranına ve çarpışma açısına önemli oranda etkilediği gözlemlenmiştir. Diğer taraftan Ali [7], farklı oranlarda (% 0-5-10-15-20-25 ağırlık) güçlendirilmiş TiC partikülleri ile güçlendirilmiş epoksi matrix kompozitinin mekaniksel ve tribolojik davranışları incelenmiştir. Sertlik ve çekme mukavemetinin %15, aşınma direncinin %10 ve darbe mukavemetinde %20 ağırlık oranlarında en iyi sonuçları aldığı tespit edilmiştir. Fakat, Sudheer ve ark [12], kısa elyaf tek kristal yapıdaki potasyum titanat seramikler yüksek uzunluk-çap oranları ve kusursuz bir yapıda olması elastikiyet teorisinde beklenen maksimum teorik değere çok yakın bir direnç sunar. %15 ağırlık oranında potasyum titanat ile güçlendirilmiş epoksi matrisli kompozitleri düşük özgül aşınma oranı ve en yüksek sürtünme katsayısı göstermesine karşılık potasyum titanat içeriği arttıkça mukavemet özellikleri ve sünekliğinde azalma görülmüştür.

Potasyum titanatın yapısı ve epoksinin gevrek davranışı gibi iki baskın karakterin aynı yüzeyde olması çekme esnasında kırılmalara neden olmaktadır.

Mikro (60-100nm) ve nano (2-4nm) boyuttaki TiC partiküllerin epoksi ile oluşturduğu kompozitin çarpışma davranışları da incelenmiştir. Partikül boyutunun yanı sıra epoksi ile partiküllerin dağılımı ve yapışmasının çarpışma testlerini etkilediği gözlemlenmiş ve nano boyutta homojen şekilde dağılmış TiC partiküllerin (70 kJ/m<sup>2</sup>) mikro boyutta homojen dağılmış TiC partiküllere (62 kJ/m<sup>2</sup>) göre darbe mukavemetinin daha iyi olduğu gözlemlenmiştir [13]. Epoksi ile güçlendirilmiş Kevlar kompozitleri 100 m/s ve 1000 m/s hızlarında balistik özelliklerini sayısal olarak incelemişlerdir [14]. Sayısal simülasyonlarda hazırlanan kalın tabakalı (9,5 mm) Kevlar epoksi kompozitlerin 100 m/s hızlarda bile çarpışma sonrası iç enerjisinin arttığı tespit edilmiştir. Ayrıca ara yüzeylerde çatlak ve tabakalar arası açılmada hem teorik hem de deneysel veriler olarak doğrulanmıştır. Ayrıca yapılan başka bir çalışmada epoksi reçine matrisli kompozit yapılarını ayrı ayrı olarak hem Kevlar tabaka hem de cam/Kevlar hibrit tabaka üzerinde mekaniksel özelliklerini incelemiş olup epoksi ile güçlendirilmiş cam/Kevlar hibrit kompozitlerin, epoksi ile güçlendirilmiş Kevlar kompozitlere nazaran çekme mukavemeti (341,06 MPa), darbe enerji (211,02 kJ/m<sup>2</sup>) ve eğme mukavemetlerden (260,30 MPa) yaklaşık %25 oranında yüksek çıktığı görülmüştür [15].

Partikül ile güçlendirilmiş kompozitlere partikül boyutunun, partikül/matris arayüz bağlantısının ve partikül yüklemenin rijitlik, mukavemet ve tokluk üzerine etkileri yapılan bir çalışmada incelenmiştir. Rijitlik ve Young modülü gibi değerlerin mikro ya da nano boyuttaki partikül ilavesi ile partiküllerin matristen daha rijit olması sayesinde geliştirilebildiğini ancak mukavemetin matristen partiküle kuvvet transferine bağlı olduğunu ve matrisi iyileştirme partikül/matris arayüzünün kuvvetli bir bağlantı üzerine kurulması üzerine gerçekleşirken aksi durumda olumsuz etkilerin ortaya çıktığı ifade edilmiştir [16-17].

Bu çalışmada nanopartikül ilavesinin polimer matrisli aramid fiber - cam elyaf takviyeli hibrit kompozitin mekanik özelliklerine etkisini tespit etmek amaçlanmıştır. Matris malzemesi olarak el yatırma yöntemine uygun Fibermak tarafından üretilen F-1564 Epoksi Reçine kullanılmıştır. Nanopartikül olarak titanyum karbür (TiC) kullanılmıştır. Elyaf takviyesi olarak örgü aramid fiber ve örgü cam elyaf 0° düzeninde üç kat aramid fiber tek kat cam elyaf üst üste gelecek düzende elyaf kumaşlar kullanılmıştır.

## **II. MATERYAL VE METOD**

### **A. MATERYAL**

Bu çalışmada kullanılan TiC takviyeli hibrit kompozit plakalar elle yatırma yöntemi ile hazırlanmıştır. %98 saflıktaki Titanyum karbür Sigma Aldrich'den temin edilmiş olup partikül boyutu 45-75µm arasındaki toz boyutları kullanılmıştır. Elle yatırma metodu ile üretilen kompozit plakalar Şekil 1' de gösterilmiştir.



*Şekil 1. Elle yatırma yöntemi ile numunelerin üretimi*

Fiber malzeme olarak Dupont firmasının ürettiği  $207 \text{ g/m}^2$  yoğunluğa sahip örgü aramid elyaf kumaş (Kevlar-49) ile  $300 \text{ g/m}^2$  yoğunluğa sahip örgü cam fiber kullanılmıştır. Matris malzemesi olarak F-1564 epoksi ve F-3486 reçine sertleştiricisi kullanılmıştır. Matris malzemesi epoksi, sertleştirici ve TiC partikülleri olmak üzere üç bileşenden oluşmaktadır. Bu üç bileşenin karıştırma oranı epoksi ağırlığının %34'ü kadar sertleştirici, epoksi ve sertleştirici ağırlıkları toplamının %1-3-5'i kadar TiC nanopartikülü olacak şekilde düzenlenmiştir. Reçine hazırlanırken ilk olarak TiC partikülleri epoksi içerisine eklenerek mekanik karıştırıcı ile 2000 rpm (revolution per minute) hızında 5 dakika karıştırılarak TiC partiküllerinin epoksi içerisinde homojen olarak dağılması sağlanmıştır. İkinci adım da sertleştirici ilave edilerek tekrar 1000 rpm hızında 1 dakika karıştırılarak epoksi malzemesi ayrı ayrı hazırlanmıştır.

Bu çalışma için hazırlanan dört farklı epoksi karışımı (saf reçine dahil) kevlar/cam plakalar olarak hazırlanmış sonrasında mekanik ve darbe karakteristikleri incelenmiştir. Hazırlanan plakalar 3 Kevlar 1 cam elyaf kumaş üst üste gelecek biçimde toplam 12 katmandan oluşmaktadır. Katmanlar arasında hava boşluklarının kalmaması ve katmanlar arası bağın oluşması için her kattan sonra çelik rulo ile bastırma işlemi yapılmıştır. Hazırlanan plakalar epoksi reçinenin kürlenmesi için oda ortamında 2 saat kadar bekletildikten sonra 12 saatlik vakum infüzlleme (Şekil 3) işlemine geçilmiştir. Hibrit kompozit plakalar  $50 \times 50 \text{ cm}$  boyutlarında ERNES Kompozit firmasında hazırlanmıştır. Hazırlanan plakalar ASTM standartlarına uygun olarak mekanik ve darbe test numuneleri için su jeti makinasında kesilmiştir.



*Şekil 2. Vakum infüzeleme uygulanan TiC takviyeli hibrit kompozit plakalar*

## **B. METOD**

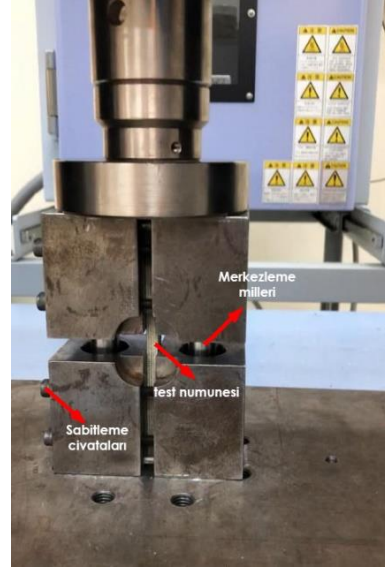
Kompozit plakaların mekanik dayanımlarını, elastisite modüllerini ve poisson oranın belirlenmesi çekme testi ile sağlanmaktadır. Dokuz Eylül Üniversitesi Kompozit Araştırma Malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesinde en temel test çekme testidir. Tasarım için en uygun özelliklerin belirlenmesinde çekme testi sonuçlarından yararlanılmaktadır. Çekme testi, elastisite modülünü, Poisson oranını, çekme mukavemetini ve maksimum şekil değiştirmeyi belirlemek için kullanılır. Bu test ASTM D3039 standart test metoduna göre yapılmıştır.

Çekme testleri Dokuz Eylül Üniversitesi Makine Mühendisliği Kompozit Araştırma Laboratuvarında bulunan Shimadzu AG-100 marka 100 kN yük kapasitesine sahip test cihazında gerçekleştirilmiştir. Çekme testi hızı 1mm/dakika olarak seçilmiştir. Yük hasar oluşuncaya kadar adım adım artırılırken aynı anda video ekstansometre yardımı ile numunedeki uzama ölçülmüştür. Cihaza bağlı olarak çalışan Trapezium programına kesit alanı girerek elastisite modülü ve maksimum çekme dayanım değerleri alınmıştır otomatik olarak program tarafından bulunmuştur [1].

Poisson oranını bulmak için kompozit plakalara fibere iki yönlü bir strengaç bağlanmış ve çekme deneyi yapılmıştır. Yük artarken aynı anda strengaçten toplanan dikey/yatay uzama verileri ile poisson oranları çıkarılmıştır.



(a)



(b)

Şekil 3. (a) Shimadzu çekme cihazı, (b) Bası test aparatı

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (1)$$

$$X_t = \frac{F_{1max}}{A} \quad (2)$$

$$Y_t = \frac{F_{2max}}{A} \quad (3)$$

Formülde geçen  $F_{1max}$  fiber yönündeki maksimum kuvvettir. A ise numunenin kesit alanıdır. Numunelerimizin fiber yapısı örgü şeklinde olduğu için  $F_{1max}=F_{2max}$  'tır. Elastisite modülü, fiber yönündeki çekme gerilmesi ve fiber yönüne dik çekme gerilmesi sırası ile denklem 1,2 ve 3'deki formüllerden çıkarılmıştır. Numunenin kesit alanı aynı olduğu olduğu için fiber yönündeki maksimum çekme gerilmesi, fibere dik yöndeki maksimum çekme dayanımı ( $X_t = Y_t$ ) birbirlerine eşittir. Poission oranı denklem 4'de verilmiştir.

$$\nu_{12} = -\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \quad (4)$$

Kompozit plakalar bası testi için standarda uygun olarak 140 mm uzunluğunda ve 13 mm genişliğinde üretilmiştir. Her bir destek arasına da standartlara uygun olarak 13 mm boşluk bırakılmıştır. Bası testi Shimadzu AG-100 çekme cihazında yapılmış, kuvvet ve yer değiştirme değerleri elde edilmiş ve aşağıda verilen denklem 5 yardımı ile maksimum bası gerilmeleri elde edilmiştir.

$$X_c = \frac{F_{1max}}{A} \quad (5)$$

Kompozit numunelerin kayma özelliklerinin bulunması için ASTM D7078/D7078M V-çentik kayma testine (V-Notched Rail Shear Method) uygun numuneler hazırlanmıştır. Testler çekme ve bası testlerinin yapıldığı Shimadzu cihazında kayma testi bağlama aparatı takılarak yapılmış ve kuvvet değerleri cihazdan okunmuştur. Denklem 6 yardımı ile maksimum kayma gerilmesi değerleri hesaplanmıştır. Burada t numunenin kalınlığını, w çentikler arasındaki mesafeyi tanımlamaktadır.

$$S = \frac{F_{maks}}{A} = \frac{F_{max}}{wt} \quad (6)$$



Kayma modülünü (G) bulmak için ise denklem 7 kullanılmıştır. Burada kayma birim şekil değiştirmesini bulmak için ( $\gamma_{12}$ ) denklem 8 kullanılmıştır. Okunan strengaç değeri kayma birim şekil değiştirme değerinin yarısına eşittir.

$$G = \frac{\tau_{12}}{\gamma_{12}} \quad (7)$$

$$\gamma_{12} = 2\varepsilon \quad (8)$$

Strengaç bir veri toplayıcıya bağlanarak, çekme test cihazı ile paralel olarak çok kısa aralıklarla kuvvete karşı gelen birim uzama değeri ölçülür. Daha sonra her kuvvet değeri alana bölünerek kayma gerilmesi değerleri ve strengaç'ten okunan değerlerin iki katı alınarak  $\gamma$  değerleri bulunur. Ardından çizdirilen grafikteki eğrinin eğimi kayma modülüne eşittir. Test hızı dakika da 0,25 mm olarak seçilmiştir.

Darbe testleri, Dokuz Eylül Üniversitesi Makine Mühendisliği Kompozit Araştırma Laboratuvarında bulunan ve Şekil 4'de gösterilen ağırlık düşürme prensibi ile çalışan CEAST Fractovis Plus darbe cihazı kullanılarak yapılmıştır. Darbe ucu olarak 12,7 mm çapa sahip yarım küre şeklindeki ve 22,4 kN yük kapasitesine sahip kuvvet sensörü olan bir vurucu uç kullanılmıştır. Darbe cihazı iki yay sayesinde maksimum 1800 Joule darbe enerjisine kadar çıkabilmektedir. Vurucu ucun maksimum hızı 24 m/s hıza ulaşabilmektedir. Darbe cihazı DAS 16000 isimli gelişmiş bir veri toplayıcı sisteme sahiptir. Bu veri toplama sistemi ile darbe testi sırasında 10 milisaniyede 20000 adet veri alınabilmektedir. Darbe karakteristiklerin belirlenmesinde kuvvet, zaman, çökme ve absorbe edilen enerji değerleri elde edilmiştir.



*Şekil 4. 1 CEAST Fractovis Plus darbe cihazı*

Darbe testleri için 100x100 mm boyutlarında numuneler hazırlanmıştır. Bu numuneler darbe cihazının alt tarafında bulunan ve mekanik olarak çalışan 76 mm çapa sahip dairesel bir sıkma aparatı ile sabitlenmektedir. Bu aparat yardımı ile darbe sırasında numunelerin sabit kalması sağlanmıştır.

### **III. BULGULAR VE TARTIŞMA**

Darbe enerjisine bağlı olarak hazırlanan farklı konsantrasyonlardaki TiC takviyeli kompozit plakaların darbe davranışları kuvvet-çökme (F-d), maksimum kuvvet-enerji (F-J), maksimum çökme-enerji (d-J)

ve absorbe edilen enerji-zaman (Ea-t) grafikleri ile belirlenmiştir [4]. Bu grafikler, kompozitlerin darbe davranışına ait vurucunun numune yüzeyinden geri sekmesi (rebounding), vurucu ucunun numuneye saplanması (penetration) ve vurucunun numuneyi delip geçmesi (perforation) gibi üç özel durumun anlaşılmasını sağlamaktadır.

Kompozit plakaların mekanik özelliklerinin belirlenmesi için yaptığımız çekme ve kayma testlerinden elde edilen yoğunluk, elastisite modülü, kayma modülü ve poisson oranı değerleri Tablo 1’ de verilmiştir.

**Tablo 1.** Kompozit Plakalar içindeki Takviye Oranına bağlı olarak elde edilen Mekanik Özellikleri

Numune	Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	Lif Yönündeki Elastisite Modülü (E1) MPa	Kayma Modülü G <sub>12</sub>	Poission Oranı
%0	1,208	6970	260	0,27
%1 TiC	1,252	7225	269	0,29
%3 TiC	1,263	7998	298	0,31
%5 TiC	1,277	6827	254	0,25

Tablo 2’de darbe testine maruz bırakılan kompozit plakaların kodları verilmiştir. Katman\_Takviye Eleman Malzemenin Ağırlıkça Yüzdesi\_Darbe enerjisi şeklinde kodlama olarak belirlenmiştir.

**Tablo 2.** Kompozit Numunelerin Kodları ve Kodlara ait açıklamalar

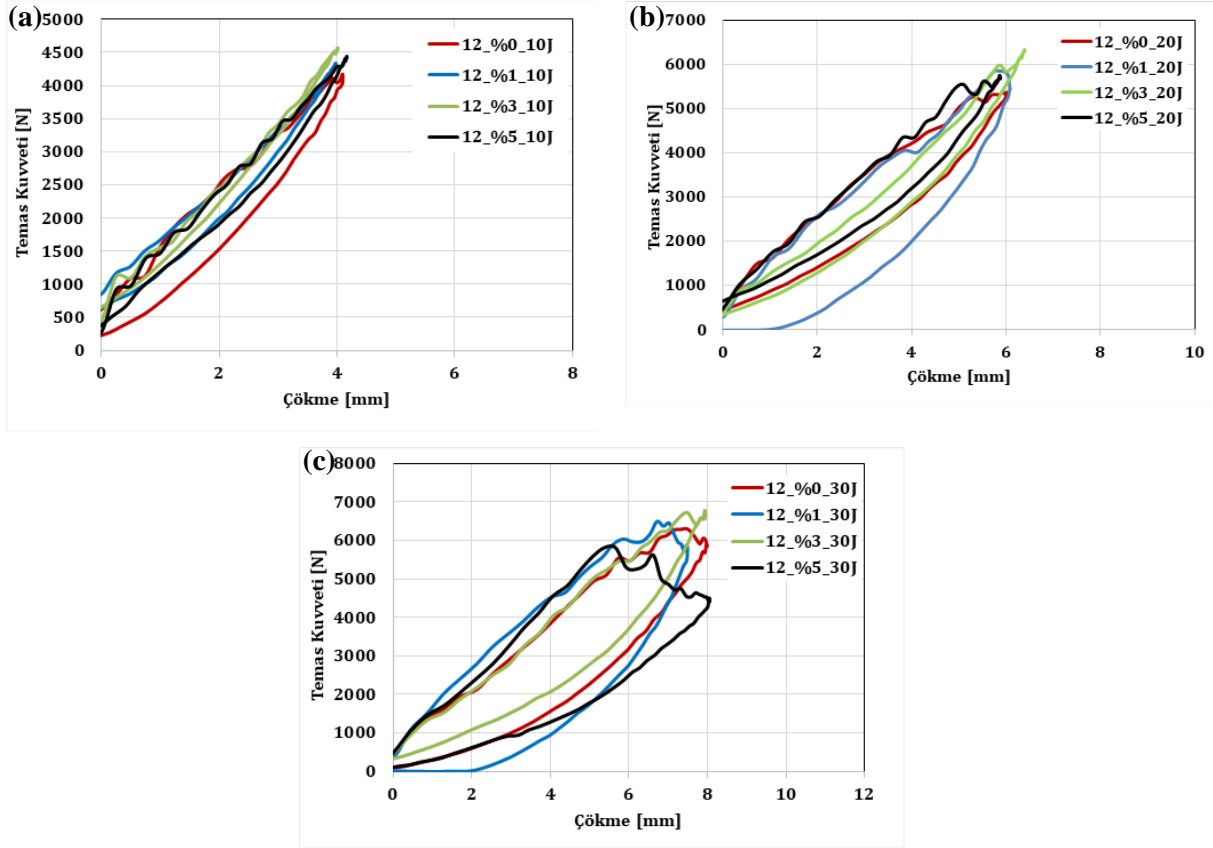
Numune Kodu	Açıklama
12_%0_10J	12 katmanlı %0 ağ. TiC takviyeli 10J darbe enerjisi
12_%0_20J	12 katmanlı %0 ağ. TiC takviyeli 20J darbe enerjisi
12_%0_30J	12 katmanlı %0 ağ. TiC takviyeli 30J darbe enerjisi
12_%1_10J	12 katmanlı %1 ağ. TiC takviyeli 10J darbe enerjisi
12_%1_20J	12 katmanlı %1 ağ. TiC takviyeli 20J darbe enerjisi
12_%1_30J	12 katmanlı %1 ağ. TiC takviyeli 30J darbe enerjisi
12_%3_10J	12 katmanlı %3 ağ. TiC takviyeli 10J darbe enerjisi
12_%3_20J	12 katmanlı %3 ağ. TiC takviyeli 20J darbe enerjisi
12_%3_30J	12 katmanlı %3 ağ. TiC takviyeli 30J darbe enerjisi
12_%5_10J	12 katmanlı %5 ağ. TiC takviyeli 10J darbe enerjisi
12_%5_20J	12 katmanlı %5 ağ. TiC takviyeli 20J darbe enerjisi
12_%5_30J	12 katmanlı %5 ağ. TiC takviyeli 30J darbe enerjisi

## A. DARBE TESTLERİN ANALİZLERİ

### A. 1. TiC Nanopartikül Takviyeli Hibrit Kompozitlerin Kuvvet Çökme (F-d) Grafikleri

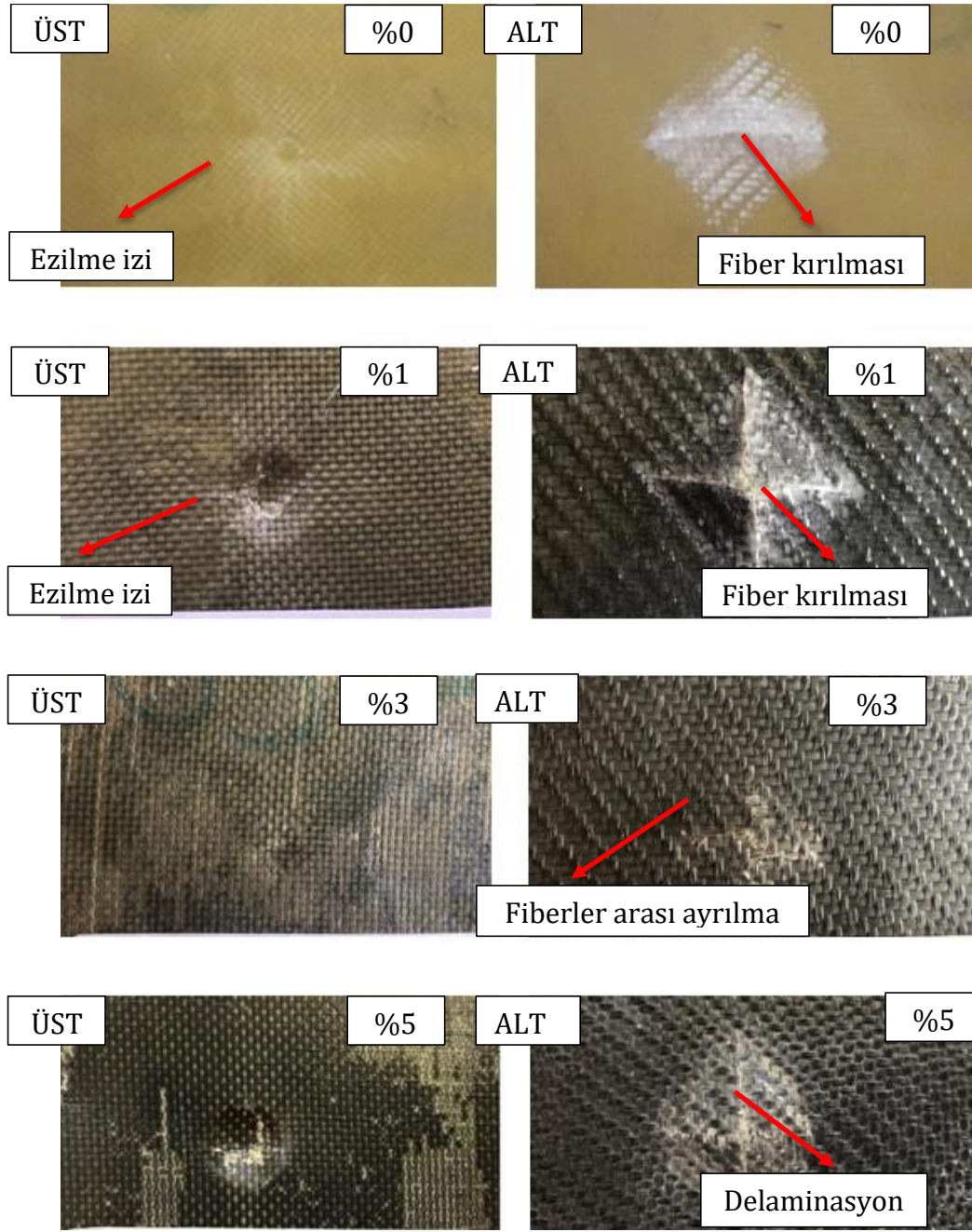
Kuvvet-çökme (F-d) eğrileri darbe olayı esnasındaki kompozit plaklara ait darbe davranışını belirlemede kullanılan grafiklerden biridir. Bir F-d grafiği artan darbe enerjisi altında kuvvetin çökmeye karşı değişimini gösterir. Şekil 5’ de 10J, 20J ve 30J darbe enerjisi uygulanmış numunelerin kuvvet çökme grafikleri verilmiştir.





**Şekil 5.** TiC Takviyeli numunelerin (a)10J, (b) 20J ve (c) 30J darbe enerjisi altındaki kuvvet – çökme (F-d) grafikleri

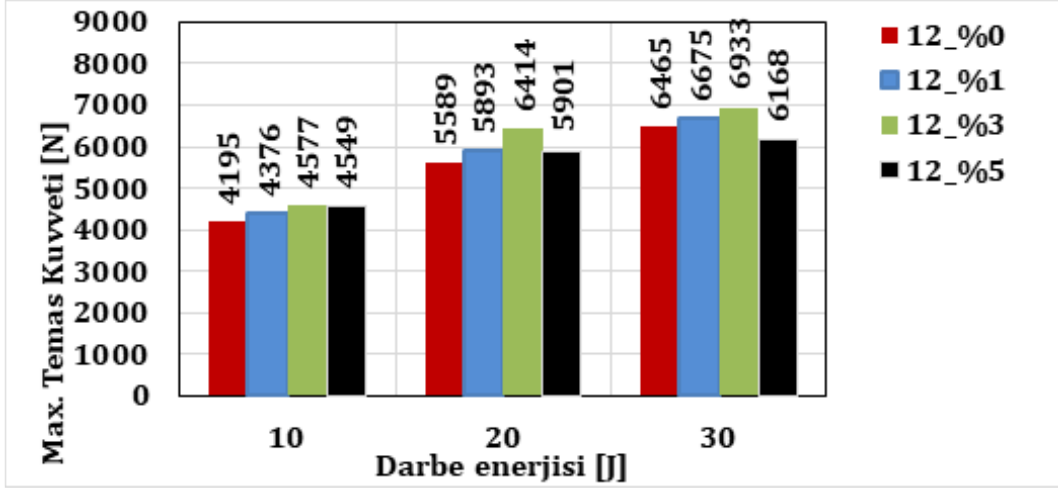
Şekil 5’de farklı darbe enerjilerine maruz bırakılmış üç farklı TiC konsantrasyonuna sahip hibrit kompozit plakaların kuvvet-çökme eğrileri kapalı formdadır. Darbeye maruz kalan yüzeye uygulanan kuvvet arttıkça eğri altında kalan alan artış göstermektedir. Diğer yandan, darbe enerjisinin artması ile beraber çökmenin arttığı söylenebilmek ile beraber bu tür kompozitlerin üst yüzeyinde matris ezilmesi, fiber kopması, delaminasyon hasarı görülürken alt yüzeyinde ise fiber hasarı, fiber ayrılması ve deleminasyon hasarları (Şekil 6) görülmektedir. Uygulanan darbe enerjisi arttıkça %3 ağı. TiC takviyesinin diğer oranlara göre (%0-%1-%5 ağı.) çökme direncinin yüksek çıktığı görülmüştür. %3 ağı. TiC takviyeli kompozit plakalardaki kuvvet-çökme grafiğinde kapalı eğri alanının diğer plakalara göre alanın düşük olması çökmenin de az olduğunu göstermektedir.



Şekil 6. Darbe enerjisi uygulanan numunelerin darbe sonrası üst ve alt yüzey hasar fotoğrafları

## A. 2. Maksimum Kuvvet Darbe Enerjisi Grafiği

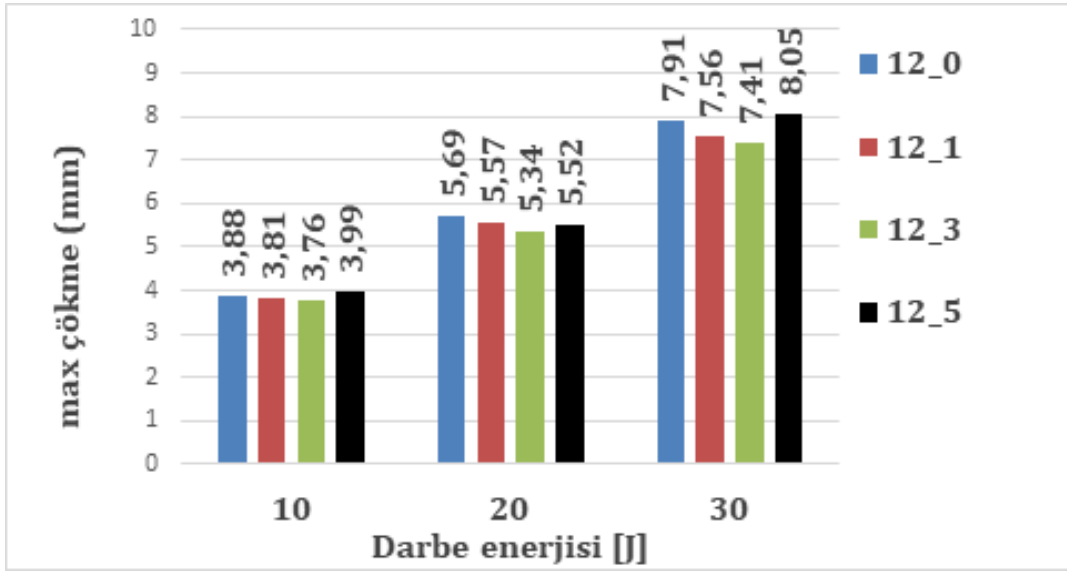
Şekil 7’de %0, %1, %3, %5 ağ. TiC takviyeli numunelerin 10J, 20J ve 30J’da maksimum kuvvet-darbe enerjisi grafiği gösterilmektedir. Uygulanan darbe enerjisi arttıkça doğrusal olarak maksimum yükün arttığı görülmektedir. Aynı darbe enerjileri dikkate alınarak yapılacak değerlendirme de %3 ağ. TiC nanopartikül takviyeli numunelerin tüm darbe enerjilerinde (10J, 20J, 30 J) maksimum yükün en yüksek değerlerinde elde edildiği belirlenmiştir.



Şekil 7. TiC Takviyeli Numunelerin 10J-20J-30J Maksimum Kuvvet-Darbe Enerjisi grafikleri

### A. 3. Maksimum Kuvvet Maksimum Çökme Grafiklerinin İncelenmesi

Şekil 8'de %0, %1, %3, %5 ağ. TiC nanopartikül takviyeli numunelerin 10J, 20J ve 30J darbe enerjisinde maksimum çökme-darbe enerjisi grafikleri gösterilmektedir.



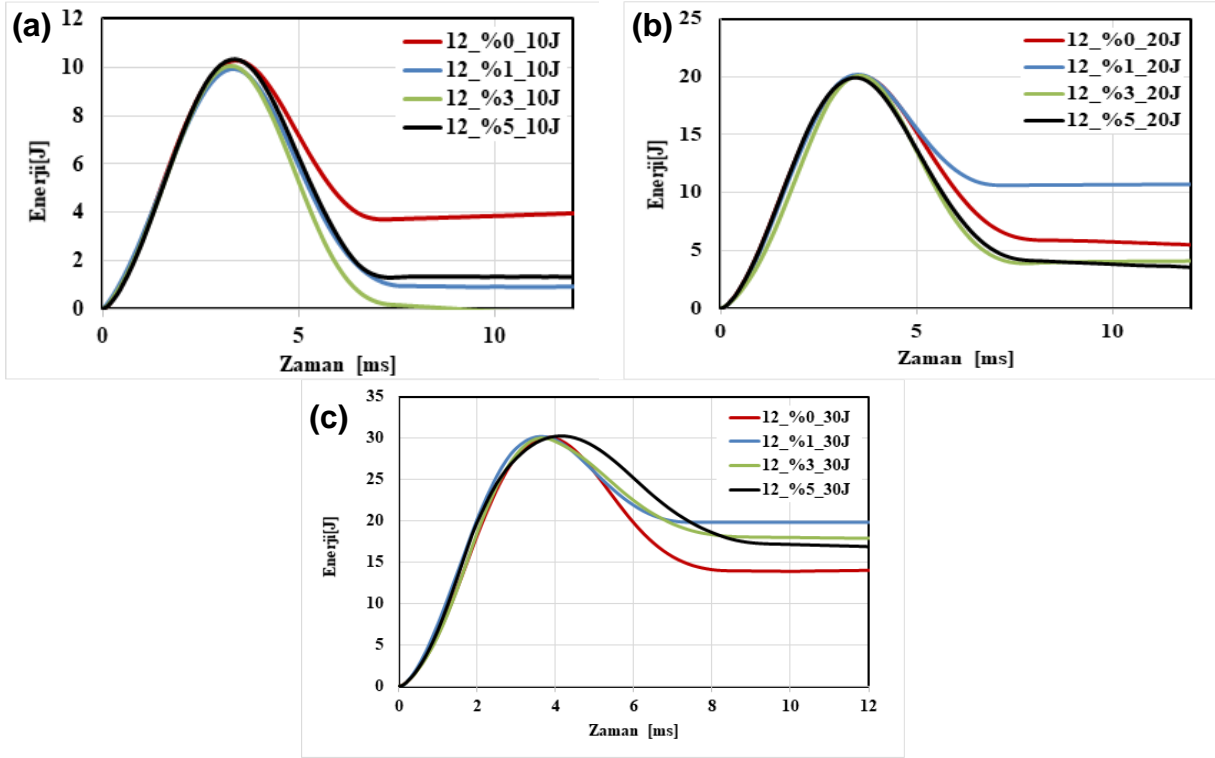
Şekil 8. %0, %1, %3, %5 ağ. TiC Takviyeli numunelerin 10J, 20J ve 30J Maksimum Kuvvet-Darbe Enerjisi grafiği

Darbe enerjisi arttıkça numunelere gelen maksimum kuvvetin arttığı görülmüştür. Aynı darbe enerjisine maruz kalan numuneler karşılaştırılarak yapılan değerlendirme de 10J, 20J ve 30J darbe enerjilerinde %3 ağ. TiC takviyeli numunelerin diğer TiC takviyeli (%1 ve %5 ağ.) ve takviyesiz numunelere göre daha fazla mukavemet gösterdiği ve darbe etkisi altında %6,32 daha az çökme oluştuğu görülmektedir.

### A. 3. Absorbe Edilen Enerji-Zaman Grafiklerinin İncelenmesi

Şekil 9 (a-c)' da yer alan grafikler incelendiğinde bütün eğriler parabolik şekilde oluşmuştur. Enerji-zaman grafiklerinde eğriler parabolik şekil meydana getirdiğinde numune yüzeyine çarpan vurucu ucun numuneye çarptıktan sonra geri sekme yaptığı görülmektedir. Vurucunun sahip olduğu enerjinin

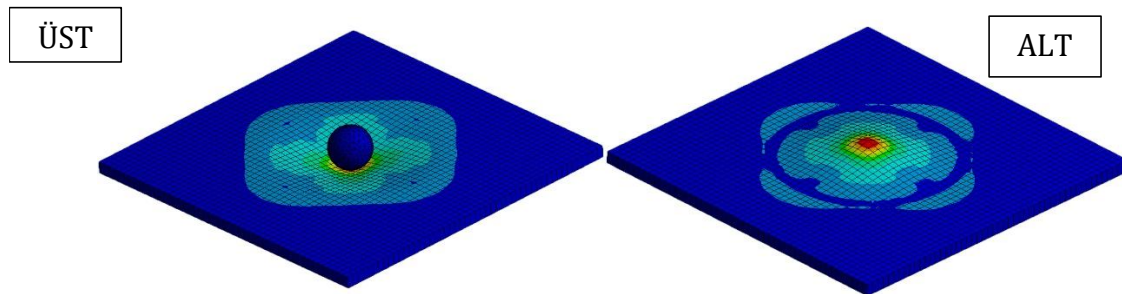
hepsi numune tarafından absorbe edilememiştir. Numunede delinme ve saplanma gibi bir sonucun oluşmadığı görülmektedir.



Şekil 9. %0, %1, %3, %5 ağırlıkta TiC Takviyeli numunelerin 10J, 20J ve 30'de Absorbe Ettiği Enerjinin Zamana bağlı grafiği

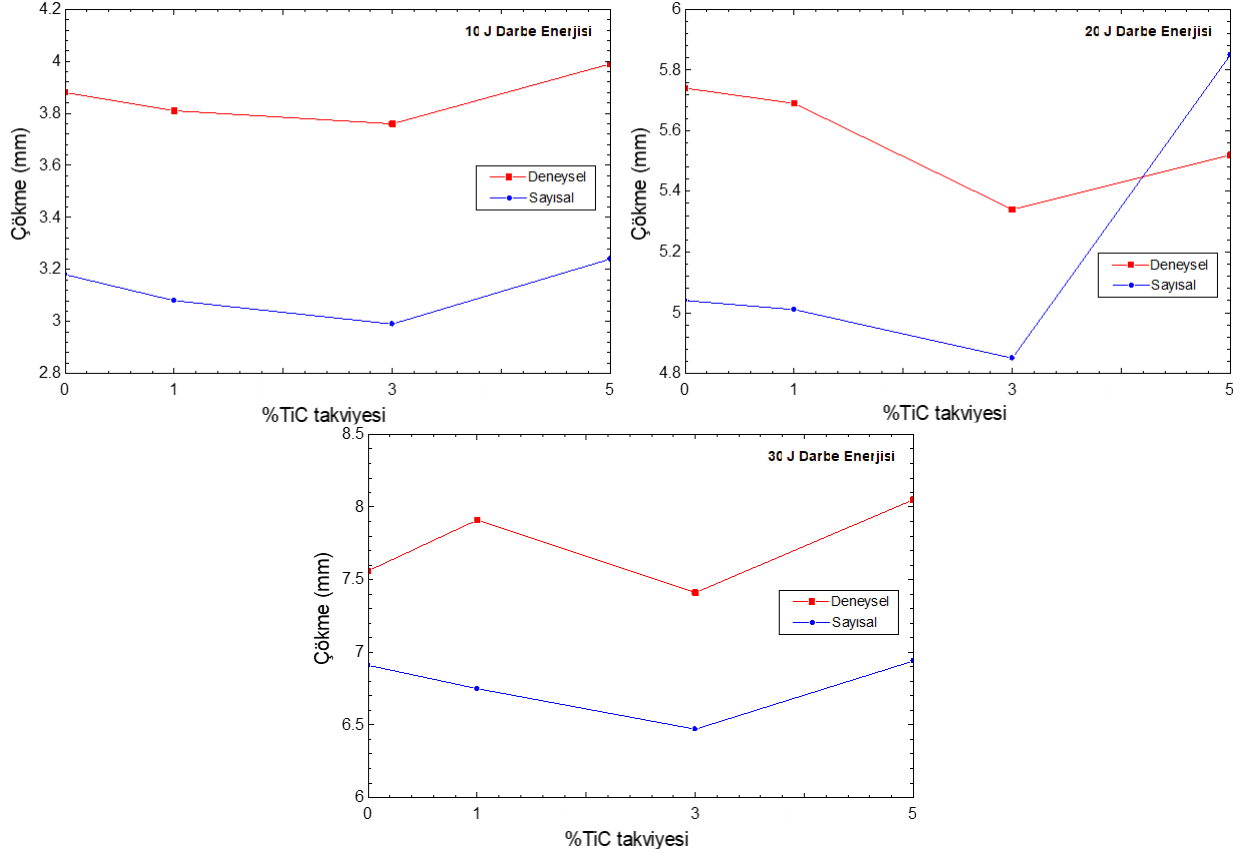
## IV. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE KARŞILAŞTIRMA

ANSYS Workbench sonlu elemanlar paket programı kullanarak tabakalı kompozit plakaların darbe testleri simüle edilerek kuvvet-çökme değerleri hesaplanmıştır. Sonlu eleman tabanlı bir program olan ANSYS mühendislik probleminin çözümü üç aşamada gerçekleştirilmektedir. Bu aşamalar; ön işlemler, çözüm ve son işlemler olarak tanımlanmıştır. Bu çalışmada ANSYS Workbench programının Explicit Dynamics modülünde kompozit plakalar modellenmiş (Şekil 10) ve deneysel verilerde elde edilen mekanik özelliklerin parametreleri programa aktarılarak deneyler bilgisayar ortamında matematiksel olarak analiz yapılmıştır.



Şekil 10. %3 ağırlıkta TiC katkı hibrit kompozitlerin 30J darbe enerjisi altında maruz bırakılmış Explicit Dynamics modülüne aktarılmış kompozit plaka

Yapılan analizler sonucunda, sayısal testlerde elde edilen performans değerlerinin deneysel testlerden daha yüksek çıktığı gözlemlenmiştir. Sayısal testler ile deneysel testler %79,5 oranında yakınsama görülmektedir. Deneysel olarak yapılan darbe test sonuçlarında % 3 ağırlıkça TiC takviyeli numunelerde görülen üstün darbe karakteristik özellikleri sayısal analizler de % 3 ağırlıkça TiC takviyeli hibrit kompozitlerde de elde edilmiştir (Şekil 11). Tablo 1’den alınan veriler sonucunda yapılan simülasyon testleri birbiri ile uyumlu olduğu görülmüştür. Sayısal simülasyonda yapılan kuvvet-çökme sonuçları dikkate alındığında sayısal yapılan analizlerde TiC partiküllerin yüzeyde homojen olarak dağılımı varsayıldığından deneysel verilere nazaran yüksek değerler göstermiştir.



Şekil 11. TiC takviyeli numunelerin 10J, 20J ve 30J altındaki çökme – darbe enerji değerlerinin deneysel ve sayısal karşılaştırılması

## V. SONUÇ

Bu çalışmada epoksi ile güçlendirilmiş 12 tabakalı (9 kevlar+3cam elyaf) hibrit kompozit numunelere TiC nanopartikül ilavesinin mekanik özelliklere ve darbe davranışına olan etkisi incelenmiştir. Bu amaç doğrultusunda 12 tabakalı 100x100 mm boyutlarında hibrit kompozit plakaların oda sıcaklığında darbe davranışları yapılmıştır. 10J, 20J ve 30J şeklinde artan darbe enerjilerinde deneylere tabi tutulmuşlardır. Yapılan bu mekanik testler ve darbe testleri sonucunda bu hibrit kompozit plakaların darbe davranışları hakkında aşağıdaki sonuçlar çıkarılmıştır;

- Hibrit kompozit plakaların reçinesine ağırlıkça %1 ağırlıkça TiC takviyesinin yapıldığı numunelerin elastisite modülünde %3,65 artış, %3 ağırlıkça TiC takviyesinde %14,74 artış ve %5 ağırlıkça TiC takviyesinde ise %2,03 oranında düşüş meydana gelmiştir.
- Hibrit kompozit plakaların reçinesine ağırlıkça %3 ağırlıkça TiC takviyesinin yapıldığı numunelerde absorbe edilen darbe enerjisinde %6,32 oranında artış görülmüştür.

- Ağırlıkça %3 oranının üzerinde takviye yapılması durumunda TiC nanopartiküllerinin topaklanmaya neden olduğu, homojen olarak reçine içerisinde dağılmadığı, bunun sonucunda reçinenin özelliklerine olumsuz etki yaparak katmanlar arası yapışmayı azalttığı görülmüştür.

Hibrit kompozit plakalarda, düşük darbe enerjileri için darbe uygulanan yüzeylerde ilk önce ezilme izi ve matris çatlağı ile başlayan hasar modu, darbe enerjisinin artmasıyla tabaka kalınlığı boyunca fiber kırılmalarının olduğu hasar moduna dönüşmektedir. Tüm numunelerden elde edilen  $F_{max}$  değeri karşılaştırıldığında %3 ağırlıkça TiC nanopartikül takviyeli numunelerden, en yüksek  $F_{max}$  değerleri elde edilmiştir. Buna göre, darbe karakteristikleri değerleri bakımından %3 ağırlıkça TiC ilaveli hibrit kompozit plakaların %0, %1, %5 ağırlıkça TiC takviyeli numunelere göre daha üstün performans göstermektedir.

Hibrit kompozit plakalar için oda sıcaklığında darbe enerjisi arttıkça temas kuvveti, çökme ve numune ile temas süreleri de artmaktadır. Genel olarak kompozitin kuvvet ve çökme değerleri fiber kopması sınırında en yüksek değerine ulaşırken, vurucu ile numune arasındaki temas süresi ise fiber kopması öncesinde en yüksek değerine ulaşmaktadır. TiC nanopartikül takviyeli hibrit kompozit plakalarda darbe uygulanmamış olan arka yüzeylerde küçük delaminasyonlar ve fiberler arası ayrılma olarak başlayan hasar modu, darbe enerjisinin artmasıyla delaminasyon alanlarının genişlediği ve bazı fiberlerin matristen ayrıldığı bir hasar moduna dönüşmektedir.

Aramid/cam hibrit kompozitlerde, aramid fiberlerin altında bulunan cam fiberler aramid fiberler içinde meydana gelen delaminasyonları sınırlayıcı bir etki yaptığı ve daha bölgesel bir hasarın meydana gelmesini sağladığı gözlemlenmiştir. TiC'in tabakalar arası kayma dayanımını artırarak delaminasyonu azalttığı görülmüştür. Bu azalma en belirgin olarak ağırlıkça %3 oranında TiC oranına sahip hibrit kompozitlerde görülmüştür. Reçine içerisine ağırlıkça yüzde olarak ilave edilen TiC partiküllerinin homojen olarak dağılması ve topaklanma olayının minimum oranına düşmesi için mekanik karıştırıcı yerine ultrasonik karıştırıcı ile karıştırılma işleminin yapılması daha iyi sonuçlar elde edileceği öngörülmüştür.

DeneySEL test sonuçları ile sayısal test sonuçları arasında %79,5 oranında yakınsama görülmüştür. Sayısal test sonuçlarında da %3 ağırlıkça TiC takviyeli kompozit plakalar en iyi mekanik özellik göstermişlerdir. Ağırlıkça %3 ağırlıkça TiC'li hibrit kompozit plakaların diğer TiC ilave oranlarına göre (%0, %1 %5 ağırlıkça) hem mekanik özellikler açısından hem de darbe direnci açısından daha iyi bir performans sergilediği görülmüştür.

**TEŞEKKÜR:** Bu çalışma Süleyman Demirel Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri tarafından desteklenmiştir (Proje No: 5061-YL1-17). Ayrıca kompozit plakaların üretimi aşamasında desteklerini esirgemeyen ERNES kompozit firmasına teşekkür ederiz.

## **VI. KAYNAKLAR**

- [1] A. Doğan, "Farklı Çevresel Koşullara Maruz Kompozitlerin Mekanik Davranışları," Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, Türkiye, 2014.
- [2] M. Metin, "E-Cam/Epoksi Tabakalı Kompozitlerde Düşük Hızlı Darbe Hasarının Burkulma Özelliklerine Etkisi," Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Selçuk Üniversitesi, Konya, Türkiye, 2008.
- [3] M. Özer, "Vakum Destekli El Yatırma Yöntemi İle Üretilen  $Fe_2O_3$  Nano Parçacık İlaveli Tabakalı Kompozitlerin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi," Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Necmettin Erbakan Üniversitesi, Konya, Türkiye, 2018.
- [4] M. Sayer, "Hibrit Kompozitlerin Darbe Davranışlarının İncelenmesi," Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Pamukkale Üniversitesi, Denizli, Türkiye, 2009.

- [5] A. K. Bandaru, V. V. Chavan, S. Ahmad, R. Alagirusamy ve N. Bhatnagar, "Ballistic Impact Response of Kevlar® Reinforced Thermoplastic Composite Armors," *International Journal of Impact Engineering*, c. 89, ss. 1–13, 2016.
- [6] A. K. Bandaru, V. V. Chavan, S. Ahmad, R. Alagirusamy ve N. Bhatnagar, "Low Velocity Impact Response of 2D and 3D Kevlar/Polypropylene Composites," *International Journal of Impact Engineering*, c. 93, ss. 136–143, 2016.
- [7] A. Malek, "Synthesis and Characterization of Epoxy Matrix Composites Reinforced with Various Ratios of TiC," *Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering*, c. 10, s. 4, ss. 231-237, 2016.
- [8] B. Berk, R. Karakuzu, B. M. İçten, V. Arıkan, Y. Arman, C. Ataş ve A. Gören, "An Experimental and Numerical Investigation on Low Velocity Impact Behavior of Composite Plates," *Journal of Composite Materials*, c. 50, s. 25, ss. 3551-3559, 2016.
- [9] F. Mili ve B. Necib, "Impact Behaviour of Cross-Ply Laminated Composite Plates Under Low Velocities," *Composite Structures*, c. 51, ss. 273-244, 2001.
- [10] M. Kam ve M. Saruhan, "Derin Kriyojenik İşlemin Farklı Bekletme Sürelerinin AISI 4140 (42CrMo4) Çeliğın Mekanik Özelliklerine Etkisi," *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, c. 6, s. 3, ss. 553-564, 2018.
- [11] S. Mohapatra, A. Mantry, S. K. Singh, "Performance Evaluation of Glass-Epoxy-TiC Hybrid Composites Using Design of Experiment," *Journal of Composites*, 2014.
- [12] M. Sudheer, R. Prabhu, K. Raju ve T. Bhat, "Effect of Filler Content on the Performance of Epoxy/PTW Composites," *Advances in Materials Science & Engineering*, 2014.
- [13] N. Kavitha, M. Balasubramanian ve A. X. Kennedy, "Investigation of Impact Behavior of Epoxy Reinforced with Nanometer- and Micrometer-sized Silicon Carbide Particles," *Journal of Composite Materials*, c. 47, s. 15, ss. 1877-1884, 2012.
- [14] S. Kumar, D. S. Gupta, I. Singh ve A. Sharma, "Behavior of Kevlar / Epoxy Composite Plates Under Ballistic Impact," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, c. 29, s. 13, ss. 2048-2064, 2010.
- [15] S. L. Valenca, S. Griza, V. G. De Oliveira, E. M. Sussuchi ve F. G. C. De Cunha, "Evaluation of the Mechanical Behavior of Epoxy Composite Reinforced with Kevlar Plain Fabric and Glass/Kevlar Hybrid Fabric," *Composites Part B: Engineering*, c. 70, ss. 1–8, 2015.
- [16] S. Y. Fu, Feng, X. Q. Feng, B. Lauke and Y. W. Mai, "Effects of Particle Size, Particle/Matrix Interface Adhesion and Particle Loading on Mechanical Properties of Particulate-Polymer Composites," *Composites Part B: Engineering*, c. 39, s. 6, ss. 933–961, 2008.
- [17] Y. Nakamura, M. Yamaguchi, M. Okubo ve T. Matsumoto, "Effect of Particle Size on Impact Properties of Epoxy Resin Filled with Angular Shaped Silica Particles," *Polymer*, c. 32, s. 16, ss. 2976-2979, 1991.