

## **FARKLI ENERJİLERDE ARDIŞIK TEKRARLI DARBELERE MARUZ KALAN POLİMER KOMPOZİTLERİN DARBE DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

**Mustafa Özgür BORA<sup>1</sup>, Onur ÇOBAN<sup>1</sup>, Tamer SINMAZÇELİK<sup>1,2</sup>,  
İsmail CÜRGÜL<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Kocaeli Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Veziroğlu Kampüsü, 41040, İzmit,  
TÜRKİYE

<sup>2</sup> TÜBİTAK-MAM, Malzeme Enstitüsü, P.K.21, 41470, Gebze, TÜRKİYE

### **ÖZET**

Sürekli fiber takviyeli polimer kompozitler uçak ve havacılık uygulamalarında sıklıkla kullanılmaktadır. Kullanım veya bakım esnasında bu malzemelerden yapılan elemanlar küçük darbelere maruz kalmaktadır. Bu darbeler malzemelerin kırılmasını sağlayacak büyüklükte olmasa bile kalıcı deformasyona neden olan ve ileride parçanın hasarlanmasına neden olan öncü deformasyonların oluşmasına neden olmaktadır.

Bu çalışmada sürekli karbon fiber takviyeli Polieterimid (PEI) matrisli kompozit malzemeler sarkaç tipi enstrumante edilmiş (Ceast - Resil 25) darbe test cihazı ile 0,54-0,94 J arasında değişen düşük hızlı ve enerjili darbelere maruz bırakılmışlardır. Malzemelerin bu enerji seviyelerindeki darbe-yorulma davranışları incelenmiştir. Çalışma kapsamında her biri 1 J den daha küçük olan 3 farklı büyüklüklerdeki darbeler numuneye farklı sıralamalar ile ve farklı sayılarda tatbik edilmiştir. Bu esnada numunedeki elastik ve plastik deformasyonlar, numunelerin her bir darbe altında absorbe ettiği elastik-plastik enerjiler ve toplam darbe sayıları incelenmiştir. Deformasyona uğrayan malzemelerin optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskobu kullanılarak hasar analizleri gerçekleştirilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Polimer kompozit, darbe-yorulması, fraktografi

## IMPACT BEHAVIOUR INVESTIGATION OF REPEATEDLY IMPACTED POLYMER COMPOSITES AT VARIOUS ENERGIES

### ABSTRACT

Continuous fiber reinforced polymer composites (CFRP) are using extensively in aeroplane and aerospace applications. The structural components that made by these materials may be subjected to many small repeatedly impact loads during its service life or maintenance. These impacts may not big enough to fracture the material but they may cause initial deformations, which will responsible for catastrophic failure of the component.

In the current study, continuous carbon fiber reinforced polymer composites (CFRP) were subjected to low velocity impact loading at energy levels ranging 0,54-0,94 J by using pendulum type instrumented Ceast model Resil 25 impact test system. Impact behaviour of these materials were investigated at these energy levels. In the experiments, 3 different impact energies that were lower than 1 J were applied to specimen at different impact numbers. During the impact-fatigue experiments, elastic and plastic deformations in material, absorbed elastic and plastic energies at each impact and total impact number to fracture or the material were evaluated. Damage analysis of deformed materials were investigated by using optic and scanning electron microscope.

**Keywords:** Polymer composite, impact-fatigue, fractography

### 1. GİRİŞ

Sürekli fiber takviyeli polimer kompozitler uçak ve havacılık uygulamalarında geniş bir şekilde kullanılmaktadırlar [1]. Uçak ve havacılık endüstrisinde kullanılan bu polimer malzemelerin konvansiyonel metal malzemelere göre yüksek özgül dayanım ve rijitlik, yüksek kimyasal direnç gibi önemli avantajlar sunarlar [2,3]. Buna rağmen bu malzemelerin metal malzemelere göre dezavantajları da vardır. Uçak ve uzay aracı gövde malzemesi olarak kullanılarak bu kompozit malzemeler bakım ve servis sırasında alet düşmesi gibi düşük enerjili darbelerle maruz kalmaktadırlar [4,5]. Bu düşük enerjili darbeler malzemede gözle görülür bir hasar oluşturmasa da ileriki kullanım sürecinde malzemenin hasarlanmasına neden olabilecek öncü deformasyonlar doğuracaktır [6]. Bu nedenle darbe-yorulma yüklemesi polimer kompozitler için araştırılması gereken önemli bir konudur.

Polimer kompozitlerin darbe-yorulma konusu ile ilgili daha önce yapılmış sınırlı sayıda çalışma mevcuttur. [7] Tekrarlı darbe yorulma testleriyle sürekli fiber takviyeli epoksi ve PPS kompozitlerinin hasar mekanizmalarını incelemişlerdir ve darbe yorulma testinin hem termoplastik hem de termoset kompozitlerinin hasar toleransı için kullanışlı olduğunu bulmuşlardır. [0/45/90/-45]<sub>2S</sub> yönlü karbon/epoksi tabakalar düşük-hızlı darbeye maruz bırakılmıştır. Bu tabakalara değişik darbe enerjileri uygulanmış, ve darbe etkidikten sonra yorulma ömrü ve kalan dayanım test edilmiştir. Darbeli ve darbesiz kompozitlerin yorulma dayanımları ölçülmüştür [8]. Darbe-yorulma yüklemesine tabi tutulan cam fiber takviyeli termoplastiklerin hasar gelişim mekanizmalarını araştırmak için akustik hız ölçümleri ve optik mikroskop gözlemleri yapılmıştır [9]. Düşük enerjili darbe yüklemelerinin polimer

kompozitlerde neden olduğu gözle görülemeyen tabakalar arası (delaminasyon) hasarlar kompozit yapının darbe özelliklerini ciddi bir şekilde etkilemektedir [6]. 1.6 ve 2.2 mm kalınlığına sahip karbon fiber/epoksi tabakaların farklı katmanlarındaki hasar toleransı belirlenmiş ve darbe enerjisindeki değişikliklerde artık dayanım ve normalleştirilmiş artık dayanım saptanmıştır [10]. Polimer kompozitlerdeki darbe hasarı fotografik ve ultrasonik C-tarama yöntemleri yardımıyla incelenmiş ve darbe yüzeyinde başlayan ve numunenin kalınlığı boyunca ilerleyen darbe hasarı belirlenmiştir [11]. Çeşitli tabaka kalınlıklarına sahip farklı içerikli kompozit malzemelerin düşük hızlı darbeler altındaki hasar karakteristikleri ve darbe davranışları incelenmiş ve fraktografik inceleme neticesinde kuvvet-zaman ve enerji-zaman analizinde fiber kırılmasının birincil hasar mekanizması olduğu tespit edilmiştir [12].

Bu çalışmanın amacı üç farklı düşük enerjiye sahip darbeler üç farklı sırayla polimer kompozite tatbik edildiğinde malzemede oluşan çatlak başlangıcı ve ilerleme mekanizmalarının hem grafiksel hem de morfolojik olarak incelenmesidir. Birbirleri arasındaki ilişkiyi açıklayabilmek amacıyla deneylerde üç farklı darbe enerjisi ve vuruş sayıları değiştirilmeden sadece uygulama sıraları değiştirilerek uygulanmıştır. Darbe test numunelerinin kırılan yüzeyleri taramalı elektron mikroskopu (TEM) yardımıyla fotoğraflandırılmış; çatlak başlangıcı ve ilerleyişi mekanizmaları incelenmiştir.

## 2. DENEYSEL YÖNTEMLER VE MALZEME

Deneylerde kullanılan sürekli karbon fiber takviyeli polieterimid (PEI) kompozitler sıcak presleme yöntemiyle üretilmiş halde Ten Cate Advanced Composites (Nijverdal/Hollanda) firmasından tedarik edilmiştir. Poliakrilonitril (PAN) bazlı karbon fiberler kompozit plakalarda (T300 12 K 309 NT tipi) kullanılmak üzere Amoco tarafından üretilmiştir. Fiber hacim oranı % 60'tır. Plakalar, her birinin ağırlığı 222 g/m<sup>2</sup> ve kalınlığının 0,14 mm olan 14 tabakadan oluşmaktadır. Plakanın ticari kodu CD5150'dir.

Deneyler Ceast firmasının Resil 25 model sarıcağı tipi cihazı ile yapılmıştır. İzod tipi test numuneleri ISO 180 standartlarına göre hazırlanmıştır. Çentiksiz numuneler 10×2×65 mm boyutlarına sahiptir. Darbe-yorulma testlerinde kullanılan çekicinin uzunluğu 0,327 m, ağırlığı ise 2,508 kg'dır. Test zamanı 8 µsn olup bu zaman zarfında bilgisayar ortamında 2000 data alınmaktadır.

İlk olarak çalışılacak darbe enerji aralığını seçmek için bir dizi ön çalışma yapıldı. Numuneye 0,14 J büyüklüğünde darbe uygulanınca malzemenin elastik tepki verdiği tespit edildi. Ardından başka numunelere de 0,24 J, 0,38 J, 0,54 J enerjili tek vuruşluk darbeler uygulandı. Her bir darbe sonrası numunelerin ikinci bir darbeye maruz kalmaması el yardımıyla önlenmiştir. 0,54 J değerine kadar olan darbelere malzeme yine elastik tepki vermiştir. 0,54 J değerindeki enerjiden sonraki 0,57 J enerjili darbeye malzeme elastik ve plastik tepki vermiştir. Bu nedenle başlangıç darbe enerjisi olarak 0,54 J değeri seçilmiştir.

Üst değer için başka bir numuneye 2,65 J değerinde bir darbe uygulandı ve malzeme tek vuruşta kırıldı. Darbe enerjisi 1,44 J değerine düşürüldü ve 10 test yapıldı. Testlerin bir kısmında numuneler kırıldı bir kısmında ise kırılmadı. Bu nedenle darbe enerjisi 0,94 J değerine düşürüldü ve 10 adet test uygulandı. Numunelerin hiçbiri kırılmadı ve önemli

ölçüde plastik deformasyona uğradıkları görüldü. Bu nedenle üst darbe enerjisi değeri olarak 0,94 J değeri kabul edildi. Sonuç olarak darbe-yorulma çalışma aralığı 0,54 J-0,94 J olarak belirlendi.

Malzeme içerisindeki artık gerilmeleri düzgün bir şekilde görebilmek için seçilmiş olan darbe enerjilerinin birbirine çok yakın olmaması gerekmektedir. Bu yüzden numuneleri kırmayacak sayı ve büyüklükte 250 adet 0,54 J, 10 adet 0,73 J ve 2 adet 0,94 J'lık darbeler seçilip numunelere üç farklı kombinasyonda uygulanmıştır.

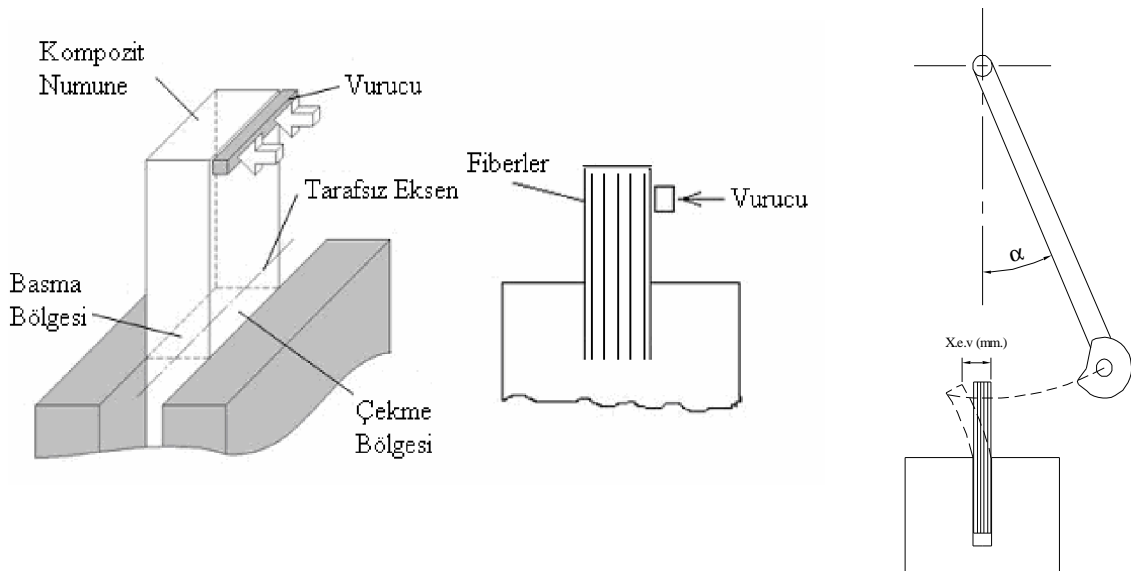
Farklı kombinasyonlar küçük ve büyük enerjili darbelerin sıralarının değişmesi ile oluşan hasar modlarının değişip değişmediğini incelemek üzere uygulanmıştır. Her deney grubu için üçer adet deney yapılmış olup, her grubu temsilen bir numunenin  $F_{maks}$ ,  $E_{maks}$ , X.e.v. grafikleri çizilip, grafikler yardımıyla bulunan sonuçlar açıklanmıştır.

Deneyde uygulanacak üç farklı darbe enerjisini seçtikten sonra üç farklı kombinasyon belirlendi. Bunlar sırasıyla (250\*0,54 J + 10\*0,73 J + 2\*0,94 J), (10\*0,73 J + 250\*0,54 J + 2\*0,94 J), (2\*0,94 J + 250\*0,54 J + 10\*0,73 J)'dir. Her grupta vuruş sayısı eşit tutulmuştur. Numuneler bu kombinasyonlarda darbeye maruz bırakıldıktan sonra 2.65 J'lık darbe uygulanarak kırılmıştır.

Darbe-yorulma deneyleri sonucu kırılan kesitler taramalı elektron mikroskobu (TEM) altında incelenmek üzere hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler fotoğraf çekimi için taramalı elektron mikroskobuna (JOEL JSM-6335F TEM) yerleştirilmiş ve fraktografik incelemeler gerçekleştirilmiştir.

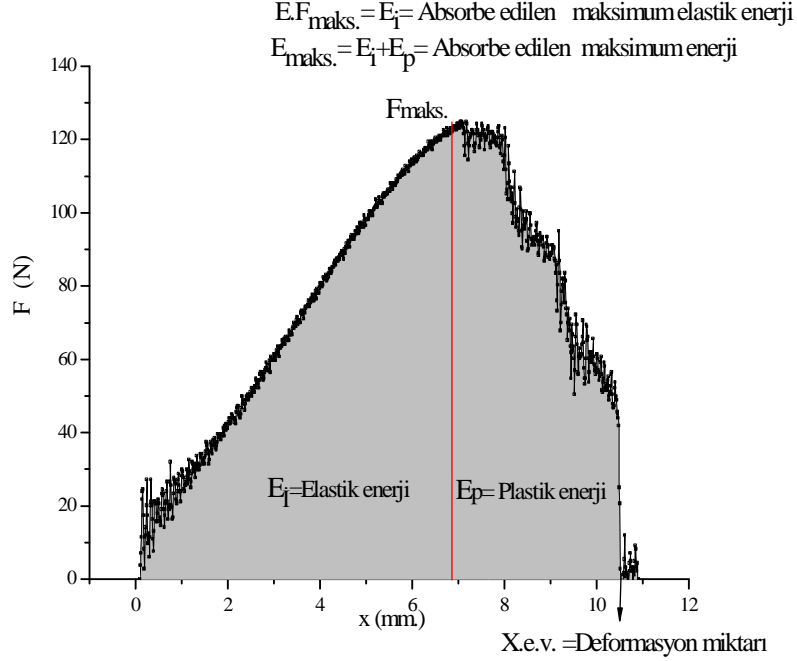
### 3. DENEYSEL SONUÇLAR

Belirli bir darbe enerjisi ile belirli bir sayıda darbeye maruz kalması sonucu numunede oluşacak artık gerilmeleri belirleyebilmek amacıyla bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Numunelerin cihaza yerleştirilme şekli şematik olarak Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1 Çentiksiz izod numunesinin sarkaç tipi Ceast Resil 25 test cihazına yerleştirilmesi

Darbe-yorulma testlerinde bulunan sonuçlar 3 farklı parametreye göre yorumlanmıştır ( $F_{maks}$ ,  $E_{maks}$ , X.e.v.). Şekil 2’de sembolik olarak çizilen F-x grafiğinden deneylerde yorum yapılmasına yardımcı olan büyüklükler gösterilmiştir.



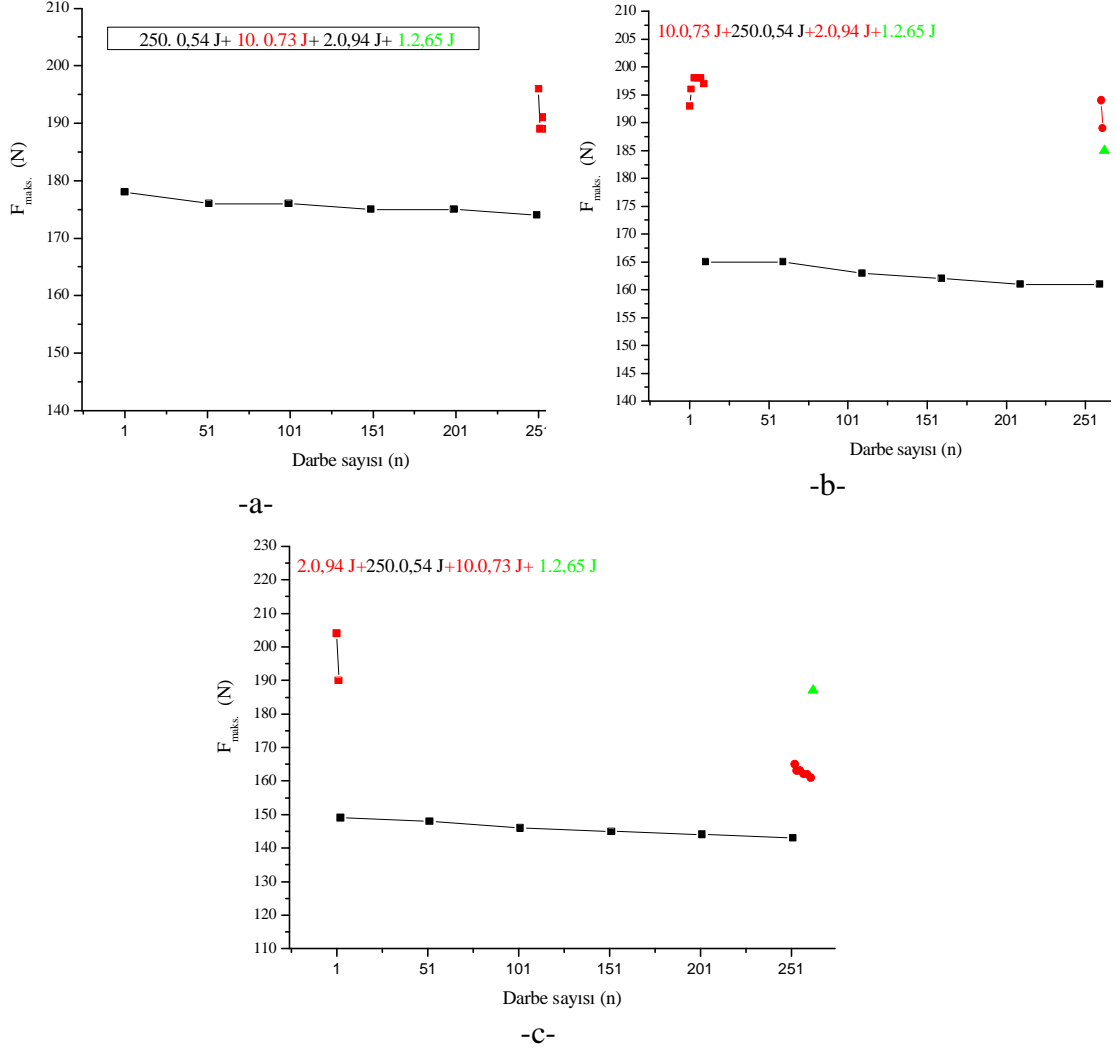
Şekil 2 Deneylerde belirtilen büyüklüklerin F-x grafiğinde sembolik olarak gösterimi

F-x grafiğinin altında kalan alan numunenin test esnasında absorbe ettiği toplam enerji ( $E_{maks}$ ) miktarıdır. Bu alanın büyüklüğü fazla ise numunenin uygulanan darbeye karşı gösterdiği direnç daha yüksektir. Darbe testlerinde de numunelere farklı enerjilere sahip tekrarlı darbeler uygulanmıştır ve numunelerin darbelere gösterdiği direnç görülmüştür.  $E.F_{maks}$  değeri numunenin absorbe edebileceği maksimum elastik enerjidir. F-x grafiğinde maksimum yükün sol tarafında kalan alandır.  $F_{maks.}$  değeri her bir darbe de ulaşılan en yüksek kuvvet değeridir. X.e.v. değeri ise numunede her bir darbede oluşan maksimum deformasyon miktarıdır.

Şekil 3’de karma darbe gruplarının etkilediği numunelerin  $F_{maks}$ -darbe sayısı grafikleri gösterilmiştir. Uygulanan düşük darbeleri enerjilerin sıraları değiştirildiğinde numunelerin  $F_{maks}$  değerlerinde değişim olmuştur. Darbe enerjilerinin birbirlerine göre büyük ve küçük değerlere sahip olması nedeniyle numunelerin  $F_{maks}$ -darbe sayısı değerleri değişmektedir. Uygulanan farklı darbe enerjileri numunenin dayanımlarını farklı değerlerde azaltmıştır. Düşük enerjili birincil grup darbeler esnasında  $F_{maks}$  değerleri düşük bir eğimle azalırken yüksek enerjili ikincil grup darbelerin ilkinin uygulanmasıyla  $F_{maks}$  değeri ani bir artış göstermiştir. Bununla beraber yüksek enerjili ikincil grup darbelerin numuneye uygulanması devam ettirildiğinde elde edilen  $F_{maks}$  değerlerinin hızlı bir şekilde düştüğü görülmüştür. Bunun nedeni ise düşük enerjili birincil darbeler sonucu numunede oluşan kalıntı gerilmelerin varlığıdır.

Yüksek enerjili birincil grup darbeler esnasında ise  $F_{maks}$  değerleri hızlı bir şekilde azalırken düşük enerjili ikincil grup darbelerin ilkinin uygulanmasıyla  $F_{maks}$  değeri ani bir düşüş göstermiştir. Bununla beraber düşük enerjili ikincil grup darbelerin numuneye

uygulanması devam ettirildiğinde elde edilen  $F_{maks}$  değerlerinin yine hızlı bir şekilde düştüğü görülmüştür. Bunun nedeni ise yüksek enerjili birincil darbeler sonucu numunede oluşan kalıntı gerilmelerin varlığıdır.



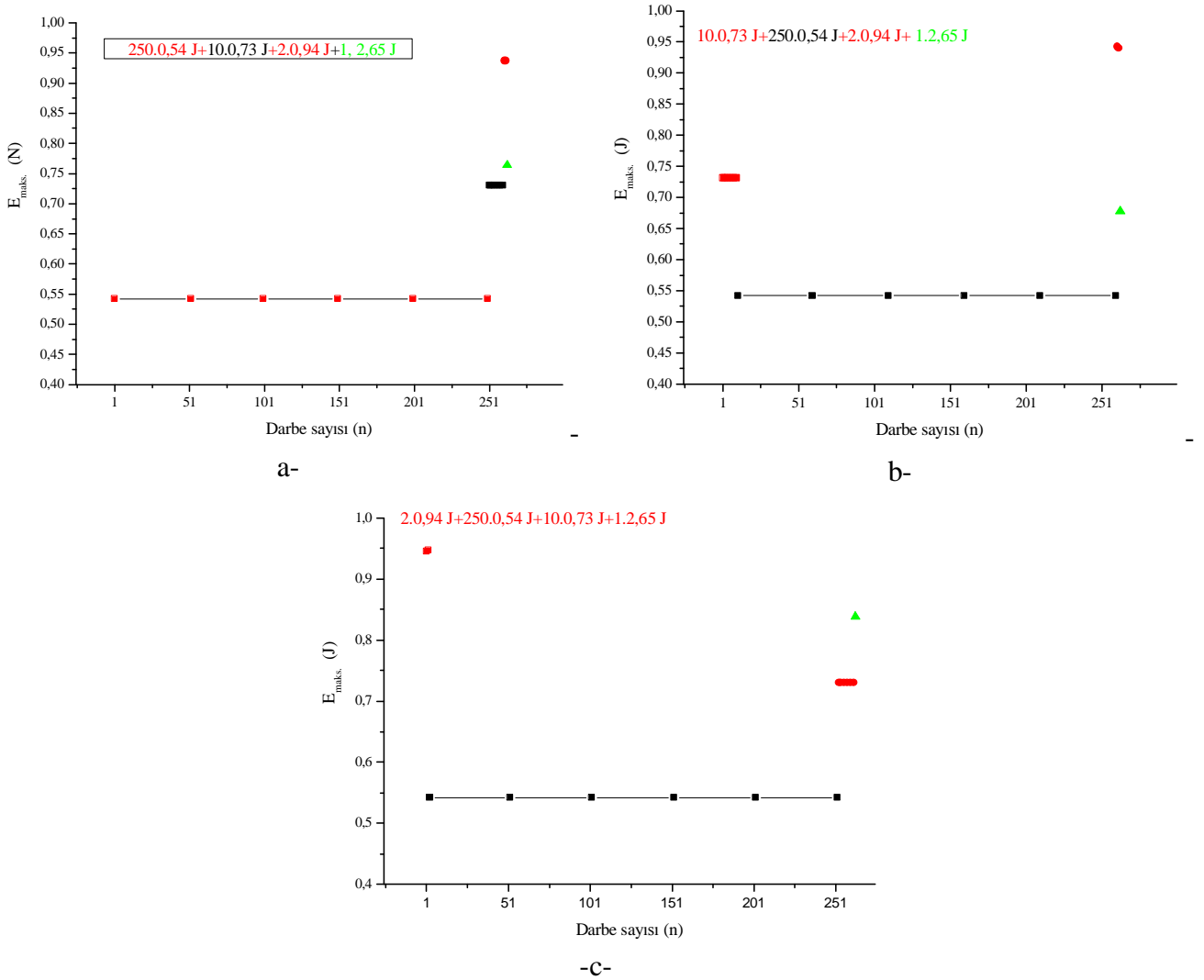
Şekil 3. Karma darbe gruplarının etkidiği numunelerin  $F_{maks}$ – darbe sayısı grafikleri

Şekil 4’de karma darbe gruplarının etkidiği numunelerin  $E_{maks}$ -darbe sayısı grafikleri gösterilmiştir. Her bir darbe enerjisindeki darbe kendi içerisinde düzgün dağılım seyrederken darbe enerjisi değerinin artması yada azalması ile  $E_{maks}$  değeri değişim göstermektedir. Darbe enerjisi değeri arttırıldığında darbe sonucu absorbe edilen maksimum enerji artmakta buna rağmen darbe enerjisi değeri azaltıldığında numunenin absorbe ettiği maksimum enerji düşmektedir.

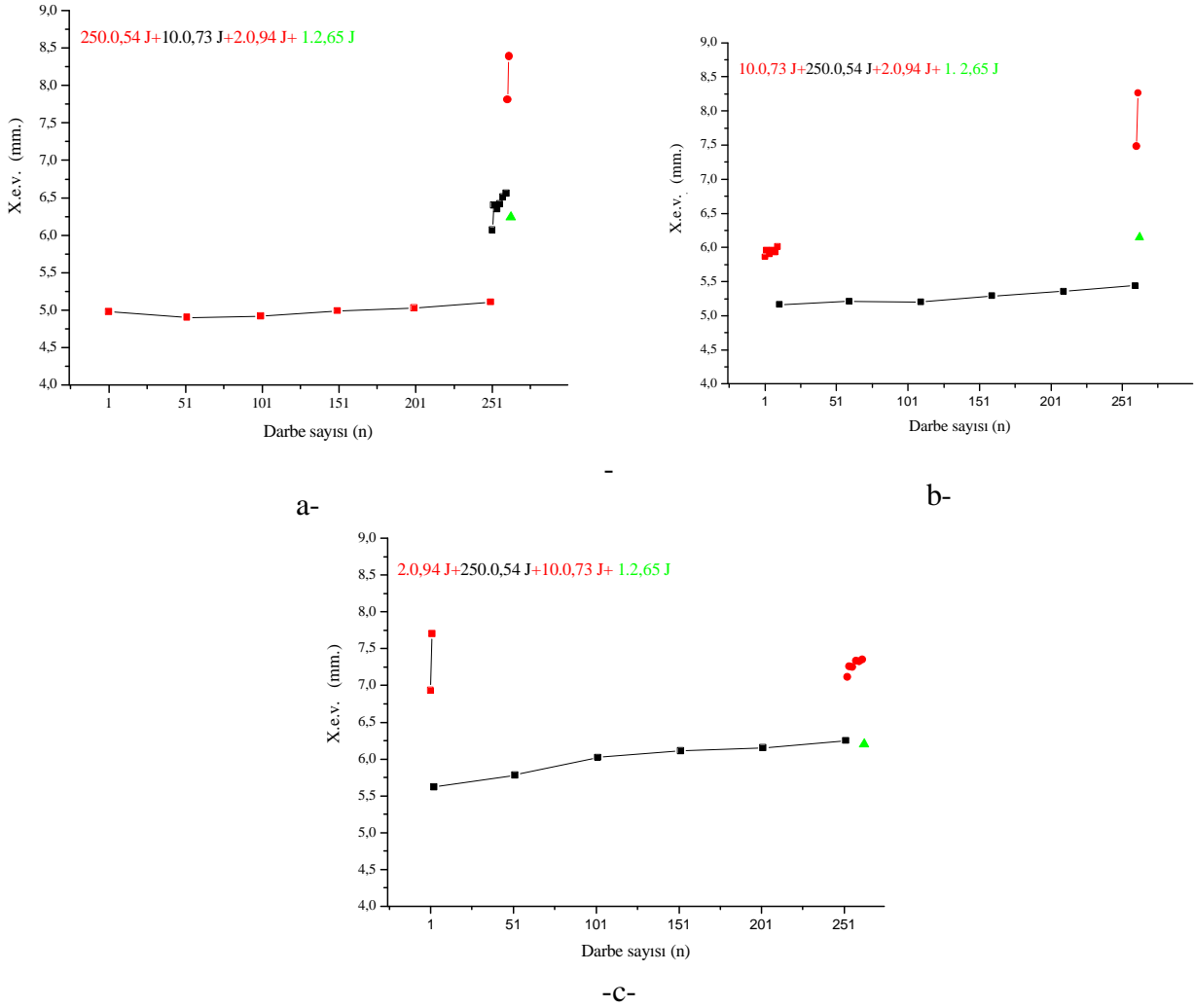
Şekil 4’teki yeşil üçgen 2,65 J değerindeki darbe enerjisinin uygulanması sonucu elde edilen  $E_{maks}$  değerlerini simgelemektedir. Şekil 4.b’deki 2,65 J değerindeki darbe sonucu elde edilen  $E_{maks}$  değeri diğer grafiklerinkinden düşük çıkmıştır; bunun nedeni 0,54 J

değerindeki darbe enerjisinden sonra numunede oluşan deformasyon 0,94 J darbeler esnasında hızlı bir ilerleyiş göstermiş ve son olarak uygulanan 2,65 J değerindeki darbe sonucu numunenin kırılması için gerekli enerjinin düşük çıktığı görülmektedir.

Şekil 5'te uygulanan darbe enerjilerinin büyüklüğünün farklı olması nedeniyle numunede farklı deformasyon miktarlarının oluştuğu görülmektedir. Artan darbe enerjisi büyüklüğüyle numunede oluşan deformasyon miktarı birden artmakta, darbe enerjisinin azaltılmasıyla deformasyon miktarında ani düşüş görülmüştür. Darbe enerjilerinin kendi içerisinde numunede yapmış olduğu deformasyon, darbe enerjisinin büyüklüğü arttıkça hızlanmaktadır. Buda grafiklerdeki her bir darbe enerjisi için çizilen eğrilerde açıkça görülmektedir.



Şekil 4. Karma darbe gruplarının etkidiği numunelerin  $E_{maks}$ – darbe sayısı grafikleri



Şekil 5. Karma darbe gruplarının etkidiği numunelerin X.e.v.–darbe sayısı grafikleri

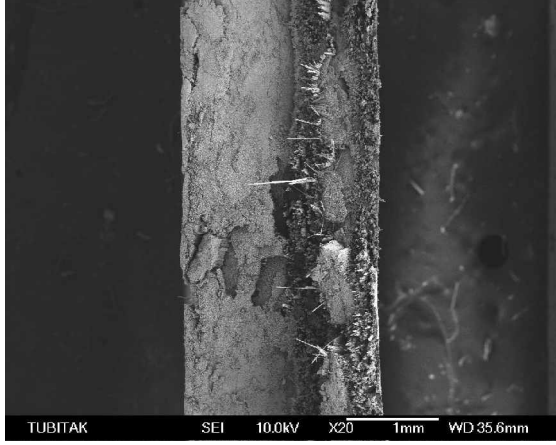
Şekil 6'daki kesit mikrofotograflarında oldukça karmaşık bir kırılma morfolojisi olduğu görülmektedir. Belirli bir aşamaya kadar çekme ve basma bölgesi olarak şekillenen bölgeler farklı bir darbe enerjisinde yeni çekme-basma bölgeleri halinde şekillenmiştir.

Fraktografik incelemelere göre ilk grup darbeler sonucunda numune kesitinde basma ve çekme bölgeleri meydana gelir. Bu bölgeleri ayıran sınıra tarafsız eksen denir. İkinci ve üçüncü grup darbelerden sonra tarafsız eksen darbe enerjisinin büyüklüğüne göre sağa yada sola doğru kayar. Yüksek enerjili darbelerden sonra düşük enerjili darbeler tatbik edilirse tarafsız eksen basma bölgesinden çekme bölgesine doğru kayma hareketi yaparken, düşük enerjili darbelerden sonra yüksek enerjili darbeler tatbik edilirse tarafsız eksen çekme bölgesinden basma bölgesine doğru kaymaktadır.

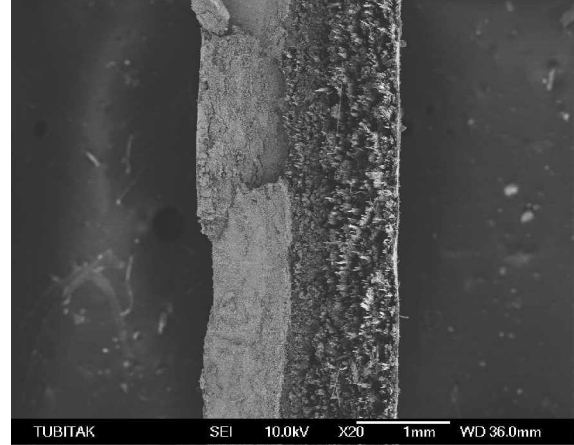
Yüksek enerjili ilk grup darbeler sonrası geniş bir çekme bölgesi ile dar bir basma bölgesi meydana gelir. Bu darbelerin ardından düşük enerjili ikincil grup darbeler uygulandığında darbe-yorulma neticesinde tarafsız eksen basma bölgesinden çekme bölgesine doğru kayarak çekme bölgesindeki matrinden sıyrılmış kırılmayan fiberlerin basma yüklemesi etkisiyle kırılarak basma bölgesini genişlettiği Şekil 6-b,c'de görülmektedir. Buna rağmen numuneye ilk önce düşük enerjili darbeler uygulandığında basma bölgesinin geniş çekme



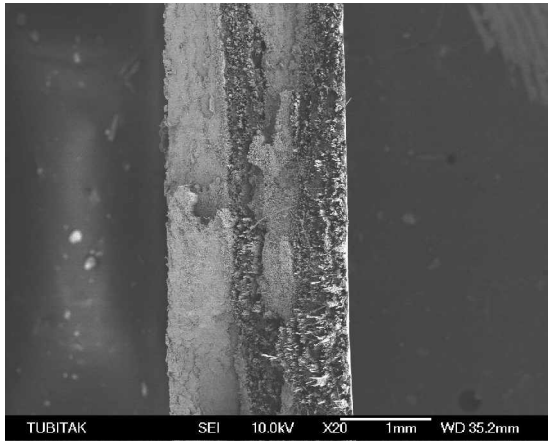
bölgesinin ise dar olduğu görülmektedir. Bu darbelerin ardından yüksek enerjili ikincil grup darbeler uygulandığında çekme bölgesinin içerisinde yeni bir çekme basma bölgeleri oluşmuştur.



-a-250\*0,54 J + 10\*0,73 J + 2\*0,94 J + 1\*2,65 J



-b-10\*0,73 J + 250\*0,54 J + 2\*0,94 J + 1\*2,65 J



-c-2\*0,94 J + 250\*0,54 J + 10\*0,73 J + 1\*2,65 J

Şekil 6. Karma darbe yüklemesi ile kırılan numune kesitlerinin genel görünüşleri

#### 4. SONUÇLAR

Sürekli karbon fiber takviyeli polietereamid (PEI) kompozit malzemelerin farklı enerjilere sahip ardışık tekrarlı darbelerdeki darbe-yorulma davranışları incelenmiştir. Darbe enerjilerinin farklı sıralamayla numunelere uygulanmasıyla malzemede oluşan deformasyon dağılımı belirlenmiştir. Darbe-yorulma testlerinde bulunan sonuçlar  $F_{maks}$ ,  $E_{maks}$ , X.e.v. parametrelerine göre yorumlanmıştır. Belirli bir enerjiyle belirli sayıda darbenin numuneye etkimesi sonucu numunede kalıntı gerilmeler oluşmaktadır. Darbe enerjisi değiştirilip darbeler devam ettirildiğinde elde edilen  $F_{maks}$ ,  $E_{maks}$  ve X.e.v. değerleri kalıntı gerilmeler nedeniyle normalden daha farklı çıkmıştır.

Karma darbe sonucu kırılan numunelerin kesitleri morfolojik olarak taramalı elektron mikroskopunda incelenmiş ve belirli bir aşamaya kadar çekme ve basma bölgesi olarak

şekillenen bölgeler farklı enerjili yeni darbelerin etkimesiyle bu bölgelerde yeni çekme-basma bölgelerinin oluştuğu gözlemlenmiştir.

## KAYNAKLAR

1. Sınmazçelik, T., Arıcı, A. A., Günay, V., “Impact-fatigue behaviour of unidirectional carbon fibre reinforced polyetherimide (PEI) composites”, **J Mater Sci** **41:6237–6244**, (2006).
2. Gómez-del Río, T., Zaera, R., Barbero, E., Navarro, C., “Damage in CFRPs due to low velocity impact at low temperature”, **Composites: Part B** **36**, 41–50, (2005).
3. Hosur, M.V., Karim, M.R., Jeelani, S., “Experimental investigations on the response of stitched/unstitched woven S2-glass/SC15 epoxy composites under single and repeated low velocity impact loading”, **Composite Structures** **61** (2003) 89–102.
4. de Moraes, W.A., Monterio, S.N., d’Almeida, J.R.M. “Evaluation of repeated low energy impact damage in carbon-epoxy composite materials”, **Composite Structures** **67** (2005) 307-315.
5. Saito, H., Kimpara, I., “Evaluation of impact damage mechanism of multi-axial stitched CFRP laminate”, **Composites: Part A** (2006).
6. Azouaoui, K., Rechak, S., Azari, Z., Benmedakhene, S., Laksimi, A., Pluvinae, G., “Modelling of damage and failure of glass/epoxy composite plates subject to impact fatigue”, **International Journal of Fatigue** **23** (2001) 877–885.
7. Roy, R., Sarkar, B.K., Bose, N.R., “Impact fatigue of glass fiber-vinylester resin composites”, **Composites: Part A** **32**, 871-876, (2001).
8. Tai, N.H., Yip, M.C., Lin, J.L., “Effects of low-energy impact on the fatigue behavior of carbon/epoxy composites”, **PII S0266-3538**, 00075-4, (1997).
9. Kawaguchi, T., Nishimura, H., Ito, K., Sorimachi, H., Kuriyama, T., Narisawa, I., “Impact fatigue properties of glass fiber-reinforced thermoplastics”, **Composites Science and Technology** **64**, 1057–1067, (2004).
10. Sanchez-Saez, S., Barbero, E., Zaera, R., Navarro, C. ” Compression after impact of thin composite laminates”, **Composite Science and Technology** **65** (2005) 1911-1919.
11. Dear, J.P., Brown, S.A., “Impact damage processes in reinforced polymeric materials”, **Composites: Part A** **34** (2003) 411-420.
12. Shyr, T. W., Pan, Y.H., “Impact resistance and damage characteristics of composite laminates”, **Composite Structures** **62**, 193–203, (2003).