

TERMAL ÇEVİRİMLERE MARUZ BIRAKILMIŞ POLİMER KOMPOZİTLERİN DÜŞÜK ENERJİLİ TEKRARLI DARBELER ALTINDAKİ DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

**Onur ÇOBAN¹, Mustafa Özgür BORA¹, Tamer SINMAZÇELİK^{1,2},
İsmail CÜRGÜL¹**

¹ Kocaeli Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Veziroğlu Kampüsü, 41040,
İzmit, TÜRKİYE

² TÜBİTAK-MAM, Malzeme Enstitüsü, P.K.21, 41470, Gebze, TÜRKİYE

ÖZET

Uçak ve havacılık uygulamalarında kullanılan polimer kompozitler uçuşlar esnasında gövde sıcaklıklarının -60 ile 150 °C ler arasında değişmesi nedeniyle termal çevrimlere maruz kalmaktadırlar. Bu özellikle malzemelerin içerisinde mikro çatlaklar ve ara yüzey deformasyonları ve katmanlar arası delaminasyonlara neden olmaktadır. Bunun yanı sıra bu malzemelerden yapılan parçalar kullanım ve bakım süreçlerinde düşük enerjili darbelerle maruz kalmaktadırlar. Termal çevrimlere maruz kalmış malzemelerin tekrarlı darbelerle karşı dayanımları bu nedenle bilinmesi gerekmektedir.

Bu çalışma kapsamında tek yönlü sürekli karbon fiber takviyeli PEI Kompozit malzemelere 0 °C -100 °C'lik dört farklı termal şok çevrimi, 50,200,500 tekrar sayısı ile uygulanmıştır. Termal çevrimlere tabi tutulan kompozit malzemelerin enstrumante edilmiş sarkaç tipli (Ceast -Resil 25) darbe test cihazı yardımıyla 0,54-0,94 J arasında değişen ardışık tekrarlı darbeler altındaki darbe-yorulma davranışları incelenmiştir. Çalışma kapsamında her biri 1 J den daha küçük olan farklı büyüklüklerdeki darbeler numuneye 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, termal yorulma, darbe-yorulması, fraktografi

LOW VELOCITY REPEATED IMPACT BEHAVIOUR INVESTIGATION OF TERMAL AGED POLYMER COMPOSITES

ABSTRACT

During flight, polymer composites which are used in aerospace and aeroplane applications are subjected to thermal cycles because of changing body temperature between -60 to 150 °C. This may cause micro-cracks, deformations of interphase and interlaminar

delaminations. On the other hand, tools which are made of polymer composites are subjected to low energy repeated impacts during maintenance and service life. Endurance of repeated impacts of termal aged polymer composites must be investigated.

In this study continuous carbon fiber reinforced polyetheremide (PEI) composites were subjected to three different kind of termal shock which had 50,200,500 number of cycles at 0 °C -100 °C. By using instrumented pendulum type Ceast Resil 25 impact test system, impact-fatigue behaviour of termal aged composite materials were investigated under various repeated impact at the range of 0,54-0,94 J. In the experiments, impact energies that were lower than 1 J were applied to specimen at impact numbers up to fracture. During the impact-fatigue, elastic and plastic deformations in material, absorbed elastic and plastic energies at each impact and total impact number to fracture the material were evaluated. By using optic and scanning electron microscope damage analysis of deformed materials were investigated.

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

1.GİRİŞ

Polimer kompozit malzemeler endüstriyel uygulamalarda yaygın bir şekilde kullanılmaktadırlar. Havacılık endüstrisinde uçak gövde malzemesi olarak sürekli karbon fiber takviyeli polieterimid kompozit malzemeler kullanılmaktadır. Uçağın uçuşu sırasında farklı yüksekliklerde gövde sıcaklığı yaklaşık -60 °C' ye kadar düşmektedir. Bununla birlikte iniş esnasında gövde sıcaklığı 100 °C ve üzerine çıkabilmektedir. Bu ani sıcaklık değişimleri uçak gövde malzemesi polimer kompozitleri yakından etkilemektedir. Kompozit malzemedeki bu ani sıcaklık değişiminin malzemenin darbe davranışlarında değişimlere neden olacağı beklenmektedir.

Literatür araştırmalarına göre termal şok sonucu polimer kompozitlerin darbe davranışlarında düşüş gözlemlenmiştir [1-4]. Abedian ve Szyszkowski [5] kompoziti oluşturan bileşenlerin (fiber-matris) birbirinden bağımsız genleşmelerinin dikkate alınması gerektiğini, matrisin fiberden daha fazla genleştiğini ifade etmişlerdir. Fiber ve matris birbirine bağlı halde olmazsa sıcaklık değişimleri esnasında termal genleşme katsayılarına bağlı olarak serbestçe radyal ve eksenel yönde genleşeceği veya büzüleceğini, fiber ve matrisin birbirine bağlı olması halinde ise termal çevrimin soğutma prosesi esnasında modelin eksenel yönde çekme gerilmesine maruz kalacağı görülmüştür [6]. Bireysel olarak matris ve takviye fiberi yalnız başlarına iyi çevresel dayanım sağlamalarına rağmen, suyun; matrisi, takviye fiberini ve fiber/matris ara yüzeyini etkileyerek polimer kompozitin performansını düşürdüğü görülmüştür [7]. Yüksek sıcaklıklardaki yüksek nem oranı etkisiyle hem zincir bağları kopacağından hem de T_g düşeceğinden kırılma deformasyonları görülme olasılığının artacağı söylenebilir [8]. Su emiliminin PEI matrisi ve fiber/matris ara yüzeyinin bozulması sonucu tabakalar arası kayma dayanımını düşürdüğü rapor edilmiştir [9].

Termal çevrim sonrasında yüksek sıcaklıkta çapraz katlı karbon fiber takviyeli polimer AS4/PEEK malzemesinde matris çatlağı görüldüğü ve hasarın gelişiminin modellendiği rapor edilmiştir. Tüm katmanlarda, -196–250 °C çevriminde matris çatlağı yoğunluğunun,

0° katmanlarına göre 90° katmanlarında yaklaşık olarak iki kat fazla olduğu belirtilmiştir [10]. Darbe etkileyen levha yüzeyine bir kevlar veya hibrit tabakası birleştirilerek oluşturulan plakaya ve üç kat karbon fiber katlı kompozit plakaya -50 °C ila 120 °C arasındaki sıcaklıkta 15,25 ve 45 J'lük enerji seviyelerinde düşük hızlı darbeler uygulanmıştır. Maksimum darbe enerjisi, darbe performansı araştırılmış, ve darbe testlerinden sonra kalan basma dayanımlarını belirlemek için basma deneyleri uygulanmıştır [11].

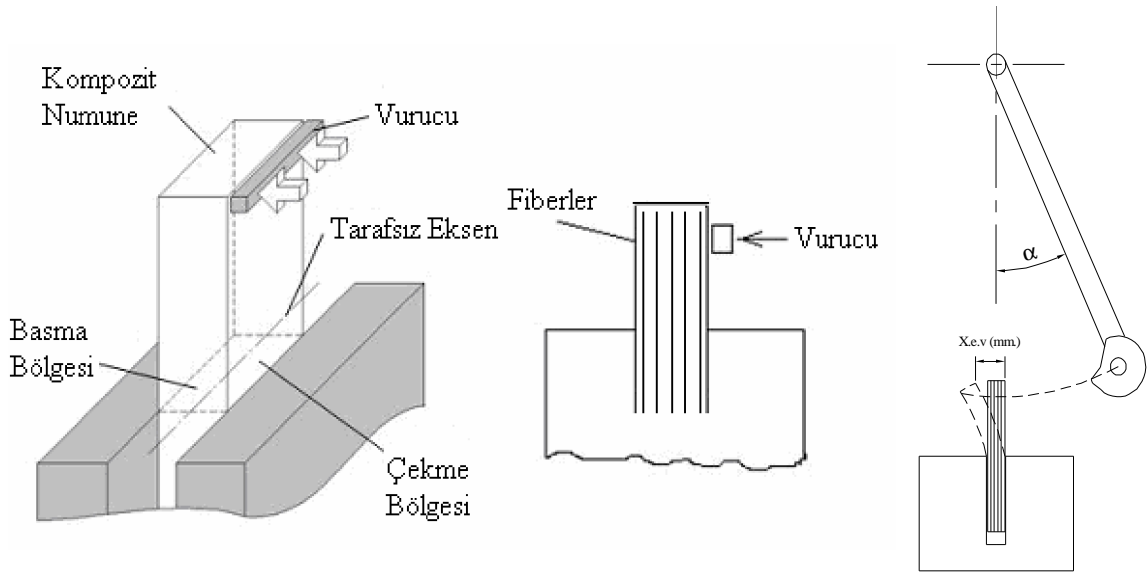
Bu çalışmada, termal yaşlandırılmış tek yönlü karbon fiber takviyeli polieterimid (PEI) kompozit malzemelerin enstrumante edilmiş Ceast sarkaç tipli (Resil 25) test cihazı yardımıyla 0,54-0,94 J arasında değişen düşük enerjili darbe-yorulma davranışları incelenmiştir. Termal yaşlandırmanın etkisini daha net gösterebilmek amacıyla işlem görmemiş tek yönlü karbon fiber takviyeli polieterimid numunelerle karşılaştırma yapılmıştır. Darbe test numunelerinin kırılan yüzeyleri taramalı elektron mikroskobu (TEM) yardımıyla fotoğraflandırılmış; çatlak başlangıcı ve ilerleyiş mekanizmaları incelenmiştir.

2.DENEYSEL YÖNTEMLER VE MALZEME

Deneyleerde 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/m² ve kalınlığının 0,14 mm olan 14 tabakadan oluşmaktadır. Plakanın ticari kodu CD5150'dir.

Termal çevrim deneyleri kaynar su ve buzlu su içeren iki ayrı tank yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Deneyler esnasında kaynar su tankının sıcaklığı 100°C'de, buzlu su tankının sıcaklığında 0 °C'de sabit tutulmuştur. Üç farklı termal çevrim numunelere uygulanmıştır bunlar sırasıyla 50, 200 ve 500'dür. Her termal çevrimde sıcaklık nedeniyle deforme olmayan numune tutucusuna yerleştirilen 10 adet numune ilk önce 5 sn kadar kaynar suya daldırılmıştır. Bu işlemde hemen sonra numuneler kaynar su tankından çıkartılıp hızla 5 sn buzlu su tankına daldırılmıştır. Bir çevrim yaklaşık olarak 10 sn sürmüştür. Termal çevrimlerden sonra numunelerde oluşan etkileri incelemek amacıyla enstrumante edilmiş darbe testi uygulanmıştır.

Deneyleer Ceast firmasının Resil 25 model sarkaç 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. Numunelerin cihaza yerleştirilme şekli şematik olarak Şekil 1'de verilmiştir.

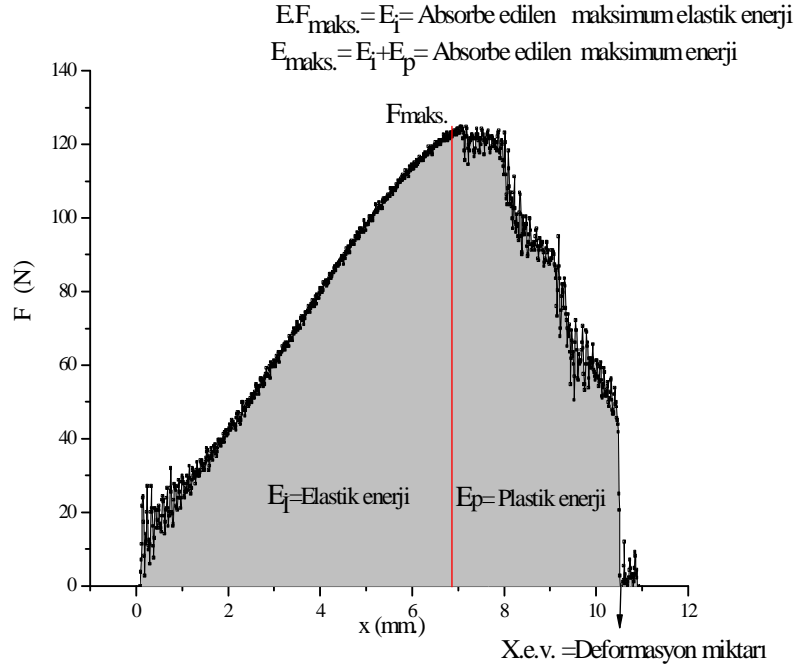


Şekil 1 Çentiksiz izod numunesinin sarkaç tipi Ceast Resil 25 test cihazına yerleştirilmesi

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 sağlanmıştır. 0,54 J değerine kadar olan darbelere malzeme yine elastik tepki vermiştir. 0,57 J enerjili darbeye malzeme plastik tepki vermiştir. Bu nedenle başlangıç darbe enerjisi olarak tamamen elastik deforme 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. 10 farklı darbe enerjisi seçilmiştir bunlar sırasıyla 0,54, 0,57, 0,61, 0,65, 0,69, 0,73, 0,77, 0,81, 0,90, 0,94 J'dür.

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 Deneysel olarak 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. F_{maks} değeri her bir darbe de ulaşılan en yüksek kuvvet değeridir. X.e.v. değeri ise numunede her bir darbeye oluşan maksimum deformasyon miktarıdır.

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

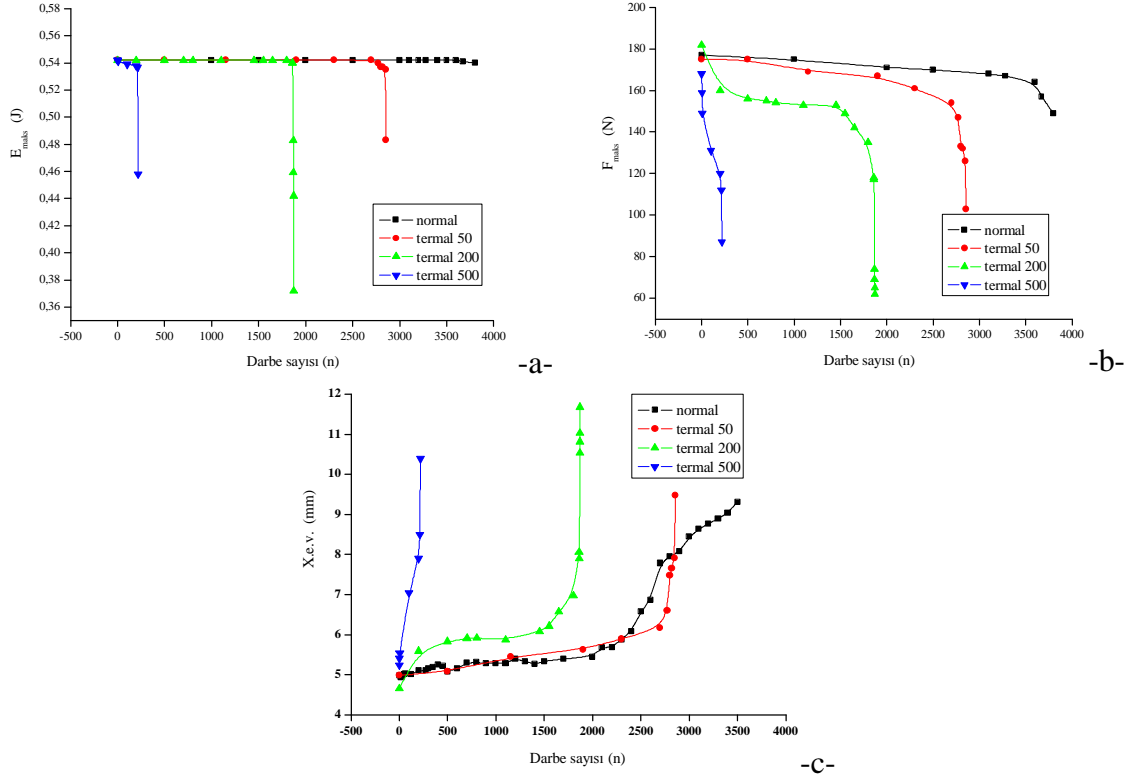
Termal çevrime tabi tutulmuş numuneler kırılıncaya kadar darbe-yorulma deneyine maruz bırakılmıştır. Çizelge 1’de 10 farklı darbe enerjisinde gerçekleştirilen darbe-yorulma deneylerinde numuneleri kırmak için gereken darbe tekrar sayısının karşılaştırılması gösterilmektedir. Sonuçlardan birbirleriyle uyumsuz gibi görünen yani standart sapması yüksek olan datalarda bulunmaktadır. Bunlar yorumlara katılmamaktadır yani ihmal edilmektedir. Çizelgedeki sonuçlara göre termal yaşlandırılmış numunelerin darbe-yorulma deneylerinde hasara uğramaları için gerekli darbe tekrar sayıları normal numunelerinkine göre düşüş gösterdiği gözlemlenmiştir. Ayrıca termal çevrim sayısı arttırıldıkça yine hasar için gerekli darbe tekrar sayısı azalmaktadır. Belirli sayıdaki termal çevrim için darbe-yorulma deneylerinde darbe enerjisi arttırıldıkça hasar için gerekli darbe tekrar sayısının azaldığı söylenebilir.

Çizelge 1. Termal çevrimlerle yaşlandırılmış numuneler ile normal numuneler için darbe enerjisine bağlı olarak değişen kırılma için gerekli darbe tekrar sayılarının karşılaştırılması

| Darbe Enerjisi (J) | Normal Numuneler (n) | 50 Termal Çevrim (n) | 200 Termal Çevrim (n) | 500 Termal Çevrim (n) |
|--------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 0,54 | 3580 | 2856 | 1873 | 218 |
| 0,57 | 829 | 825 | 804 | 364 |
| 0,61 | 473 | 961 | 396 | 428 |
| 0,65 | 382 | 334 | 295 | 195 |
| 0,69 | 208 | 24 | 180 | 174 |
| 0,73 | 122 | 115 | 92 | 91 |
| 0,77 | 80 | 60 | 38 | 19 |
| 0,81 | 66 | 67 | 42 | 30 |
| 0,90 | 43 | 34 | 13 | 12 |
| 0,94 | 21 | 19 | 6 | 10 |

Termal yorulma sonucu kompozit malzemelerdeki mekanik özelliklerin düşüşü farklı bileşenlerin farklı genleşme katsayılarına sahip olmaları esasına dayanmaktadır. Farklı termal genleşme katsayıları sonucu malzemeler farklı oranlarda genleşmeye çalışacaklarından malzemeler arasında gerilmeler oluşacaktır. Farklı bileşenler arasında oluşan iç gerilmelerde malzemenin mekanik özelliklerini düşürmektedir. Örneğin 0,54 J darbe enerjisine sahip darbe ile gerçekleştirilen deneylerin sonuçlarına bakılacak olursa, işlem uygulanmamış numune 3580 darbe tekrar sayısından sonra kırılırken, 50 termal çevrim uygulanan numune 2856, 200 çevrim uygulanan numune 1873 ve 500 çevrim uygulanan numune 218 darbe tekrar sayısında kırılmıştır. Bu sonuç termal çevrim sayısının artmasıyla matris ve fiberin farklı termal genleşmeleri sonucunda numunenin daha düşük darbe tekrar sayısında hasara uğradığını göstermektedir. Şekil 3'te 0,54 J darbe enerjisi için $E_{maks.}$, $F_{maks.}$, X.e.v. grafiklerinin normal numuneler ile termal yaşlandırılmış numuneler için karşılaştırılması gösterilmiştir.

Şekil 3-a'da termal yaşlandırılmış numunelerin ve normal numunelerin darbe-yorulma deneyleri sonrası verileri ile çizdirilen E_{maks} grafiklerinde iki ayrı bölgenin oluşumu görülmektedir. Birinci bölgede belirli bir darbe sayısına kadar maksimum absorbe edilen enerji değişiminin yaklaşık olarak sabit kaldığı yerdir. Bunun nedeni olarak, F_{maks} -tekrar darbe sayısı eğrilerindeki (Şekil 3-b) ilk iki bölgede gerekli olan enerjinin sabit kaldığı gözlenmiştir. E_{maks} değerlerinin ikinci bölgedeki ani düşüşü ile, F_{maks} eğrilerinin üçüncü bölgelerindeki düşüşün yaklaşık olarak aynı tekrar sayısında meydana geldiği görülmüştür. Buna göre, bu bölgede matris ve tabakalar arası ayrılma hasarlarından sonra fiberlere gelen yükün artmasıyla fiberlerin dayanamayıp absorbe edilen darbe enerjisi nedeniyle kırıldıkları belirtilmektedir. Termal yaşlandırılmış numunelerin E_{maks} grafikleri normal numunelerin E_{maks} grafiklerinden daha eğimlidir. Termal çevrim sayıları artırıldıkça grafiğin eğiminin daha da arttığı gözlemlenmiştir.

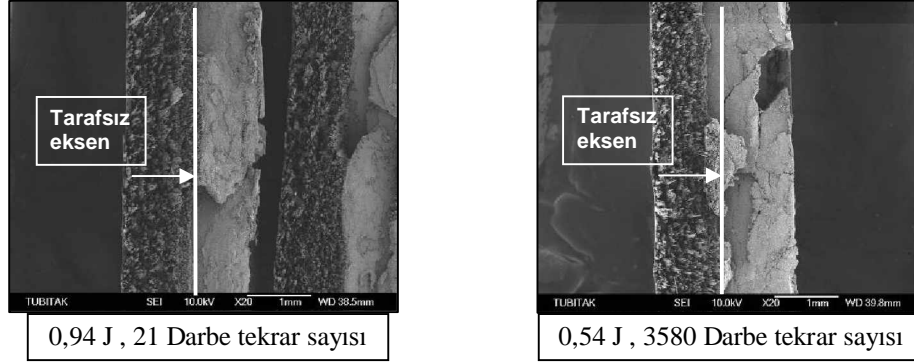


Şekil 3. 0,54 J Darbe enerjisi için E_{maks} , F_{maks} , X.e.v. grafiklerinin normal numuneler ile termal numuneler için karşılaştırılması

Normal numunelerin F_{maks} grafiklerinde olduğu gibi termal yaşlandırılmış numunelerin F_{maks} grafiklerinde de üç ayrı bölge görülmüştür (Şekil 3-b). Birinci bölgenin belirli bir darbe sayısına kadar F_{maks} değerlerinde hızlı bir düşüşün olduğu ve darbe etkisi ile basma bölgesinde ilk fiber hasarlarının olduğu bölgedir. İkinci bölge “plato” bölgesi olarak adlandırılmaktadır ve birinci bölgede tekrarlı darbe yüklemesi nedeniyle oluşan matris çatlaklarının birleşerek ilerlediği, fiber-matris ara yüzeyinin soyulduğu, tabakalar arasında oluşan tabakalar arası ayrılmaların büyüdüğü ve yenilerinin olduğu bölgedir. Üçüncü bölgede ise artan tekrarlı darbe sayısı ile matris-fiber ara yüzeyinde oluşan tabakalar arası ayrılmalar nedeniyle yeterince desteklenmeyen fiberlere gelen yük miktarının arttığı ve fiberlerin dayanamayıp hızla kırıldığı görülmüştür. Termal yaşlandırılmış numunelerin grafikleri normal numuneninkilere göre daha eğimlidir. Eğimin fazla olması artan darbe tekrar sayısı ile her darbeye ulaşılan en yüksek kuvvetin azalmasını anlatmaktadır. Termal çevrim sayısı arttıkça hasar için gerekli darbe tekrar sayısının azalmış olduğu ve ilk darbelerde ulaşılan en yüksek kuvvet değerlerinin de azaldığı görülmektedir.

Normal numunelere karşı termal yaşlandırılmış numunelerin daha hızlı hasara uğradığını Şekil 3-c’de gösterilen deformasyon miktarı (X.e.v.) grafiklerinden daha net görülmektedir. Bu grafikteki eğrilere göre termal çevrim sayısı arttırıldıkça deformasyon miktarı hızlanmaktadır sonuç olarak eğim artmaktadır. Termal yaşlandırılmış numunelerin deformasyon grafiklerinde F_{maks} grafiklerinde olduğu gibi yine 3 ayrı bölge gözümüze

çarpmaktadır. Birinci bölge için fiberlerde basma nedenli burkulma ve kayma hasarları olduğu bölgedir. Normal numunelerle yapılan deneylerde deformasyonlar yavaş olurken termal çevrim yapılmış numuneler ile yapılan deneylerde hızlı (az tekrar sayısında) olduğu görülmüştür. İkinci bölge ise ağırlıklı olarak matris çatlaklarının ilerlediği ve tabakalar arası ayrılmaların arttığı belirtilmişti. Fiber kırılmalarının olmadığı bu bölgede deformasyonlarda düşük olmaktadır. Üçüncü bölgede ise fiberler darbelere daha fazla dayanamayıp hasara uğramaktadırlar.

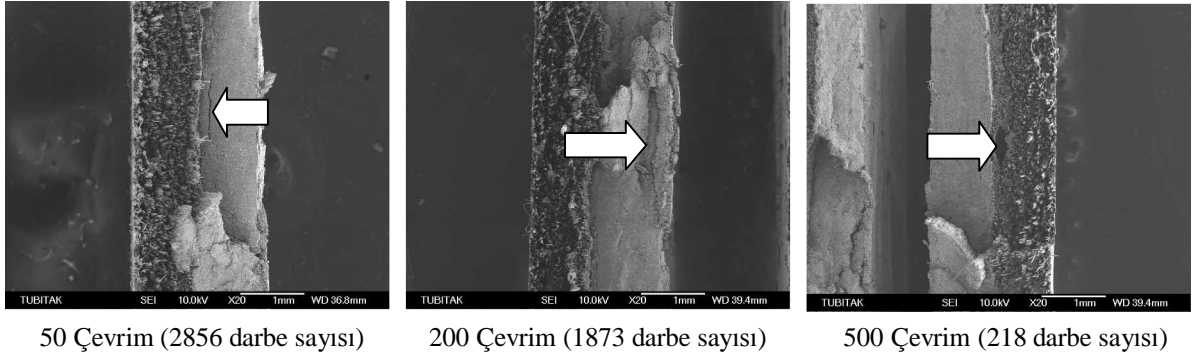


Şekil 4. Farklı enerji seviyelerinde gerçekleştirilen darbe-yorulma deneylerinden sonra normal numunelerin kırılan yüzey kesitleri

Hem termal yaşlandırma hem de darbe etkilerini araştırmak üzere malzemelerin taramalı elektron mikroskobu ile mikroyapı fotoğrafları taramalı elektron mikroskobu (JOEL JSM-6335F TEM) ile çekilmiştir. Fotoğrafları çekilen yaşlandırılmış ve normal numunelerin darbe ve termal etki sonucu kırılma kesitleri ve deformasyon durumları mikroskobik olarak incelenmiştir ve karşılaştırılmıştır.

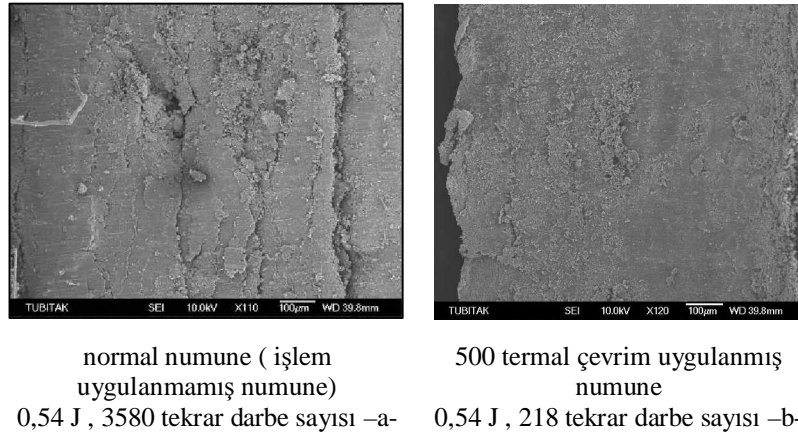
Şekil 4'te işlem uygulanmamış normal numunelere 0,54 ve 0,94 J darbe enerjileriyle yapılan darbe-yorulma deneylerinin kırılan kesitlerinin mikroyapı fotoğrafları gösterilmiştir. Darbe testi esnasında numunede oluşan çekme ve basma bölgelerini belirgin bir şekilde ayıran ve beyaz çizgi ile gösterilmiş tarafsız eksen bulunmaktadır. 0,94 J ile yapılan darbe-yorulma deneyinde çekme/basma alanının oranı 1 iken 0,54 J darbe enerjisi ile gerçekleştirilen deneyde bu oran 0,65 olarak bulunmuştur. Darbe-yorulma yüklemesi esnasında tarafsız eksenin basma bölgesinden çekme bölgesine doğru kaydığı, numunenin basma dayanımının çekme dayanımına göre daha az olduğunu göstermektedir.

Şekil 5'te farklı sayılarla termal çevrime maruz kalıp darbe-yorulma deneyine tabi tutulan malzemelerin kırılan kesitlerinin mikro fotoğrafları gösterilmiştir. Fotoğraflar incelendiğinde termal çevrim sayısının artmasıyla orantılı olarak, kompozit malzemeyi oluşturan bileşenlerin genişleme katsayıları arasındaki farklılıktan dolayı iç gerilmenin artmasıyla kırılan kesitlerdeki tabaka ayrılması hasarlarının arttığı görülmüştür ve bu hasarlar oklar yardımıyla gösterilmiştir.



Şekil 5. Farklı sayılarla termal çevrime maruz kalıp darbe-yorulma deneyine tabi tutulan malzemelerin kırılan kesitlerinin genel görünümlü mikro fotoğrafları.

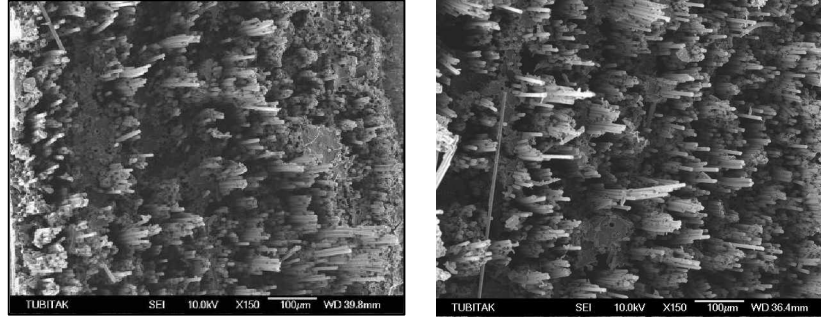
Mikroyapı fotoğrafları incelendiğinde termal çevrim numunede oluşan deformasyon miktarını arttırmaktadır. Bunun nedeni fiber ve matris malzemelerinin farklı termal genleşme katsayılarına sahip olmalarından kaynaklanmaktadır. Numunelerde oluşan delaminasyon bölgeleri Şekil 5'teki beyaz okla belirtilmiştir. Delaminasyonlar malzeme içerisinde artık gerilmelere neden olmaktadır. Artan termal çevrim sayısı ile artık gerilme miktarı artmıştır. Bu da numunelere uygulanan termal çevrim sayısının artmasıyla daha az darbe tekrar sayısı ile hasara uğramasını göstermektedir.



Şekil 6. Kırılan yüzeylerin basma bölgelerinin mikrofotoğrafları

Şekil 6'da numunelerin kırılan yüzeylerinin basma bölgeleri gösterilmiştir. Normal numunenin basma bölgesi yüzeyi düz iken, 218 darbe tekrar sayısı ile kırılan 500 termal çevrim uygulanmış numunenin basma bölgesi yüzeyinin pürüzlü olduğu görülmektedir. Şekil 6-a'da gösterilen basma bölgesinde tekrarlı darbelerle oluşan delaminasyon izleri katmanların izafi hareketi nedeniyle kaybolmuştur. Darbe-yorulma yüklemesi esnasında çatlak yüzeyleri arasında bir kayma oluşmaktadır. Matristeki bu kaymanın sonucuyla ince katmanlı PEI (polyeteremid) reçine tüm basma bölge alanını kaplamıştır. Normal numune 500 termal çevrime tabi tutulmuş numuneye göre daha fazla darbe tekrar sayısında kırılmıştır.

Şekil 7’de numunelerin kırılan yüzeylerinin çekme bölgeleri gösterilmiştir. Termal çevrim nedeniyle numunenin iç yapısına su girer. Suyun emilimi ile matris şişer ve fiber/matris arayüzeyi zayıflar. Şekil 7-a’da fiber/matris arayüzeyinin Şekil 7-b’dekine göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Şekil 7-a’da gösterilen normal numunenin çekme bölgesindeki fiberler arayüzey dayanımının kuvvetli olması nedeniyle demetler halinde kırılırken, Şekil 7-b’de ise 500 termal çevrim sonucunda matrisin şişmesiyle arayüzey dayanımının azaldığı ve fiberlerin tek tek kırıldığı görülmektedir.



normal numune (işlem görmemiş)
0,54 J , 3580 tekrar darbe sayısı –a-

500 termal çevrim uygulanan
numune
0,54 J , 218 tekrar darbe sayısı –b-

Şekil 7. Kırılan yüzeylerin çekme bölgelerinin mikrofotoğrafları

4. SONUÇLAR

Termal yaşlandırmaya tabi tutulan sürekli karbon fiber takviyeli polieterimid (PEI) kompozit malzemesinin darbe-yorulma yüklemesi altındaki davranışı incelenmiştir. Termal şoka tabi tutulan numuneler hem normal numunelerle hem de farklı termal çevrim sayılarına maruz kalan numunelerle karşılaştırılarak incelenmiştir. Termal çevrim sayısı arttıkça hasar için gerekli darbe tekrar sayısının azaldığı ve ilk darbelerde ulaşılan en yüksek kuvvet değerlerinin düştüğü görülmüştür. Termal çevrim esnasında su emilimi nedeniyle matris şişmiş ve numune içerisinde artık gerilmeye neden olduğu görülmüştür. Termal yaşlandırma sonucunda malzemede rijitlik kaybı yaşanmış olup bununda malzemenin darbe-yorulma ömrünü azalttığı tespit edilmiştir. Darbe-yorulma testlerinden sonra yapılan fraktografik analiz yardımıyla termal yaşlandırmanın numuneyi kırılğan yaptığı ve bu nedenle daha düşük darbe tekrar sayılarında numunenin hasara uğradığı gözlemlenmiştir. Termal yaşlandırılmış numunenin basma ve çekme bölgeleri ile normal numunenin basma ve çekme bölgeleri ile karşılaştırılmıştır. Fiber/matris arayüzey dayanımının termal çevrim nedeniyle azaldığı ve termal çevrime tabi tutulmuş numunelerde fiber soyulma oranının arttığı tespit edilmiştir.

KAYNAKLAR

1. Go´mez-del Ri´o, 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).
2. Hancox, N.L., “Thermal effects on polymer matrix composites: Part 1. Thermal cycling”, **Materials and Design** **19**, 85-91, (1998).
3. Gao, S.L., Kim, J.K., “Cooling rate influences in carbon fibre/PEEK composites.Part 3:Impact damage performance”, **Composites: Part A** **32**, 775-785, (2001).

4. Baschek, G., Hartwig, G., Zahradnik, F., “Effect of water absorption in polymers at low and high temperatures”, **Polymer** **40**, 3433-3441, (1999).
5. Abedian, A., Szyszkowski, W., “Influence of the free surface on the thermal stresses in unidirectional composites”, **Composites Part A** **28A**, 573-579, (1997).
6. Yılmaz, T., “Polimer Matrisli Kompozitlerin Pim İle Yük Taşıma Özelliklerinin İncelenmesi”, Doktora Tezi, **Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Kocaeli, 1-52, (2006).
7. Hull, D., Clyne, T. W. “An Introduction to Composite Materials, **Cambridge University Press**, Cambridge, 1996.
8. Scheirs, J., “Compositional and failure analysis of polymers”, **Wiley**, ISBN: 0-471-62534-5, (2000).
9. Hussain, M., Niihara, K., “Control of water absorption and its effect on interlaminar shear strength of CFRC with Al₂O₃ dispersion”, **Materials Science and Engineering A Volume 272**, 264-268, (1999).
10. Kobayashi, S., Terada, K., Ogihara, S., Takeda, N., “Damage-mechanics analysis of matrix cracking in cross-ply CFRP laminates under thermal fatigue”, **Composites Science and Technology** **61**, 1735–1742, (2001).
11. Salehi-Khojin, A., Mahinfalah, M., Bashirzadeh, R., Freeman, B., “Temperature effects on kevlar/hybrid and carbon fiber composite sandwiches under impact loading”, **Composites Structures** **78**, 197-206, (2007).