KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

POLİMER KOMPOZİTLERDE ÇEVRESEL ETKELERİN DARBE YÜKLEMELERİ ALTINDAKİ DAVRANIŞLARINA VE KRILMA MORFOLOJİSİNE ETKİLERİ

YÜKSEK LİSANS

Makina Müh. Onur ÇOBAN

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 4 Haziran 2007
Tezin Savunulduğu Tarih: 12 Temmuz 2007

Tez Danışmanı	Üye	Üye
Doç.Dr.Tamer SINMAZÇELİK	Prof.Dr.İsmail CÜRGÜL	Prof.Dr.Fehim FINDIK
(.....)	(.....)	(.....)

KOCAELİ, 2007

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR

Günümüzde polimer kompozit malzemeler her türlü alanda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Polimer kompozit malzemelerin diğer malzeme türlerine göre birçok avantajı bulunmakla birlikte özellikle yüksek özgül dayanım (dayanım/yoğunluk) sahip olmaları nedeniyle havacılık endüstrisinde tercih edilen malzeme türüdür.

Sürekli fiber takviyeli polimer kompozitler havacılık endüstrisinde uçak malzemesi olarak kullanıldığından uçuşlar esnasında önemli ölçüde sıcaklık, nem, hızlı sıcaklık düşüş ve yükselmeleri, hava kirliliği, uv ışınımı vb. gibi çevresel şartlara maruz kalmaktadır. Bu çevresel şartlar kompozit malzemenin mekanik, dinamik ve termal özelliklerini önemli ölçüde etkilemektedir. Ayrıca uçak gövde malzemesi olarak kullanılan polimer kompozitler servis veya bakım koşullarında önemli boyutta deformasyon yaratmayacak kadar düşük enerjili darbelere maruz kalmaktadırlar. Bu düşük enerjili darbeler kısa vadede deformasyon yaratmazken uzun vadede tekrarlanan şekilde etkirse polimer kompozit malzemenin deformasyon hızını artırmaktadır.

Bu çalışmada polimer kompozitin hem çevresel şartlar hem de çevresel şartlar altında düşük enerjili tekrarlanan darbelere maruz kalması sonucu değişen mekanik, dinamik, fraktografik, termal ve darbe davranışı özellikleri incelenmiştir.

Çalışmalarımda engin bilgi birikimi ve tecrübesiyle yardımlarını esirgemeyen her türlü konuda bana örnek olan beni yönlendiren değerli hocam Prof. Dr. İsmail CÜRGÜL'e teşekkürlerimi bir borç bilirim. Makine Mühendisliği Bölüm Başkanı Prof. İbrahim UZMAN'a laboratuar gibi her türlü imkandan faydalanmamı sağladığı için teşekkür ederim. Dr. Taner YILMAZ'a, iş arkadaşım Ar. Gör. Mak. Müh. M. Özgür BORA'ya çalışmalarım sırasında vermiş oldukları destek nedeniyle teşekkürlerimi sunarım. Maddi manevi her konuda destek ve yardımlarını esirgemeyen beni cesaretlendiren başta aileme, akrabalarıma, İlknur UÇKUN'a ve yakın dostlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Kompozit ilave (ADD-ON) zırh ve koruma sistemleri teknolojisi geliştirme ve uygulamalar başlıklı DPT projesi kapsamında TÜBİTAK-MAM Malzeme Enstitüsünde yaptığımız çalışmalara olanak sağlayan başta Doç. Dr. Volkan GÜNAY olmak üzere enstitü yönetimi ve çalışanlarına teşekkür ederiz.

Bu çalışmanın ortaya çıkmasında büyük emeği olan, bana kılavuzluk eden ve sürekli cesaretlendiren danışmanım Doç. Dr. Tamer SINMAZÇELİK'e sonsuz şükran ve teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR i
İÇİNDEKİLER ii
ŞEKİLLER DİZİNİ iv
TABLOLAR DİZİNİ vii
SEMBOLLER ve KISALTMALAR viii
BÖLÜM 1. GİRİŞ 1
1.1 Kompozit Malzeme Tanımı 1
1.2. Tarihçe 2
1.3. Kompozit Malzemelerin Genel Özellikleri 4
1.4. Polimer Kompozit Üretiminde Kullanılan Malzemeler 6
1.4.1. Matris malzemeleri 6
1.4.2. Fiberler 6
1.4.2.1.Karbon fiberler 7
1.4.3. Kompozit malzemelerin sınıflandırılması 8
1.4.4. Kompozit malzemelerin kullanım alanları 9
1.4.5. Uçak yapılarında polimer kompozit malzeme kullanımı 10
1.4.6. Tez konusunun önemi ve içeriği 11
BÖLÜM 2. GENEL KISIMLAR 14
2.1. Literatür Araştırması 14
2.1.1. Polimer kompozitlerin hasar mekanizmaları 14
2.1.1.1. Soyulma (Debonding) 15
2.1.1.2. Tabakalar arası hasar 16
2.1.1.3. Fiber burkulması (Buckling) 17
2.1.1.4. Fiberin yerinden çıkması (Pull-out) 17
2.1.1.5. Fiber kırılması 19
2.1.1.6. Kompozitlerde çatlak oluşumu 19
2.1.1.7. Kompozitlerde mikro-çatlama 20
2.1.2. Kompozit malzemelere uygulanan yükleme çeşitleri ve malzemede oluşturdukları hasarlar 21
2.1.2.1. Çekme yüklemesi 21
2.1.2.2. Basma yüklemesi 22
2.1.2.3. Eğilme yüklemesi 22
2.1.2.4. Darbe yüklemesi 23
2.1.2.5. Yorulma yüklemesi 25
2.1.3. Tabakalı kompozit malzemelerde yorulma hasar mekanizması 26
2.1.4. Fiber takviyeli kompozitlerde darbe yorulması özellikleri 30
2.1.5. Polimer kompozitlerin hidrotermal davranışları 35
BÖLÜM 3. MALZEME VE YÖNTEM 44
3.1. Kullanılan Malzeme 44
3.1.1. Malzeme hakkında genel bilgiler 44
3.1.2. PEI malzemesinin özellikleri 44
3.1.3. Deneyde kullanılan kompozit malzeme hakkında bilgiler 45
3.2. Uygulanan Deneysel Yöntem ve Standartları 47

3.2.1. Darbe testi....47
3.2.1.1. Genel açıklamalar....47
3.2.1.2. İzod darbe deneyi (Çentiksiz izod)- ASTM D4812 VE ISO 180....48
3.2.2. Dinamik mekanik termal analiz (DMTA)- ASTM D4065, D4440, D5279....51
3.2.2.1. Genel açıklamalar....51
3.2.2.2. Camsı geçiş sıcaklığı....55
3.2.3. Klimatik yaşlandırma işlemi....56
3.2.4. Fraktografik inceleme....58
BÖLÜM 4. DENEYSEL SONUÇLAR....59
4.1 Sabit Enerjilerle Tekrarlı Darbelere Maruz Kalan Kompozitlerin Darbe Davranışlarının İncelenmesi....59
4.2. Sabit Enerjilerle Yapılan Darbe-Yorulma Deneyleri Sonucunda Hasara Uğrayan Kompozit Kesitlerinin Fraktografik Olarak İncelenmesi....73
4.3. Normal Numunelerin Karmaşık Enerjili Tekrarlı Darbelere Maruz Kalması Sonucu Kırılan Yüzeylerinin Fraktografik İncelenmesi....78
4.4 Tekrarlı Darbelere Maruz Kalan Klimatik Ortamda Yaşlandırılmış Numunelerin Darbe-Yorulma Davranışlarının İncelenmesi....80
4.5 Klimatik Ortamda Yaşlandırılmış Numunelerin Dinamik Termal Özelliklerinin İncelenmesi....91
4.6. Termal Şok İle Yaşlandırılmış Numunelerin Darbe Davranışlarının, Dinamik, Mekanik, Termal Özelliklerinin Ve Kırılma Yapılarının İncelenmesi....97
4.6.1 Termal şok ile yaşlandırılmış numunelerin darbe davranışlarının incelenmesi 97
4.6.2. Termal şok ile yaşlandırılmış numunelerin dinamik, mekanik ve termal özelliklerinin incelenmesi....107
4.6.3. Termal şok ile yaşlandırılmış PEI matrisli kompozit malzemenin kırılma morfolojisinin incelenmesi....112
4.6.4. Deneyler sonrası kırılan numunelerin yan kenarlarının görüntülenmesi ve incelenmesi....119
BÖLÜM 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER....121
5.1. Sonuçların Tartışılması....121
5.2. Öneriler....127
KAYNAKLAR....129
KİŞİSEL YAYINLAR....132
ÖZGEÇMİŞ....133

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. (a) Partikül, (b) Kısa fiber, (c) Sürekli fiber takviyeli kompozitler (Ateş, 2002) 2
Şekil 1.2. Malzemelerin dayanım / yoğunluk oranlarının tarihsel gelişimi (Ateş, 2002) 3
Şekil 2.1. Basit, tek yönlü fiber takviyeli kompozitin yükleme modlarının şematik gösterimi (Ateş, 2002)..... 14
Şekil 2.1.(Devamı) Basit, tek yönlü fiber takviyeli kompozitin yükleme modlarının şematik gösterimi (Ateş, 2002)..... 15
Şekil 2.2. Fiber/matris ara yüzeyinde soyulma mekanizması (Yılmaz, 2006)..... 16
Şekil 2.3. İki boyutlu çapraz katlı kompozitlerde hasar tipleri: (a) tabaka içi hasarı (b) tabakalar arası hasar (c) fiber yönüne dik tabaka içi hasar (Scheris, 2000) 16
Şekil 2.4. Basma yüklemesiyle fiberlerin burkulması (buckling) (Rakow ve Pettinger, 2006) 17
Şekil 2.5. Cam fiber takviyeli polimerde fiber soyulmasının TEM resmi (Roy ve diğ., 2001) 18
Şekil 2.6. Fiberlerin yerinden çıkma mekanizması (Scheris, 2000)..... 18
Şekil 2.7. Fiberde oluşan kırılma (Yılmaz, 2006)..... 19
Şekil 2.8. Kompozit tabakada oluşan mikro çatlaklar (Yılmaz, 2006) 20
Şekil 2.9. Kompozitlerde çekme hasarı; fiberlerin dizilişi, fiber-matris oranı, kullanılan fiber ve matris çifti, fiber hacim oranı gibi etkiler nedeniyle oluşan farklı kırılma yüzeyleri (Rakow ve Pettinger, 2006)..... 21
Şekil 2.10. Basma yüklemesi nedeniyle oluşan burkulma bantları (Rakow ve Pettinger, 2006) 22
Şekil 2.11. Eğilme yüklemesi nedeniyle hasara uğrayan kompozit malzemenin enine kesiti (Rakow ve Pettinger, 2006)..... 23
Şekil 2.12. Tabakalar arası ayrılma hasarı 24
Şekil 2.13. Kompozit plakada tabakalar arası ayrılma hatası (Rakow ve Pettinger, 2006) ... 24
Şekil 2.14. Fiber ve matris ara yüzeyindeki şeritlenme (Rakow ve Pettinger, 2006) 25
Şekil 2.15. Fiber kırılması/ara yüzey ayrılması, matris çatlağı ve kesme hatasını içeren tek yönlü kompozitlerdeki basit yorulma hasar mekanizmaları (Pantelakis ve Labeas, 2001) 27
Şekil 2.16. Fiberlere paralel yönde etkiyen yük altında tek yönlü kompozitler için tipik yorulma ömrü grafiği (Yılmaz, 2006) 28
Şekil 2.17. Malzeme eksenine göre "θ" açısı ile yüklenen tek yönlü kompozitin yorulma ömrü grafiği (Pantelakis ve Labeas, 2001)..... 29
Şekil 2.18. Cam fiber takviyeli polimer kompozitin yorulma darbe eğrisi (Roy ve diğ., 2001) 31
Şekil 2.19. Cam/Epoksi kompozitinin farklı darbe enerjilerindeki hasar eğrileri (Azouaoui, 2001) 32
Şekil 2.20. Sıcaklık değişimleri esnasında fiber/matris etkileşimini anlayabilmek için geliştirilen model (Yılmaz, 2006) 37
Şekil 2.20. (Devamı) Sıcaklık değişimleri esnasında fiber/matris etkileşimini anlayabilmek için geliştirilen model (Yılmaz, 2006) 38
Şekil 3.1. PEI malzemesinin kimyasal yapısı (Sınmazçelik ve Arıcı, 2006)..... 46
Şekil 3.2. Deneylerde belirtilen büyüklüklerin F-x grafiğinde sembolik olarak gösterimi.... 47
Şekil 3.3. İzod darbe test düzeneği (ASTM D 4812-06 , 2007)..... 48
Şekil 3.4. Çentiksiz izod numunesinin sarkaç tipi Ceast Resil 25 test cihazına yerleştirilmesi 50

Şekil 3.5. Numunesinin sarkaç tipi Ceast Resil 25 test cihazında çekiç darbesine maruz kalışı 50
Şekil 3.6. Dinamik mekanik ısıl analizler esnasında kullanılan üç nokta eğme testi düzeneği ve bu düzeneğe tespit edilmiş numune 52
Şekil 3.7. DMTA cihazı 52
Şekil 3.8. Depolama modülü EI, kayıp modül EII, dinamik modül E* ve kayıp faktör tan δ arasındaki dinamik mekanik ilişki 54
Şekil 3.9. Uygulanan frekans (f) değerinde sinüzoidal değişime sahip gerilme genliği (ε) ile gerilme (σ) arasındaki faz açısı, (δ), farkı 54
Şekil 3.10. Tipik DMTA diyagramı (Yılmaz, 2007) 56
Şekil 3.11. Klimatik kabinde gerçekleştirilen yaşlandırma işlemi programı 57
Şekil 4.1. Numunelerin tamamen elastik deformasyona uğradığı küçük enerjili darbeler (0.14, 0.24, 0.38, 0.54 J) 60
Şekil 4.2. Darbe-Yorulma deneyleri için gerçekleştirilen ön çalışma sonuçları (0.94,1.44, 2.01, 2.65 J) 61
Şekil 4.3. Normal numunenin darbe-yorulma ömür grafiği 62
Şekil 4.4. Her bir darbe enerjisi için F_{maks}-Tekrar darbe sayısı grafikleri 63
Şekil 4.4. (Devamı) Her bir darbe enerjisi için F_{maks}-Tekrar darbe sayısı grafikleri 64
Şekil 4.5. Her bir darbe enerjisi için E_{maks}-Tekrar darbe sayısı grafikleri 65
Şekil 4.5. (Devamı) Her bir darbe enerjisi için E_{maks}-Tekrar darbe sayısı grafikleri 66
Şekil 4.6. Her bir darbe enerjisi için $E.F_{maks}$-Tekrar darbe sayısı grafikleri 67
Şekil 4.6. (Devamı) Her bir darbe enerjisi için $E.F_{maks}$-Tekrar darbe sayısı grafikleri 68
Şekil 4.7. Her bir darbe enerjisi için X.e.v.-Tekrar darbe sayısı grafikleri 69
Şekil 4.7.(Devamı) Her bir darbe enerjisi için X.e.v.-Tekrar darbe sayısı grafikleri 70
Şekil 4.8. Her bir darbe enerjisi için çizilen üst üste eğriler 70
Şekil 4.8.(Devamı) Her bir darbe enerjisi için çizilen üst üste eğriler 71
Şekil.4.9. Yorulma deneylerindeki ilk vuruşlarda alınan verilerin toplu olarak gösterimi 72
Şekil 4.10. Normal numunenin 0.54 J ve 0.94 J darbe enerjileri ile darbe yorulma sonucu kırılan kesitlerinin ve 2.65 J darbe enerjisiyle tek darbede kırılan kesitinin genel görünümleri. 74
Şekil 4.11. Normal numunenin 0.54 J ve 0.94 J darbe enerjileri ile darbe yorulma sonucu kırılan kesitlerinin ve 2.65 J darbe enerjisiyle tek darbede kırılan kesitinin basma bölgelerinin görünümleri. 75
Şekil 4.12. 2.65 J değerindeki darbeyle tek vuruşta ve 0.54 J değerindeki darbe enerjisiyle darbe-yorulma sonucu kırılan kesitlerin tarafsız eksen bölgesi 76
Şekil 4.13. Normal numunenin 0.54 J ve 0.94 J darbe enerjileri ile darbe yorulma sonucu kırılan kesitlerinin ve 2.65 J darbe enerjisiyle tek darbede kırılan kesitinin çekme bölgelerinin görünümleri. 77
Şekil 4.14. Normal numunenin değişik enerjili tekrarlı darbelere maruz kalması sonucu kırılan yüzeyinin genel görüntüsü 79
Şekil 4.15. Her bir darbe enerjisiyle yapılan darbeli-yorulma için F_{maks}-Tekrar darbe sayısı grafikleri 82
Şekil 4.16. Her bir darbe enerjisiyle yapılan darbeli-yorulma için E_{maks}-Tekrar darbe sayısı grafikleri 84
Şekil 4.17. Her bir darbe enerjisiyle yapılan darbeli-yorulma için $E.F_{maks}$-Tekrar darbe sayısı grafikleri 85
Şekil 4.17. (Devamı) Her bir darbe enerjisiyle yapılan darbeli-yorulma için $E.F_{maks}$-tekrar darbe sayısı grafikleri 86
Şekil 4.18. Her bir darbe enerjisiyle yapılan darbeli-yorulma için X.e.v.-tekrar darbe sayısı grafikleri 87
Şekil 4.18.(Devamı) Her bir darbe enerjisiyle yapılan darbeli-yorulma için X.e.v.-tekrar darbe sayısı grafikleri 88
Şekil 4.19. Klimatik yaşlandırılmış ve normal numunenin deformasyon miktarlarının karşılaştırılması 88

Şekil 4.20. Her bir darbe enerjisiyle yapılan darbeli-yorulma için çizilen üst üste eğriler 89
Şekil 4.21. Klimatik ortamda yaşlandırılmış numunenin darbe-yorulma ömür grafiği 90
Şekil 4.22. Normal numunenin DMTA sonuçlarının grafiksel olarak gösterimi 91
Şekil 4.23. Klimatik ortamda yaşlandırılmış numunenin DMTA sonuçlarının grafiksel olarak gösterimi 93
Şekil 4.24. Klimatik ortamda yaşlandırılmış numuneler ile normal numunelerin dinamik mekanik termal analiz deneyi sonuçlarından depolama modülü eğrilerinin karşılaştırılması 94
Şekil 4.25. Klimatik ortamda yaşlandırılmış numuneler ile normal numunelerin dinamik mekanik termal analiz deneyi sonuçlarından kayıp modül eğrilerinin karşılaştırılması 95
Şekil 4.26. Klimatik ortamda yaşlandırılmış numuneler ile normal numunelerin dinamik mekanik termal analiz deneyi sonuçlarından tanδ eğrilerinin karşılaştırılması 96
Şekil 4.27. 0.54 J Darbe enerjisi için E.F_{maks}, E_{maks}, F_{maks}, X.e.v. grafiklerinin normal numuneler ile termal numuneler için karşılaştırılması 99
Şekil 4.28. 0.65 J Darbe enerjisi için E.F_{maks}, E_{maks}, F_{maks}, X.e.v. grafiklerinin normal numuneler ile termal numuneler için karşılaştırılması 103
Şekil 4.29. 0.73 J Darbe enerjisi için E.F_{maks}, E_{maks}, F_{maks}, X.e.v. grafiklerinin normal numuneler ile termal numuneler için karşılaştırılması 104
Şekil 4.30. 0.65 J ve 0.73 J darbe enerjileri için normal ve termal yaşlandırılmış numunelerin E_{maks} grafiklerinin karşılaştırılması 105
Şekil 4.31. 0.65 J ve 0.73 J darbe enerjileri için normal ve termal yaşlandırılmış numunelerin F_{maks} grafiklerinin karşılaştırılması 106
Şekil 4.32. 0.65 J ve 0.73 J darbe enerjileri için normal ve termal yaşlandırılmış numunelerin F_{maks} grafiklerinin karşılaştırılması 106
Şekil 4.33. Normal numunenin dinamik mekanik termal analiz sonucu eğrileri 107
Şekil 4.34. Farklı sayılardaki termal çevrimlerle yaşlandırılan numunelerin ve normal numunenin dinamik mekanik termal analiz sonuçlarından depolama modülü eğrilerinin karşılaştırılması 109
Şekil 4.35. Farklı sayılardaki termal çevrimlerle yaşlandırılan numunelerin ve normal numunenin dinamik mekanik termal analiz sonuçlarından kayıp modül eğrilerinin karşılaştırılması 110
Şekil 4.36. Farklı sayılardaki termal çevrimlerle yaşlandırılan numunelerin ve normal numunenin dinamik mekanik termal analiz sonuçlarından tanδ eğrilerinin karşılaştırılması 111
Şekil 4.37. Normal ve 1000 termal çevrime maruz kalmış numunenin 0.54 J darbe enerjisiyle darbe-yorulma sonucu kırılan kesitlerinin taramalı elektron mikroskobu yardımıyla çekilen fotoğrafları 113
Şekil 4.38. Farklı sayılarla termal çevrime maruz kalıp darbe-yorulma deneyine tabi tutulan malzemelerin kırılan kesitlerinin genel görünümlü mikro fotoğrafları. 115
Şekil 4.39. Farklı sayılarla termal çevrime maruz kalıp darbe-yorulma deneyine tabi tutulan malzemelerin kırılan kesitlerinin basma bölgelerinin mikro fotoğrafları..... 116
Şekil 4.39.(Devamı) Farklı sayılarla termal çevrime maruz kalıp darbe-yorulma deneyine tabi tutulan malzemelerin kırılan kesitlerinin basma bölgelerinin mikro fotoğrafları. 117
Şekil 4.40. Farklı sayılarla termal çevrime maruz kalıp darbe-yorulma deneyine tabi tutulan malzemelerin kırılan kesitlerinin çekme bölgelerinin mikro fotoğrafları. 118
Şekil 4.41. Deneyler sonrası kırılan numunelerin yan profilden genel görünümleri 119
Şekil 4.42. Deneyler sonrası kırılan numunelerin yan profillerinin ayrıntılı görünümleri... 120

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 1.1 Karbon ve Grafit Elyafların Karşılaştırılması (Yılmaz, 2006) 7
Tablo 3.1. PEI malzemesinin özellikleri (www.tencate.com) 45
Tablo 3.2. Sürekli karbon fiber takviyeli PEI kompozit malzemesinin mekanik özellikleri (Sınmazçelik ve Arıcı, 2006) 46
Tablo 3.3. ASTM ve ISO standartlarında belirlenmiş çentiksiz izod darbe testinde kullanılan test numunelerinin boyutu 49
Tablo 4.1. Normal numuneler için darbe enerjisine bağlı olarak değişen kırılma için gerekli darbe tekrar sayılarının karşılaştırılması 62
Tablo 4.2. Klimatik ortamda yaşlandırılmış numuneler için darbe enerjisine bağlı olarak değişen kırılma için gerekli darbe tekrar sayılarının karşılaştırılması 81
Tablo 4.3. Termal çevrimlerle yaşlandırılmış numuneler ile normal numuneler için darbe enerjisine bağlı olarak değişen kırılma için gerekli darbe tekrar sayılarının karşılaştırılması 98

SEMBOLLER ve KISALTMALAR

σ : Gerilme (kN/mm^2)
ε : Gerinim (mm)
E : Enerji (J)
E_{maks} : Her darbede absorbe edilen maksimum enerji (J)
$E.F_{maks}$: En büyük kuvvette absorbe dilen maksimum elastik enerji (J)
F_{maks} : Her darbede ulaşılan maksimum kuvvet (N)
X.e.v. : Her darbede ulaşılan en büyük deformasyon miktarı (mm)
n : Darbe tekrar sayısı
θ : Yükleme açısı
E^* : Kompleks modül (MPa)
$E^{'}$: Depolama (elastik) modülü (MPa)
$E^{''}$: Kayıp modül (MPa)
f : Frekans (f)
T : Sıcaklık (^oC)
Tanδ : Mekanik kayıp faktörü

Alt İndisler

i : Absorbe dilen maksimum elastik enerji (J)
p : Absorbe dilen plastik enerji (J)
g : Camsı geçişi
gA : Depolama modülüne göre camsı geçiş
gB : Kayıp modüle göre camsı geçiş
gC : Tanδ'ya göre camsı geçiş
m : Matrisin en düşük genleme sınırı
c : Malzemeyi hasara uğratacak üst genleme sınırı

Kısaltmalar

PPE : Polifenileter
PPS : Polifenilsülfid
PEI : Polieterimid
PEEK : Polietereterketon
PAN : Poliakrilonitril
DMTA: Dinamik mekanik termal analiz
Maks. : Maksimum

POLİMER KOMPOZİTLERDE ÇEVRESEL ETKİLERİN TEKRARLI DARBE YÜKLEMELERİ ALTINDAKİ DAVRANIŞLARINA VE KIRILMA MORFOLOJİSİNE ETKİLERİ

Onur ÇOBAN

Anahtar Kelimeler: Darbe-yorulma, polimer kompozit, termoplastik matris, kırılma morfolojisi.

Özet: Bu çalışmada normal polimer kompozit ile çevresel şartlara maruz kalan polimer kompozitin darbe-yorulma davranışları, dinamik, mekanik, termal özelliklerindeki değişimler ve kırılma morfolojileri incelenmiştir.

Sürekli Karbon Fiber Takviyeli Polieterimide (PEI) Kompozitinin 0.54–0.94 J arasında değişen düşük hızlı darbe enerjilerindeki darbe-yorulma davranışları incelenmiştir. Malzemenin darbe-yorulma sonucu kırılan kesiti Taramalı Elektron Mikroskobunda incelenmiştir.

Klimatik ortamda yaşlandırılmış polimer kompozitin darbe-yorulma davranışları 0.54–0.94 J arasında değişen düşük hızlı darbe enerjilerindeki tekrarlı darbelerle incelenmiştir. Ayrıca klimatik etki sonucu malzemedeki termomekanik özelliklerin değişimleri de dinamik mekanik termal analiz ile incelenmiştir.

Termal yaşlandırmaya maruz kalan polimer kompozitin darbe-yorulma davranışları 0.54–0.94 J arasında değişen düşük hızlı darbe enerjilerindeki tekrarlı darbelerle incelenmiştir. Termal yaşlandırma sonucu termal özelliklerin değişimleri de dinamik mekanik termal analiz cihazı ile incelenmiştir. Termal yaşlandırılan malzemenin darbe-yorulma sonucu kırılan kesiti Taramalı Elektron Mikroskobunda incelenmiştir.

THE EFFECTS OF ENVIRONMENTAL EFFECTS ON IMPACT FATIGUE BEHAVIOUR OF THE POLYMER COMPOSITES

Onur ÇOBAN

Keywords: Impact-fatigue, polymer composite, thermoplastic matrix, fracture morphology

Abstract: In this study, impact-fatigue behavior, variations of dynamic, mechanic, thermal properties and fracture morphologies of original polymer composite and polimer composites which were exposed to environmental conditions were investigated.

Impact fatigue behavior of unidirectional carbon fiber reinforced PEI composites were investigated by low velocity repeated impact loadings at the energy levels ranging between 0.54 – 0.94 J. After impact fatigue the fractured cross section of original composite were investigated by Scanning Electron Microscope (SEM).

Impact fatigue behavior of climatic aged unidirectional carbon fiber reinforced PEI composites were investigated by low velocity repeated impact loadings at the energy levels ranging between 0.54 – 0.94 J. Beside this, variation of thermo-mechanical properties of the material after climatic aging were investigated by dynamic mechanic thermal analysis.

Impact fatigue behavior of thermal aged polyetherimide (PEI) matrix composites were investigated by low velocity repeated impact loadings at the energy levels ranging between 0.54 – 0.94 J. Beside this, variation of thermo-mechanical properties of the material after thermal aging were investigated by dynamic mechanic thermal analysis. After impact fatigue the fractured cross section of thermal aged composite were investigated by Scanning Electron Microscope (SEM).

BÖLÜM 1. GİRİŞ

1.1 Kompozit Malzeme Tanımı

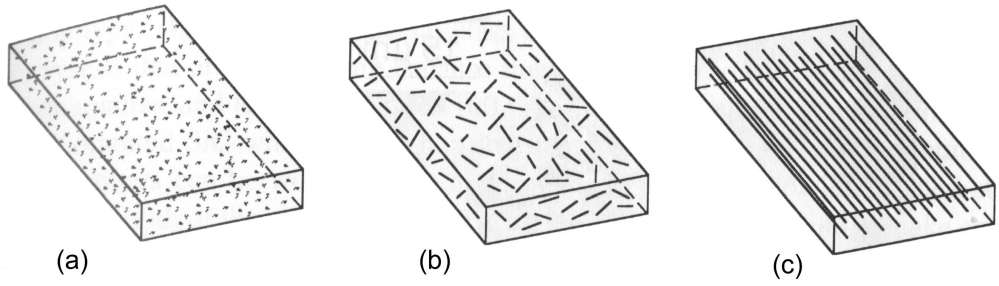
Genel olarak kompozit malzeme fiziksel ve kimyasal özellikleri farklı olan iki veya daha fazla malzemenin bir araya gelerek oluşturduğu bileşenlerinden daha iyi fiziksel ve mekanik özelliklere sahip olan malzemelerdir. Burada amaç tatmin edici olmayan özelliklere sahip iki farklı bileşeni birleştirilerek daha iyi özelliklere sahip yeni bir karma malzeme oluşturmaktır.

Kompozit malzemede genelde iki koşul aranmaktadır:

— Kimyasal bileşimleri birbirinden farklı, belirli ara yüzeylerle ayrılmış en az iki malzemenin bir araya getirilmiş olması,

— Kompoziti oluşturan malzeme bileşenlerinin birbirleri ile reaksiyona girmemesi veya alaşım oluşturmaması

Bu koşullara göre malzeme, mikroskobik açıdan heterojen bir malzeme özelliği göstermekte, ancak makroskobik açıdan homojen bir malzeme gibi davranmaktadır. Kompozit malzemeler iki veya daha fazla sayıda bileşenden oluşurlar. Kompozit malzemeler genelde hacmen malzemenin büyük kısmını oluşturan ve yapının genel özelliklerini karakterize eden "matris" malzemesi ve onun her türlü fiziksel, kimyasal özelliklerini iyileştirmek üzere yapı içine yerleştirilmiş "takviye edici faz"'lardan oluşur (Şekil 1.1).



Şekil 1.1. (a) Partikül, (b) Kısa fiber, (c) Sürekli fiber takviyeli kompozitler (Ateş, 2002)

1.2. Tarihçe

Malzemenin tarih içindeki gelişim, değişim ve çeşitlenme süreci incelendiğinde, saf ve doğal malzemenin kullanımdaki payının zamanla gitgide azaldığı, buna karşılık gelişen teknolojiyle birlikte, birden fazla malzemenin değişik tekniklerle bir araya getirildiği, amaca uygun özellikler taşıyan, bir anlamda kompozit malzemenin gitgide arttığı, yaygınlaştığı açıkça görülmektedir.

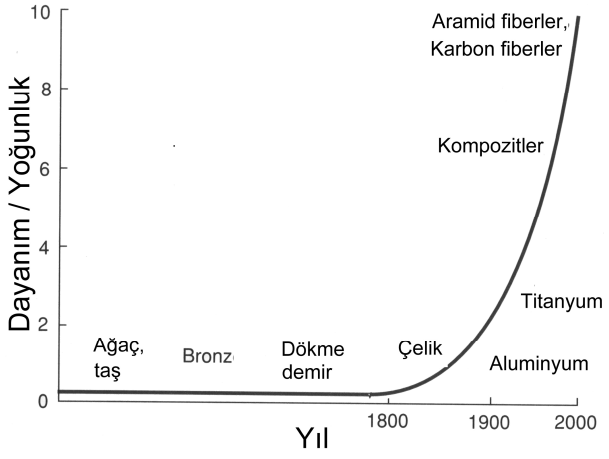
Hemen hemen her alanda çok yaygın bir kullanımı bulunan kompozit malzemelerin üretimi ve kullanımı son birkaç yüzyılda kendini gösteriyor olsa da ilk örnekleri çok eskilere dayanmaktadır. Kompozit malzeme kavramının ortaya atılması ve konunun bir mühendislik konusu olarak ele alınması ancak 1940'lı yılların başında gerçekleşmiştir. Çok bileşenli malzemenin ilk örnekleri, doğada bulunan malzemeye yapılan müdahalelerle onun kullanılır hale getirilmesiyle ortaya çıkmıştır.

İlk çağlardan beri insanlar kırılgan malzemelerin içine bitkisel veya hayvansal lifler koyarak bu kırılganlığın giderilmesine çalışmışlardır. Bu uygulamaya en iyi örneklerden biri kerpiç malzemedir. Kerpiç üretiminde killi çamur içine katılan saman, sarmaşık dalları gibi sap ve lifler, malzemenin gerek üretim, gerekse kullanım sırasındaki dayanımını artırmaktadır.

Fiberlerle takviye edilen sentetik reçineler 1950'li yılların ortalarından itibaren endüstride kullanılmaya başlanmıştır. Ülkemizde "fiberglass" diye tanınan bu malzeme 1960'lı yılların başından itibaren Türkiye'de sıvı depoları, çatı levhaları, küçük boyda deniz teknelerinin yapımı gibi alanlarda kullanılmıştır. Ülkemizde seri üretimi yapılmış ilk yerli otomobil olan "Anadol"'un kaportası bu malzemeden üretilmiştir (Yılmaz, 2006).

Şekil 1.2.'de tarih boyunca malzemelerin dayanım / yoğunluk oranları verilmektedir. Görüldüğü gibi 20. yüzyılda kompozit malzemelerin keşfiyle dayanım / yoğunluk oranında hızlı bir artış olmuştur. Bu da kompozit malzemelerinin havacılık gibi bazı kritik uygulamalarda gerekliliğini açıkça göstermektedir (Ateş, 2002).

Cam fiberleriyle takviye edilmiş sentetik polimer matrisli kompozit malzemeler için dilimize "Cam Takviyeli Plastik (CTP)" adı yerleşmiştir. Cam takviyeli plastiklerin üretiminde, en çok kullanılan malzeme olan polyesterin yanı sıra, günümüzde, diğer termoset ve termoplastik matrislerde kullanılmaktadır.



Şekil 1.2. Malzemelerin dayanım / yoğunluk oranlarının tarihsel gelişimi (Ateş, 2002)

1.3. Kompozit Malzemelerin Genel Özellikleri

Kompozit malzeme üretiminde genellikle aşağıdaki özelliklerden birinin veya bir kaçının geliştirilmesi amaçlanmaktadır. Bu özelliklerin başlıcaları,

— Mekanik dayanım, basınç, çekme, eğilme, darbe, burkulma, burulma ve kayma dayanımı,

— Yorulma dayanımı, aşınma direnci,

— Korozyon direnci,

— Kırılma tokluğu,

— Yüksek sıcaklığa dayanım, boyutsal stabilite,

— Isı iletkenliği veya ısıl direnç,

— Elektrik iletkenliği veya elektriksel direnç,

— Akustik iletkenlik, ses tutuculuğu veya ses yutuculuğu,

— Rijitlik,

— Ağırlık,

— Görünüm,

ve benzeri özellikler şeklinde sıralanabilir. Ayrıca malzemenin birim maliyetinin düşürülmesi de öncelikle düşünülmelidir.

Kompozit malzemelerin diğer malzeme türlerine göre birçok avantajı vardır. Bunlar,

-Aynı ağırlıktaki mukavemetleri metallere oranla çok yüksektir,

-Aynı yönlü aramid ve karbon fiber takviyeli epoksi kompozit malzemeler, çelik ve alüminyumdan yaklaşık 4-6 kat daha yüksek spesifik çekme dayanımına sahiptir,

-Aynı yönlü grafit takviyeli epoksi, çelik ve alüminyumdan yaklaşık 3,5-5 kat daha yüksek spesifik çekme dayanımına sahiptir,

-Yorulma dayanımı limitleri metallerden çok fazladır,

-Titreşim sönümleme özelliği metalik malzemelere göre çok yüksektir,

-Fiber takviyeli kompozitler çok yönlü kullanım kolaylıkları sağlar,

-Korozyona dayanım mükemmele yakındır,

-Kompozit parçaların daha az bağlantı elemanları gerektirmesi, bu elemanlardan kaynaklanan yapısal zayıflıkları en aza indirgemektedir,

-Darbeyi soğurma enerjileri metallerden önemli ölçüde fazladır,

-Düşük ısı iletkenliğine sahiptirler,

-Aşınmaya karsı dirençlidirler (bu özelliğinden dolayı özellikle frenlerde kullanılırlar)

-İyi bir görünüme sahiptir ve yeni tasarım esnekliği sunar,

-Diğer malzemelerle uyumludur,

-Kolay imal edilebilir ve yüksek üretim miktarlarına ulaşabilir,

-Uzun ömre ve iyi bir performansa sahiptirler.

Çok sayıda avantaja rağmen kompozit malzemelerin bazı dezavantajları da söz konusudur. Bunlar,

-Kompoziti oluşturan her bir bileşenin olumlu olumsuz tüm özellikleri nihai parçaya yansır (anizotropik),
-Yanma ve duman çıkarma özellikleri dezavantaj olarak değerlendirilmektedir,
-Hammaddenin pahalı olması. Uçaklarda kullanılabilecek kalitede karbon fiberden üretilen bir metrekarelik kumaşın maliyeti yaklaşık 50 $ 'dır.

-Lamine edilmiş kompozitlerin özellikleri her zaman ideal değildir, kalınlık yönünde düşük dayanım ve tabakalar arası düşük kayma dayanımı özelliği bulunmaktadır.

-Malzemenin özellikleri üretim yöntemlerinin detaylarına bağımlıdır.

-Malzemelerin sınırlı raf ömürleri vardır. Bazı tür kompozitlerin veya hammaddelerinin soğutularak saklanmaları gerekmektedir.

-Neme duyarlı bileşenlerin üretim öncesi kurutulmaları gerekmektedir.

Kompozit malzeme üretiminde çok farklı yöntemler kullanılmaktadır. Hepsinde değişmeyen temel ilke, bileşenlerin zayıf yönlerinin amaçlanan doğrultuda iyileştirilerek daha nitelikli bir yapının elde edilmesidir.

1.4. Polimer Kompozit Üretiminde Kullanılan Malzemeler

1.4.1. Matris malzemeleri

Kompozit yapılarda matrisin üç temel fonksiyonu vardır. Bunlar, fiberleri bir arada tutmak, yükü fiberlere aktarmak ve fiberleri çevresel etkilerden korumaktır. İdeal bir matris malzemesi başlangıçta düşük viskoziteli bir yapıda iken üretim esnasından daha sonra fiberleri sağlam ve uygun şekilde çevreleyebilecek katı forma kolaylıkla geçebilmelidir.

Polimer kompozit malzemelerin üretiminde kullanılan matris malzeme tipleri başlıca termoset ve termoplastikler olmak üzere iki ana gruba ayrılırlar. Yüksek mukavemet gerekmeyen durumlarda en sık kullanılan matris malzemesi polyester reçinesidir. Gelişmiş kompozitlerin üretiminde ise yaygın olarak epoksi reçinesi kullanılmaktadır. Matris malzemelerinin iyileştirmesi çalışmaları özellikle yüksek sıcaklıkta kullanıma uygun ve düşük nem duyarlılığına sahip yapıların üretilmesi doğrultusundadır.

1.4.2. Fiberler

Matris malzeme içerisinde yer alan fiberler kompozit yapının temel mukavemet elemanlarıdır. Düşük yoğunluklarının yanı sıra yüksek elastik modüle ve dayanıma sahip olan fiberler kimyasal korozyona da dirençlidirler. Günümüzde kompozitlerin

takviye edilmesinde boyutsal ve şekilsel özellikleri çok farklı fiberler kullanılmaktadır.

Kompozitlerin takviye edilmesinde kullanılan fiberlerin E-Modülü değerleri, kullanılan matris malzemesinin E- modülü ile kıyaslandığında, matristen daha düşük yada yüksek E- modülü değerine sahip fiberler olmak üzere iki ana grupta toplanabilir. Dilimizde lif kelimesinin çoğulu olan "fiber" kelimesi daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Fiberlerin çapı ortalama 0,01 mm. mertebesindedir. Narinlik oranı 10000'e kadar çıkabilmektedir ($L/d \leq 10^4$). Fiberler değişik kaynaklardan elde edilmekte ve değişik özellikleriyle büyük çeşitlilik göstermektedir.

1.4.2.1.Karbon fiberler

Karbon fiber yoğunluğu 2.268 gr/cm^3 olan kristal yapıda bir malzemedir. Karbon fiberler cam fiberlerden daha sonra gelişen ve çok yaygın olarak kullanılan fiber grubudur. Hem karbon hem de grafit fiberler aynı orijinli malzemeden üretilirler.

Fiber imalatında genellikle poliakrilonitril (PAN) kullanılır. PAN bazlı fiberler 2413 ila 3102 MPa değerinde çekme mukavemetine sahiptirler ve maliyetleri düşüktür. Petrolün rafinesi ile elde edilen zift (PITCH) bazlı fiberler ise 2069 MPa değerinde çekme mukavemetine sahiptirler. Mekanik özellikleri PAN bazlı fiberler kadar iyi değildir ancak maliyetleri düşüktür (Yılmaz, 2006)

Tablo 1.1 Karbon ve Grafit Elyafların Karşılaştırılması (Yılmaz, 2006)

Özellik	Grafit	Karbon
Saflık (%)	99	93-95
İşlem Sıcaklığı (°C)	> 1700	< 1700
Elastite Modülü (GPa)	>345	<345

Karbon fiberlerin en önemli özellikleri düşük yoğunluğun yanısıra yüksek dayanım ve tokluk değerleridir. Karbon fiberler, nemden etkilenmezler ve sürünme mukavemetleri çok yüksektir. Aşınma ve yorulma dayanımları oldukça iyidir. Bu nedenle askeri ve sivil uçak yapılarında yaygın bir kullanım alanına sahiptirler.

Karbon fiberler çeşitli polimer matrislerle ve çok yaygın olarak epoksi reçinelerle kullanılırlar. Ayrıca karbon fiberler aluminyum, magnezyum gibi metal matrislerle de kullanılırlar.

1.4.3. Kompozit malzemelerin sınıflandırılması

a. Matris türüne göre kompozit malzemeler

a.1. Polimer Matrisli Kompozitler

a.1.1. termosetler

a.1.2. termoplastikler

a.1.3. elastomerler

a.2. Seramik Matrisli Kompozitler

a.3. Metal Matrisli Kompozitler

b. Takviye türlerine göre kompozit malzemeler

b.1. Fiber Takviyeli Kompozit Malzemeler

b.2. Partikül Takviyeli Kompozit Malzemeler

c. Katman sayısına göre kompozit malzemeler

c.1. Çok Katmanlı Kompozit Malzemeler

c.2. Hibritler

1.4.4. Kompozit malzemelerin kullanım alanları

Kompozit malzemeler gittikçe artan oranlarda ve yeni sektörlerde kullanılmaya başlanmıştır. Uzun zaman uçak sanayisindeki ihtiyaçların yönlendirdiği kompozit malzeme gelişimleri son dönemde yeni birçok sektörde birçok farklı amaç için kullanılmaktadır. Kompozit malzemelerin kullanım alanlarını genişçe şu şekilde sıralayabiliriz,

—Havacılık uygulamaları

—Askeri uçaklarda

—Helikopterlerde

—Ticari uçaklarda

—Uzay araçlarındaki uygulamalar

—Otomotiv sektöründeki uygulamalar

—Karoseri yapısı

—Titreşim söndürücüler

—Aktarma organları

—Motor

—Deniz araçları uygulamalarında

—Yarış arabalarındaki uygulamalar

—Diğer kullanım alanları

—Sağlık sektöründe, spor ürünlerinde, tıbbi ürünlerde ve uygulamalarında, balistik uygulamalarda, kamyon yaprak yayları, dişli çarklar, boru tesisatları, yapı işleri, elektrik malzemeleri, nükleer reaktörler, batarya ızgaraları.

1.4.5. Uçak yapılarında polimer kompozit malzeme kullanımı

Kompozitlerin havacılık endüstrisindeki kullanım alanları giderek artmaktadır. Fiber takviyeli polimer kompozitlerde olan gelişmeler uçak iskeleti yapılarının evrimleşmesindeki en önemli adımlardan biri olmuştur. Özellikle uçak konstrüksiyonlarında kompozit malzemeler oldukça geniş kullanım alanına sahiptir. Kompozit malzemelerinin hafifliklerine oranla üstün mekanik özellikleri uçaklarda ve helikopterlerde sadece iç mekan değil yapısal parçalarında polimer esaslı kompozitlerden üretilmesine neden olmaktadır.

Geleneksel alüminyum alaşımları ile karşılaştırıldığında polimer kompozitlerin kullanımı önemli miktarda ağırlık kazancı sağlamaktadır. Buna ek olarak, polimer kompozitlerin korozyona, yorulmaya, darbeye, klimatik etkilere, termal zorlanmalara vb. pek çok alanda avantajları vardır. (Yılmaz, 2006).

Karbon fiber takviyeli polimer kompozit yapıya sahip uçaklar alüminyum alaşımlarına oranla % 25 – 40 oranında daha hafiftirler. % 40 hafiflik uçak genelinde kg. başına 50–500 $ arasında tasarruf demektir. % 40 daha hafiflemiş bir uçak ise % 40 daha hızlı gidebilen, % 40 daha uzun menzilli uçabilen, ya da % 40 daha fazla bomba taşıyabilen uçak anlamına gelmektedir. Çok katlı tabakalı sürekli fiber takviyeli polimer kompozit gövdeye sahip uçağın yakıt deposuna kurşun isabet etse bile parçalanmaz.

Daha hızlı ve ağır uçakları durdurabilmek için yüksek performanslı uçak frenleri gerekmektedir. Normal veya kısa mesafeli duruş gerektiren koşullara uygun, yüksek sıcaklık ve termal şoka dirençli, düşük ısıl genleşmeye sahip, iyi ısıl iletken, yüksek sıcaklık stabilitesine sahip, mükemmel sürtünme ve aşınma direnci gösteren Karbon - Karbon kompozitler kullanılmaktadır. En iyi çelikten (çelik/sermet) 4 kat daha yüksek fren gücü sağlamaktadır.

1.4.6. Tez konusunun önemi ve içeriği

Kompozit malzemelerin uzay ve havacılık sanayinde kullanımlarının başlıca nedenleri hafif ve aynı zamanda yüksek dayanımlı olmalarıdır. Bu malzemelerin rijitlik/ağırlık, dayanım/ağırlık gibi spesifik özellikleri diğer konveksiyonel malzemelerden daha iyidir (Gomez-del Rio ve diğ.,2005). Amaç daha az yakıt harcamak, daha yüksek hıza ulaşmak ve verimliliği arttırmaktadır. Kullanımlarında çoğu yerde sadece maddi kazanç düşünülmeyip stratejik performanslarda dikkate alınmıştır. Özellikle titreşim, yorulma ve ısı dayanımı gibi nitelikler uzay ve havacılık sanayinde kompozit malzemelerin önde gelen avantajlarıdır. Polimer kompozitlerin özellikle uçak gövde malzemesi olarak kullanıldığı bilinmektedir. Bu gövde malzemesi kompozitler uçuş süresi boyunca atmosferik koşullarla karşı karşıya gelmektedir. Uçuş esnasında farklı yükseklikler nedeniyle gövdenin sıcaklığının ani düşüş ve yükselmeleri (-50ºC - +100ºC) termal çevrimleri doğurmaktadır. Bu termal çevrimler nedeniyle yapı içinde termal gerilmeler oluşmaktadır. Bu nedenle de termal çevrimler uçak gövdesindeki malzemeler için ciddi problem olmaktadır malzemeyi termal olarak yaşlandırmaktadır. Ayrıca uçuşlar esnasında havadaki nem veya yağmur gibi nem kaynaklarının gövde malzemesi olan kompozit malzemeyi olumsuz yönde etkilediği de bilinmektedir. Uçuşlar esnasındaki sıcaklık farklılıkları ve nemin birlikte kompozit malzemeyi etkilemesi de klimatik yaşlanma olarak kabul edilmektedir. Yukarıda belirtilenlerin yanı sıra uçak ve havacılık uygulamalarında kullanılan sürekli fiber takviyeli polimer kompozitlerden yapılan gövde ve parçalar kullanım veya bakım esnasında küçük darbelere maruz kalmaktadır. Bu darbeler malzemelerin kırılmasını sağlayacak büyüklükte olmasa bile kalıcı küçük deformasyonlara ve ileriki kullanım sürecinde parçanın hasarlanmasına neden olabileceği için çok önemlidirler ve göz ardı edilmemelidirler. Bu üç ufak gibi görünen ancak etkili unsur yani termal ve klimatik yaşlanma ve düşük enerjili darbeler uçak gövde malzemelerini gerek uçuşlar esnasında gerekse servis ve bakım koşulları altında etkilemektedirler. Bu çalışmada amaç, bu üç farklı etkiyi hem ayrı ayrı hem de birlikte ele alıp bu polimer kompozit malzemeleri nasıl etkilediklerini incelemektir.

Bu çalışmada ilk olarak kompozit malzemeye klimatik yaşlandırma işlemi uygulanmıştır. Klimatik olarak yaşlandırılmış malzemelerin hem termal hem de darbe özellikleri araştırılmıştır. Çalışmanın ikinci aşamasında malzemeye termal yaşlandırma işlemi uygulanmıştır. Yaşlandırma işleminin kompozit malzemenin termal, mikro yapı ve darbe özelliklerindeki değişimlere etkileri incelenmiştir. Termal özelliklerdeki değişimler dinamik mekanik termal analizlerle (DMTA) araştırılmıştır. Klimatik ve termal yaşlandırmaya tabi tutulan malzemenin tekrarlı darbeler sonrası darbeli yorulma davranışları incelenmiştir. Tekrarlı darbe çalışmalarının sonuçları maksimum yük ($F_{maks.}$), absorbe edilen toplam enerji ($E_{maks.}$), maksimum yüke kadar absorbe edilen enerji ($E.F_{maks.}$), her bir darbede oluşan deformasyon miktarı (X.e.v.) ve darbe sayısı terimleriyle ifade edilmiştir. Yorulma-darbe yüklemesi esnasında fraktografik incelemeler yapılarak çatlağın başlangıcı, ilerlemesi ve hasar mekanizmaları analiz edilmiştir. Fraktografik incelemeler için gerekli fotoğraflar taramalı elektron mikroskobu (TEM) yardımıyla çekilmiştir.

Bu çalışmada kapsamında;

a) Sürekli Karbon Fiber Takviyeli PEI Kompozit malzemelerin enstrümente edilmiş Ceast Sarkaç Tipli (Resil 25) test cihazı yardımıyla 0.54–0.94 J arasında değişen düşük hızlı darbe enerjilerindeki darbe-yorulma davranışları incelenmiştir.

b) Uçakların uçuş esnasında maruz kaldıkları şartları Weiss-WK 180/40 model klimatik test kabininde bir program dahilinde yaşlandırmaya bırakıldı. Klimatik ortamda yaşlandırma işlemine maruz bırakılan bu numunelerin darbe-yorulma davranışları enstrümente edilmiş Ceast Sarkaç Tipli (Resil 25) test cihazı yardımıyla 0.54–0.94 J arasında değişen düşük hızlı darbe enerjilerindeki tekrarlı darbelerle incelenmiştir. Ayrıca klimatik etki sonucu malzemedeki termomekanik özelliklerin değişimleri de TA Instruments firmasına ait dinamik mekanik termal analiz (DMTA Q800 tipi) cihazı ile incelenmiştir.

c) Sürekli Karbon Fiber Takviyeli PEI Kompozit numuneler; laboratuar şartlarında hazırlanan bir kova 0ºC'deki soğuk su ve 100ºC'de kaynar su içine ard arda daldırılarak termal yaşlandırma işlemi uygulanmıştır. Bu uygulamada termal yaşlandırmaya maruz bırakılacak numuneler bir tül parçası içinde toplanıp önce

100ºC'deki kaynar su içine daldırılıp 1 dakika bekletildikten sonra hemen diğer 0ºC' deki soğuk su içine daldırılarak burada da 1 dakika bekletilmiştir. Termal yaşlandırma işlemi 4 farklı çevrimde (50, 200, 500, 1000) yapılmıştır. Termal yaşlandırmaya maruz bırakılan bu numunelerin darbe-yorulma davranışları enstrümente edilmiş Ceast Sarkaç Tipli (Resil 25) test cihazı yardımıyla 0.54-0.94 J arasında değişen düşük hızlı darbe enerjilerindeki tekrarlı darbelerle incelenmiştir. Termal yaşlandırma sonucu malzemedeki termal özelliklerin değişimleri de TA Instruments firmasına ait dinamik mekanik termal analiz (DMTA Q800 tipi) cihazı ile incelenmiştir. Son olarak yaşlandırılıp darbeli yorulma sonucu kırılan malzeme kesitleri mikro boyutta Taramalı Elektron Mikroskobu (JOEL JSM-6335F SEM) yardımıyla fotoğraflandırılıp incelenmiştir.

d) Sürekli Karbon Fiber Takviyeli PEI Kompozit malzemelere farklı bir uygulama daha uygulanmıştır. Uygulama için iki farklı darbe enerjisi seçilip, numuneye birinci darbe enerjisinden "x" adet ardından ikinci darbe enerjisinden "y" adet uygulanmıştır. Son olarak da $0.54\,J$ değerindeki darbe enerjisinden "n" adet numune kırılıncaya kadar uygulanmıştır. Uygulamanın devamı olarak bu iki farklı darbe enerjisi yer değiştirilerek farklı bir numuneye uygulanmıştır. Yine son olarak numune kırılıncaya kadar $0.54\,J$ değerindeki darbe enerjisinden "n" adet uygulanmıştır. Bu karmaşık uygulamanın amacı farklı darbe enerjilerinin farklı sıralarla numuneye uygulanması esnasında numunede oluşan deformasyon miktarlarının ve türlerinin incelenmesidir. Bu deformasyon miktarları hem enstrümente edilmiş Ceast Sarkaç Tipli (Resil 25) test cihazı hem de Taramalı Elektron Mikroskobu (JOEL JSM-6335F TEM) yardımıyla incelenmiştir.

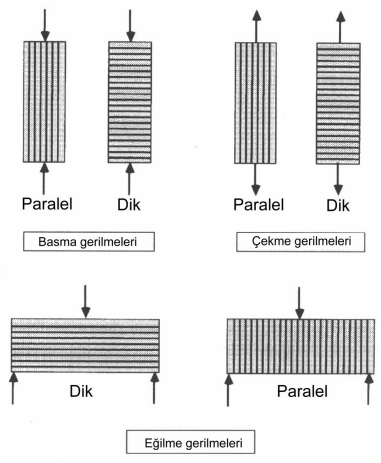
Bu çalışmada amaç, atmosferik şartlara ve ani sıcaklık değişimlerine maruz kalan sürekli karbon fiber takviyeli PEI matrisli kompozit malzemenin darbe-yorulma davranışlarının, oluşan deformasyon miktarlarının ve kırılan yüzeylerin mikro yapılarının incelenmesidir. Tekrarlı darbe çalışmalarının sonuçları hasara uğrayıncaya kadarki deformasyon miktarı (X.e.v.) ve darbe sayısı terimleriyle ifade edilmiştir. Yorulma-darbe yüklemesi esnasında fraktografik araştırmalar sayesinde çatlağın başlangıcı ve ilerlemesi, hasar mekanizmaları analiz edilmiştir.

BÖLÜM 2. GENEL KISIMLAR

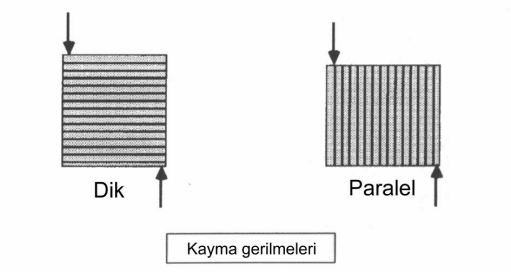
2.1. Literatür Araştırması

2.1.1. Polimer kompozitlerin hasar mekanizmaları

Fiber takviyeli kompozitler helikopter kanatları, yat omurgası, köprüler, uçak gövdesi v.b. gibi yüksek performanslı uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Kritik uygulamalarda kullanıldıklarından kompozitlerin hasar mekanizmalarının anlaşılması birinci derece önem taşımaktadır. Kompozitlerin hasar davranışları anizotropik yapıları nedeniyle karmaşık olduğundan sadece gerilmenin şiddeti değil malzemenin anizotropi eksenlerine göre gerilmelerin yönlenmesi de önemlidir (Şekil 2.1). Karmaşıklık; kompozitin dayanımının fiber takviyesi, matris ve ara yüzeye bağlı olmasından da kaynaklanır (Ateş, 2002).



Şekil 2.1. Basit, tek yönlü fiber takviyeli kompozitin yükleme modlarının şematik gösterimi (Ateş, 2002)



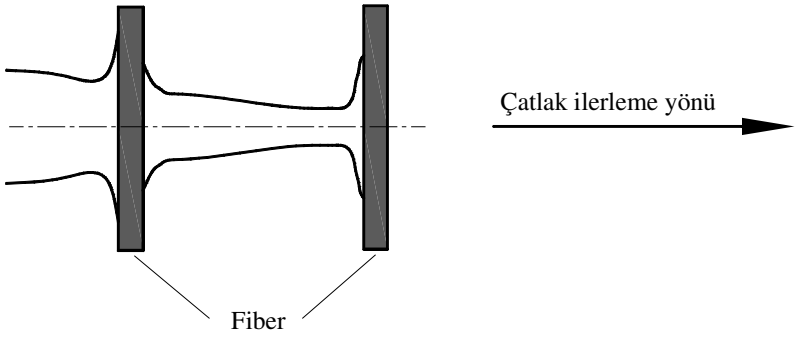
Şekil 2.1.(Devamı) Basit, tek yönlü fiber takviyeli kompozitin yükleme modlarının şematik gösterimi (Ateş, 2002)

Kompozitlerin hasar mekanizmaları çok karmaşıktır. Matris ve fiber özellikleri, fiber miktarı, ara yüzey özellikleri, fiberlerin yönlenmesi ve dizilimi, fiberlerin cinsi, boşluk miktarı ve yükleme tipi (tek eksenli çekme, tek eksenli basma, tabakalar arası kayma gibi.) gibi parametrelerden etkilenmektedir. Kompozitlerde olası hasar tipleri matris çatlağı, fiber kırılması, ara yüzey yapışma hatası, boşlukların büyümesi, delaminasyon ve benzeridir (Scheris, 2000).

Yüklemeler esnasında kompozitlerin mekanik tepkileri genellikle ya fiber ya da matris bazlıdır. Çoğu durumda, hasar davranışı ikisinden biri tarafından belirlenmektedir. Örneğin, fiber dizilimi ile aynı yönde tek eksenli çekme altındaki bir sürekli fiber takviyeli kompozitte fiberler hasar durumunu tayin ederler (Scheris, 2000).

2.1.1.1. Soyulma (Debonding)

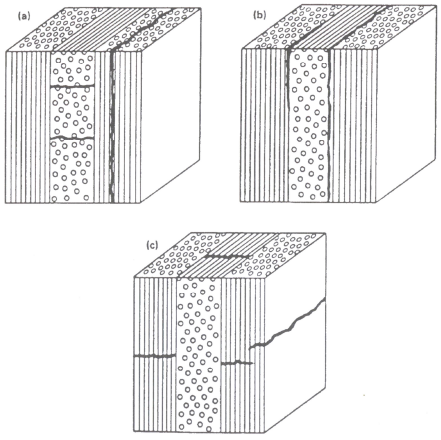
Soyulma fiber-matris sınırı boyunca ara yüzey hasarı şeklinde oluşur (Şekil 2.2.). Çatlak ilerlerken karşılaştığı fiberi kıramadığı zaman fiber ile matrisin birleştiği ara yüzeyi soyarak ilerlemeye çalışır. Bu aşamada harcanan enerji ne kadar fazla ise malzemenin tokluğu o kadar büyüktür demektir. Kırılma yüzeyi üzerinde, çok az ya da hiç matris bulunmaksızın dışarı çıkmış fiberlerle ve pürüzsüz bir matris yüzeyinin varlığıyla açıklanmaktadır (Scheris, 2000).



Şekil 2.2. Fiber/matris ara yüzeyinde soyulma mekanizması (Yılmaz, 2006)

2.1.1.2. Tabakalar arası hasar

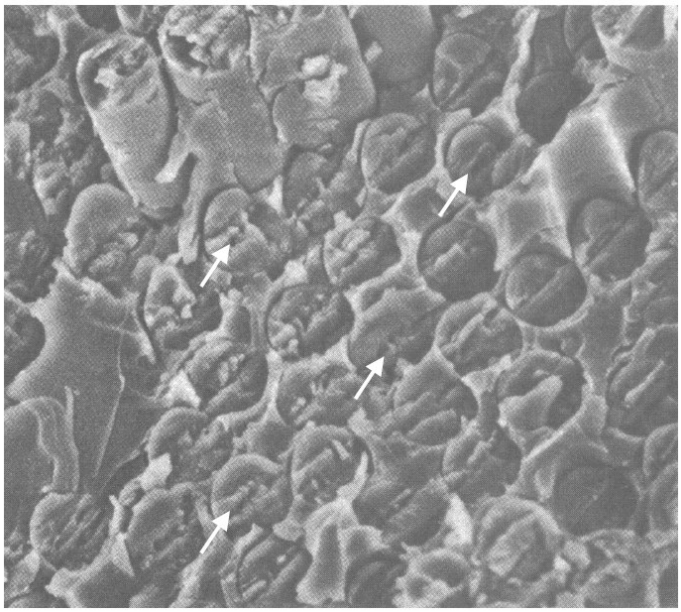
Tabakalar arası hasar, matris ve fiberler arasındaki ara yüzey dayanımının matrisin kohezif dayanımından daha yüksek olduğu durumda oluşur (Şekil 2.3). Bu hasar kompozitin aşırı kırılgan davranışıyla açıklanmıştır. Kompozitlerin ara yüzey ayrılması, boşluk miktarı arttıkça olduğundan daha fazla olur. Bir çekicin kompozit malzeme üzerine düşmesi gibi önemsiz görülen bazı darbeler, basma yüklemesiyle yüklenen plakada burkulma (buckling) hasarı oluşmasına yol açabilir (Scheris, 2000).



Şekil 2.3. İki boyutlu çapraz katlı kompozitlerde hasar tipleri: (a) tabaka içi hasarı (b) tabakalar arası hasar (c) fiber yönüne dik tabaka içi hasar (Scheris, 2000)

2.1.1.3. Fiber burkulması (Buckling)

Matris yeterli dayanımına sahip olamadığında, matris tarafından yeterince desteklenmeyen fiberlerde basma yüklemesinin etkimesiyle fiber burkulması oluşur. Fiberlerdeki mikro burkulma, sürekli fiber takviyeli kompozitlere basmanın etki ettiği durumlarda oluşan genel bir hasar tipidir (Şekil 2.4). Fiberler bası yükleri altında, matris tarafından çevrelendiklerinde sinüzoidal olarak deforme olurlar. Fiberlerin mikro-burkulması, yüksek sıcaklıklarda pişirme sırasında fiber ve matris arasında yüksek büzülme farklılıkları olduğunda dahi olmaktadır.

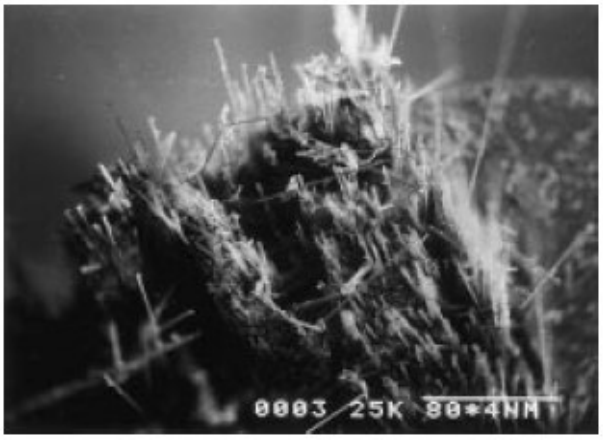


Şekil 2.4. Basma yüklemesiyle fiberlerin burkulması (buckling) (Rakow ve Pettinger, 2006)

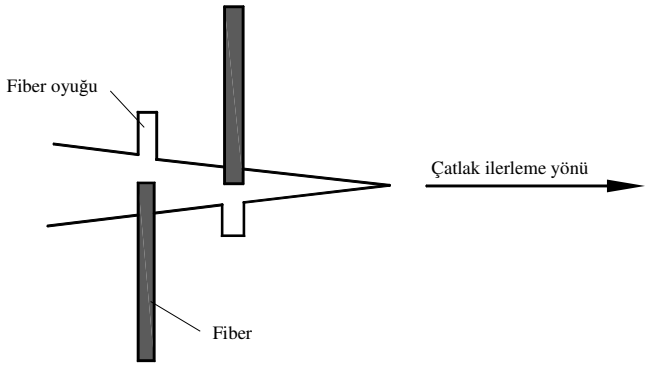
2.1.1.4. Fiberin yerinden çıkması (Pull-out)

Fiberin yerinden çıkması ara yüzey yapışma dayanımının ve bölgesel yükün fiberlerden matrise iletilmesindeki değişikliklere bağlı olarak değişmektedir (Şekil 2.5). Kompozitteki fiberin yerinden çıkma hasarları Taramalı Elektro Mikroskobuyla (TEM) yapılan kırılma yüzeyi incelemesi ile açığa çıkarılmaktadır. Zayıf adhezyona

sahip kırılmış fiberler matristen çıkarken yüzeyi pürüzsüz ve temiz bırakırlar. Matriste fiber yerinden çıkarken harcanan enerji ara yüzey sürtünmesinin derecesine bağlıdır. Fiberlerin yüzeylerinde matris kalıntıları varsa ve matriste fiberlerin yerinden çıkması ile oluşan boşluklarda deformasyonlar varsa fiber/matris ara yüzey dayanımı yüksek demektir. Fiber/matris ara yüzey bölgesindeki kalıntı gerilmeler, ortaya çıkan çekme (shrinkage) kuvvetleri nedeniyle oluşmaktadır. Şekil 2.6'da açıklanan çıkma mekanizması ile fiber matris içersindeki yerinden çıkarken harcanan sürtünme enerjisi darbe dayanımını arttıran etki yaratmaktadır. (Scheris, 2000).



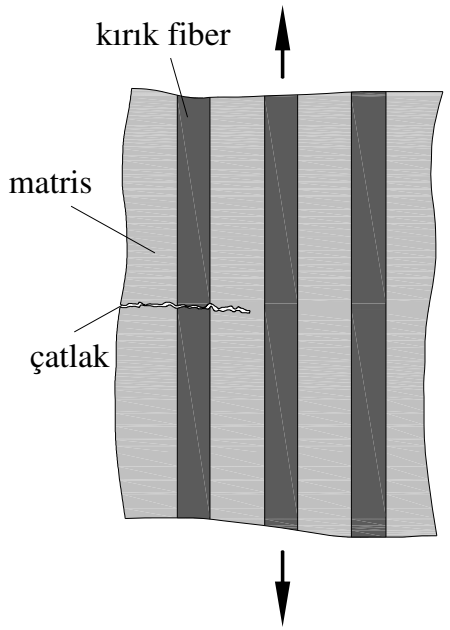
Şekil 2.5. Cam fiber takviyeli polimerde fiber soyulmasının TEM resmi (Roy ve diğ., 2001)



Şekil 2.6. Fiberlerin yerinden çıkma mekanizması (Scheris, 2000)

2.1.1.5. Fiber kırılması

Fiber kırılması bazı kompozitlerde belirli ölçülerde enerji-emilme mekanizmasıyla ilişkilidir. Uygulanan yüklemeyle matris malzemesindeki deformasyon fiber/matris ara yüzeyi aşarak fibere kadar ilerlemiş olup yük fiber tarafından karşılanamayıp fiber de hasara uğramaktadır. Bu fiberi aşan deformasyon tekrar matris tarafından karşılanır.



Şekil 2.7. Fiberde oluşan kırılma (Yılmaz, 2006)

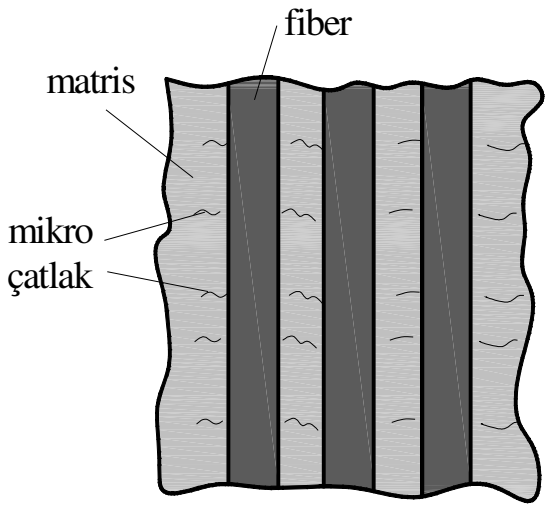
2.1.1.6. Kompozitlerde çatlak oluşumu

Bir çatlağın ilerlemesi için, matristeki çatlak enerjisinin iki yeni kırık yüzeyi oluşturmaya yetecek enerji büyüklüğü kadar olmalıdır. Kompozitlerde çatlama genelde fiber-matris ara yüzeyinde ayrılmayla başlar. Bu esnada kompozitin modülünde gözle görülür bir azalma meydana gelir. İç çatlakların sayısının artmasıyla, kompozitin rengi, bu iç çatlakların yüzeylerinden ışığın yansımasıyla beyaz gözükür (Scheris, 2000).

2.1.1.7. Kompozitlerde mikro-çatlama

Sürekli fiber takviyeli kompozitlerin mikro-çatlaması genel bir problem olup, fiber ve matris arasında termal genleşme farklılığından dolayı oluşmaktadır. Bu olay kompozitin üretimi ya da tavlanmaları sonrası soğuması esnasında veya malzemenin kullanımı esnasında çevresel koşullardan etkilenmesiyle oluşmakta ve yüksek sıcaklık kompozitlerinde özellikle önemlidir.

Matris ve fiber arasındaki termal genleşme farklılığı çeşitli gerilmelere neden olabilir ve matrisin tamamen hasarına veya mikro-çatlamalara sebep olur. Daha ileri gidilirse, mikroskobik termal farklılık çapraz katlı kompozitlerde daha çok olacaktır. Çapraz katmanlı kompozitler tek yönlü kompozitlere göre daha yüksek artık gerilme üretirler. Bunun nedeni termal genleşmede katmanların anizotropik olmasıdır. Mikro-çatlama, epoksi/grafit ve polyamid/karbon kompozitlerinde gözlemlenmiştir. Kompozitte kullanılan matris ve fiber çifti ve fiber hacim oranı, kompozit sistemindeki artık termal gerilmelerin büyüklüğünü belirlemede önemli etkenlerdir (Scheris, 2000).

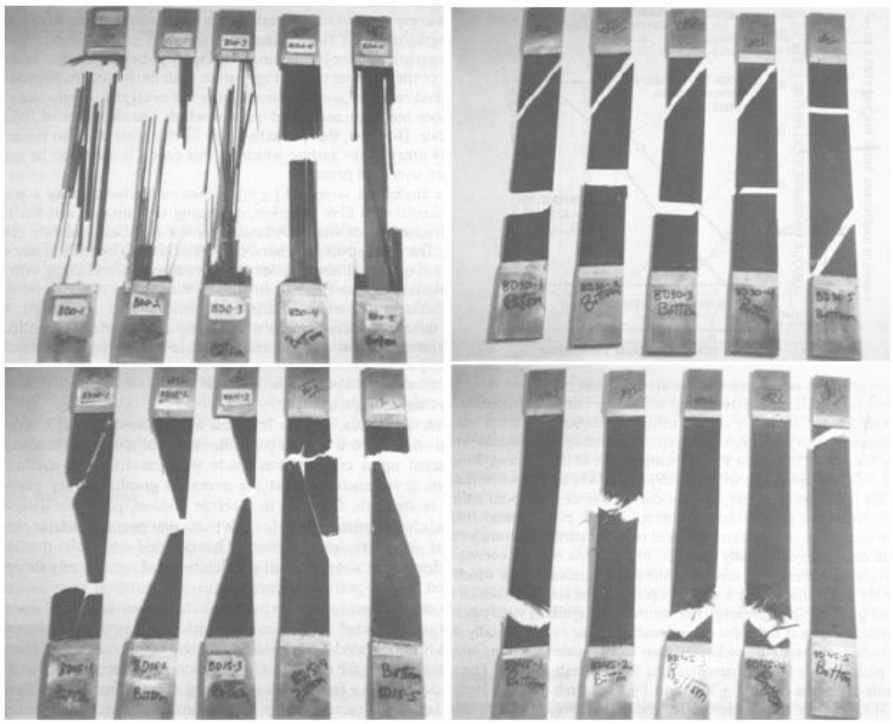


Şekil 2.8. Kompozit tabakada oluşan mikro çatlaklar (Yılmaz, 2006)

2.1.2. Kompozit malzemelere uygulanan yükleme çeşitleri ve malzemede oluşturdukları hasarlar

2.1.2.1. Çekme yüklemesi

Çekme yüklemesi altında fiber takviyeli kompozitlerin çekme hasarları bazı genel karakteristikler gösterir. Birinci karakteristik kırılan yüzeyin kaba ve pürüzlü olmasıdır (Şekil 2.9). Kırılmış fiberler matristen dışarı çıkarlar ve kırılma yüzeyini kaba ve pürüzlü hala getirirler. Yerinden çıkmış fiberler kompozitte çekme hasarının tipik bir belirtisidir. Yerinden çıkmış fiberlerin uzunluğu, yükleme hızı, nem miktarı ve sıcaklık gibi önemli çevresel koşullar hasar oluşumunu yakından etkilemektedir (Rakow ve Pettinger, 2006).

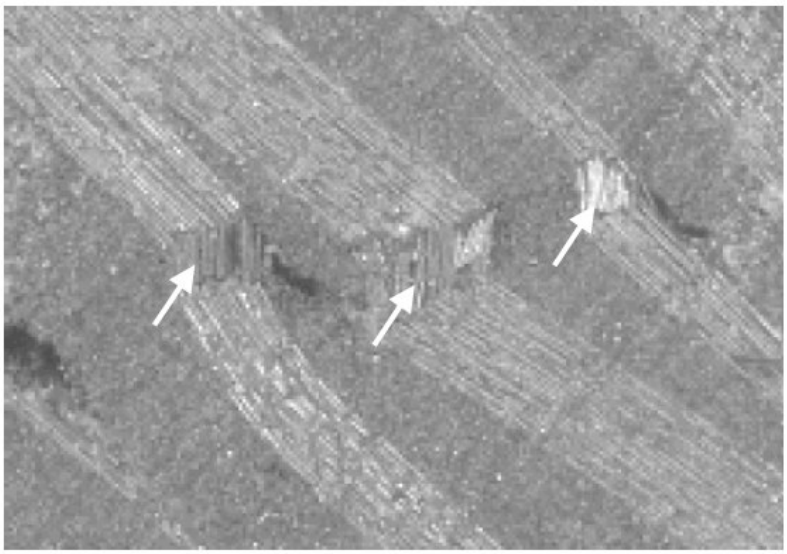


Şekil 2.9. Kompozitlerde çekme hasarı; fiberlerin dizilişi, fiber-matris oranı, kullanılan fiber ve matris çifti, fiber hacim oranı gibi etkiler nedeniyle oluşan farklı kırılma yüzeyleri (Rakow ve Pettinger, 2006)

2.1.2.2. Basma yüklemesi

Basma yüklemesinde, fiberler daha az verimlidirler. Fiber takviyeli kompozitlerin basma hasarının en genel karakteristiği burkulmuş fiber gruplarının oluşturduğu burkulma (kink) bantlarıdır (Şekil 2.10).

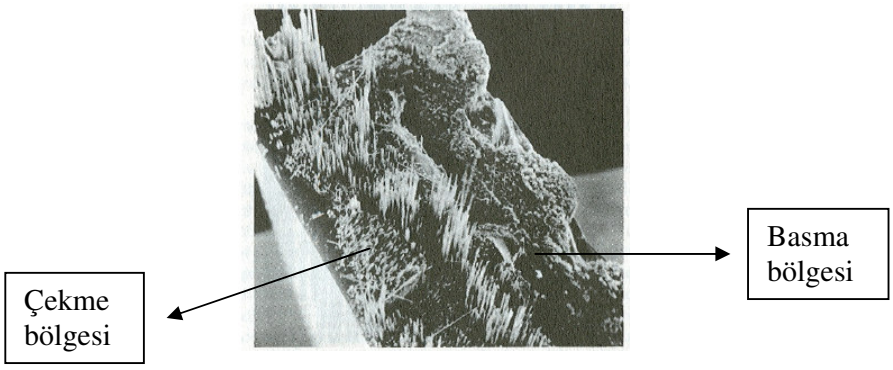
Fiberlerin burkulması malzemenin, geometrinin ve çevresel koşulların bir fonksiyonu olarak basma yükünün kritik bir sonuca ulaşmasıyla meydana gelir.



Şekil 2.10. Basma yüklemesi nedeniyle oluşan burkulma bantları (Rakow ve Pettinger, 2006)

2.1.2.3. Eğilme yüklemesi

Çekme ve basma kırılma yüzeyleri arasındaki fark eğilmeyle hasara uğrayan kompozitlerde kolaylıkla görülebilir. Şekil 2.11'de eğilmeyle hasara uğrayan bir numune görülmektedir.



Şekil 2.11. Eğilme yüklemesi nedeniyle hasara uğrayan kompozit malzemenin enine kesiti (Rakow ve Pettinger, 2006)

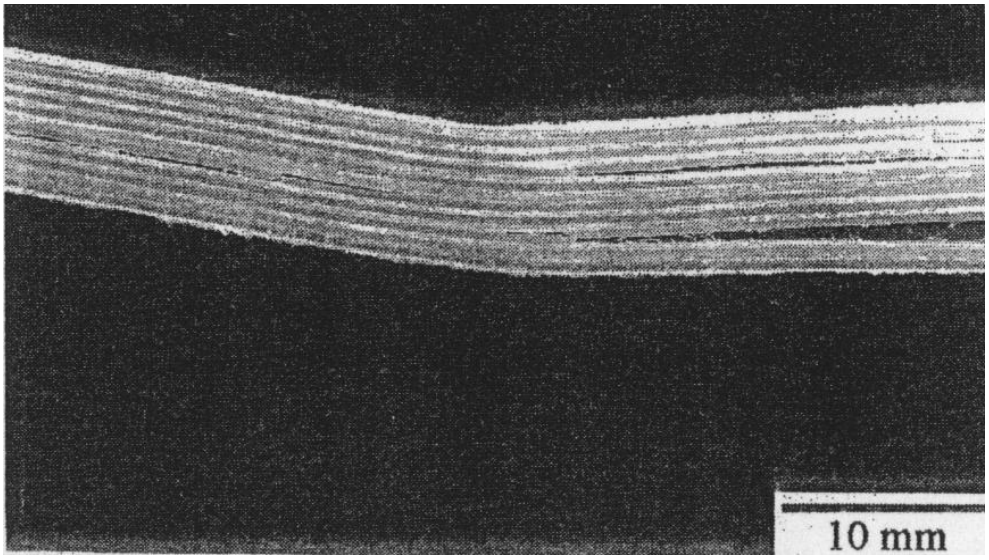
Eğilmede, enine kesitin bir parçası çekmeye diğer parçası da basmaya maruz kalır. Bu karakteristik özellik mikroskobik incelemeler kolaylıkla ayırt edilebilir (Rakow ve Pettinger, 2006).

2.1.2.4. Darbe yüklemesi

Havacılık sanayisinde kullanılan kompozit malzemeler genellikle gevrektir. Bu nedenle, darbe yüklemeleri yüzeyde herhangi bir görünür hasar vermeden kompozit malzemeyi hasara uğratabilir.

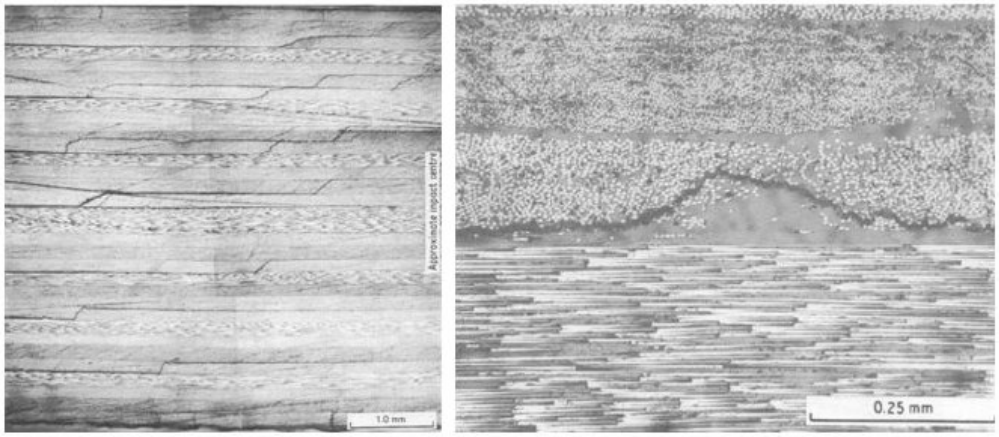
Yapının darbe performansı darbe etkisi yapan nesne, ya da yüksek genleme oranlı yüklemenin etkisiyle değişir. Açığa çıkan hasar; darbe etkisi yapan nesneye (yoğunluğu, kütlesi, sertliği, hızı, şekli), hedef yapının dinamik tepkisine (kalınlık ve desteklerin durumu) ve numunenin malzeme özelliklerine (modül, dayanım, sertlik vb.) bağlı olarak değişir (Jones, 1994).

Darbe nedeniyle yüzey altında oluşan en önemli hasar tabakalar arası ayrılmadır (Şekil 2.12). Tabakalar arası ayrılma kompozit malzemede katmanlar arası kayma neticesi oluşur. Kayma hareketi, üretim esasında birleştirilmiş katmanların ya da



Şekil 2.12. Tabakalar arası ayrılma hasarı

fiber-matris ara yüzeyi boyunca oluşabilir. Darbeden sonra kompozit plakanın enine kesiti şekilde gösterilmiştir (Şekil 2.13) (Rakow ve Pettinger, 2006).



Şekil 2.13. Kompozit plakada tabakalar arası ayrılma hatası (Rakow ve Pettinger, 2006)

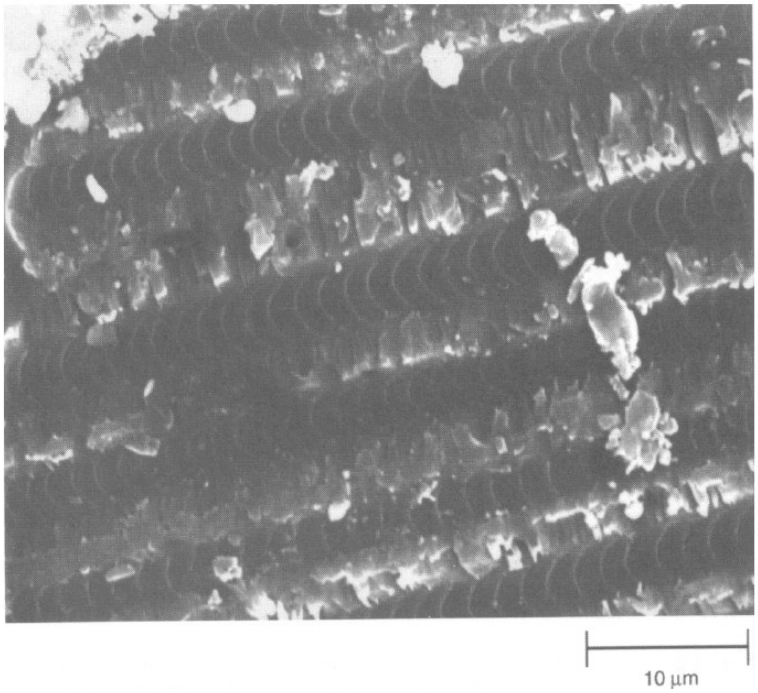
Fiber ve matris arasında güçlü ara yüzey bağı varsa, darbe fiberlere dik yönde çatlaklara sebep olur ve bu çatlakların durdurulması çok zordur. (Scheris, 2000). Fiber takviyeli kompozitlerin darbe dayanımının, kritik uzunluktan (minimum

uzunluğuyla maksimum kırılma dayanımına ulaşılan değer) daha fazla fiber uzunlukları için artacağı bulunmuştur (Scheris, 2000).

2.1.2.5. Yorulma yüklemesi

Polimer kompozitlerde yorulma hasarı rijitlik kaybı ile ortaya çıkar. Metallerde yorulmanın etkisinin tamamen farklı olacağı bilinmektedir. Yorulma hasarının diğer bir tipi soyulma (de-boding) hasarıdır. Ne yazık ki, genelde kompozit malzemedeki matris sertleştikçe kompozitin yorulma direnci giderek kötüleşir (Scheris, 2000).

Yorulma kırılmaları mikroskobik olarak tespit edilmeleri zor olmasına rağmen bazı görüntüler yardımıyla bu hasarlar mikroskobik ortamda belirlenebilir. Örneğin Şekil 2.14'te kompozitteki fiber-matris ara yüzeyinde oluşan şeritlenmeyi göstermektedir.



Şekil 2.14. Fiber ve matris ara yüzeyindeki şeritlenme (Rakow ve Pettinger, 2006)

Bu şeritlenmeler yorulma hasarını içermelerine rağmen, şeritlenmelerin kapladığı alan hem sayı hem de boyut olarak azdır.

Yorulma hasarının diğer bir kanıtı eş çalışan kırılma yüzeyleri arasındaki abrazyondur. Tekrarlı yüklemeyle, ilerleyen kırılma yüzeyleri bir diğerine sürtünür ve kırılan fiberler sonunda matriste abraziv izler bırakır (Rakow ve Pettinger, 2006).

Karbon fiber takviyeli kompozitler yorulmaya karşı yüksek bir dirence sahiptirler. Yorulma direncine göre sıralama yapılırsa karbon fiberleri, daha sonra aramid fiberler ve en sonda cam fiberler takip eder. Karbon fiberler statik dayanımlarının % 80'i ile milyon çevrimi karşılayabilirken, aramid % 40 ve cam fiberler % 25'i büyüklüğünde direnç gösterir (Scheris, 2000).

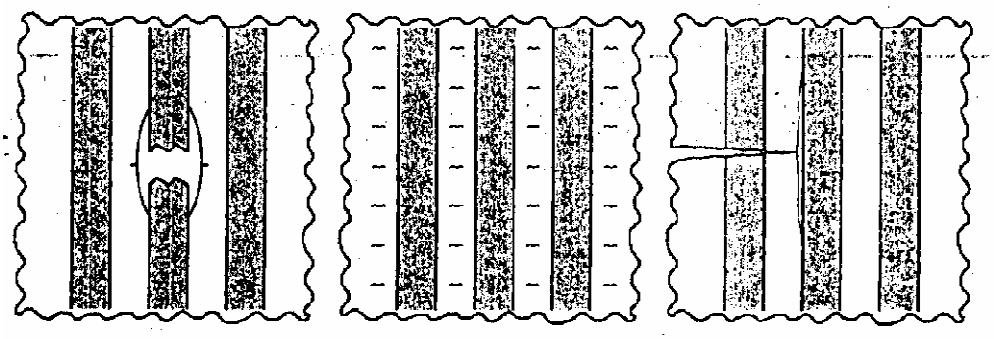
2.1.3. Tabakalı kompozit malzemelerde yorulma hasar mekanizması

Mühendislikte kullanılan kompozit malzemelerin yorulma hasar mekanizması oldukça karmaşıktır. Bu yüzden tamamen anlaşılması için daha çok çalışma yapılması gerekmektedir. Bu karmaşıklık malzemede herhangi bir yükleme yapılmadan önce başlangıç hasarı şeklinde nitelendirilebilecek yüksek homojensizliklerden kaynaklanmaktadır. Kompozitteki bölgesel yorulma hasarını tahmin etmeye yarayan genel bir kriter belirlemek zordur.

Tekrarlanan yüklemeler yorulma hasarının gelişmesini sağlar bunun sonucunda da yapı işlevini yerine getiremez olur. Yorulma, tekrarlanan yüklemeler sonucunda malzemenin mekanik özelliklerinde meydana gelen azalma olarak tanımlanabilir. Hem kompozitler hem de homojen malzemeler için yorulma, yapıların servis süreleri boyunca en sık karşılaştıkları hasar tipidir. Kompozit malzemelerin yorulma davranışları S-N eğrileri ile karakterize edilmektedir.

Yorulma hasar mekanizmalarını daha iyi anlamak için, yorulma hasarının karmaşıklığının açıklaması tek yönlü kompozitlere uygulanan fiberlere paralel çekme

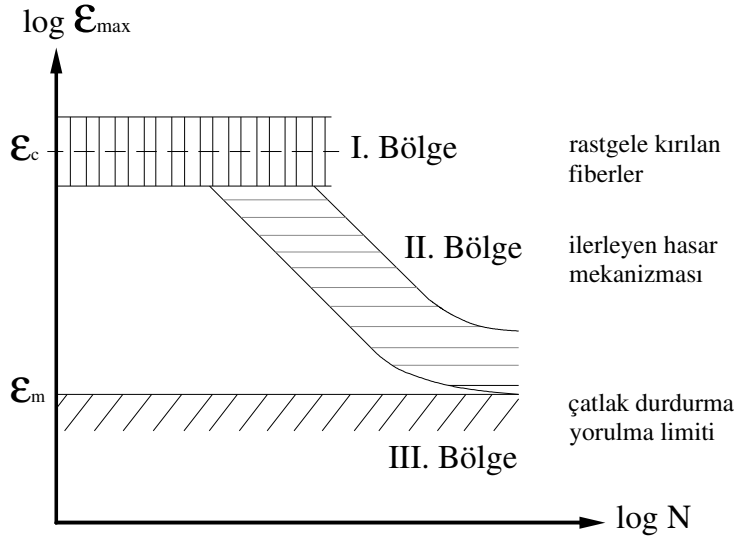
yüklemesiyle açıklanmaya başlanmalıdır. Bu en basit durumda, hasar mekanizmaları Şekil 2.15'te gösterildiği gibi üç basit moda ayrılmıştır (Pantelakis ve Labeas, 2001).



Şekil 2.15. Fiber kırılması/ara yüzey ayrılması, matris çatlağı ve kesme hatasını içeren tek yönlü kompozitlerdeki basit yorulma hasar mekanizmaları (Pantelakis ve Labeas, 2001)

Fiber kırılması, fiber-matris ara yüzeyinde kayma gerilmesi yoğunluğu nedeniyle bölgesel gerilmenin en zayıf fiberin dayanımını aştığı zaman oluşur. Ara yüzey bölgesi boyunca etki eden çekme gerilmesi, matriste enine çatlakları tetikler. Bu çatlaklar gelişi güzel dağılırlar ve ilk olarak fiberler tarafından sınırlandırılırlar. Yorulma yönteminin gelişimiyle, eşik değeri aşan bölgesel genleme fiber kırılmasına ve matris çatlaklarının ilerlemesine neden olur. Matris çatlak ilerlemesi esnasında, matris-fiber ara yüzeyi çeşitli kayma gerilmelerine bağlı olarak hasara uğrayacaktır (Pantelakis ve Labeas, 2001).

Tipik bir yorulma ömrü grafiği Şekil 2.16'da gösterilmiştir. Matris için en düşük genleme sınırı ε_m ile gösterilmiştir. Bu eşik değerin altında matris çatlakları fiberler tarafından durdurulmaktadır. Bu genleme değeri takviyesiz matris malzemesinin yorulma genleme sınırıdır. Malzemeyi hasara uğratacak üst genleme sınırı grafikte ε_c ile gösterilmiştir. Bu değer fiber takviyelerinin hasarlanacağı genleme değeridir.



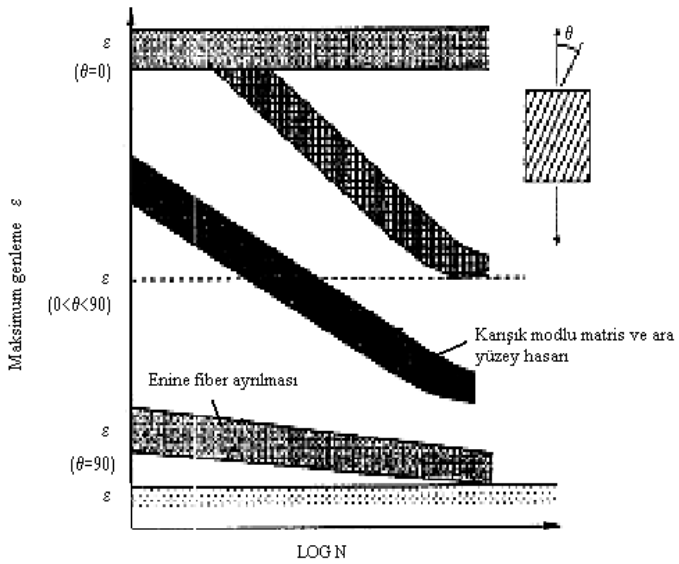
Şekil 2.16. Fiberlere paralel yönde etkiyen yük altında tek yönlü kompozitler için tipik yorulma ömrü grafiği (Yılmaz, 2006)

I. bölgedeki uzama seviyesi genellikle statik yükleme sonucunda hasara neden olan uzama düzeyi ile çakışmaktadır. Çünkü polimer matrisli kompozit malzemelerde yükün tamamı neredeyse fiberler tarafından taşınmaktadır. Bu bölgede etkili olan hasar mekanizmaları statik hasara neden olan mekanizmalar ile benzer niteliktedir. Bölgede gelişen hasar mekanizmaları düzensiz olduğundan ilk yükleme çevrimi sonrasında oluşan hasar dağılımındaki değişimi tespit etmek neredeyse imkansızdır. Statik yükleme sonucunda oluşan hasar prosesi, fiber dayanımı ve fiberlerin kırılması sonrasında oluşan gerilme dağılımı tarafından kontrol edilmektedir.

Birinci bölgedeki gerilme dağılımı ana merak konusu değildir, çünkü bu bölgedeki ömür kısadır ve burada oluşan uzama hasara neden olan statik uzama değerleriyle hesaplanabilir. I. Bölgede hasar gelişimi çevrim sayısından bağımsızdır (Yılmaz, 2006).

II. bölge hasar oluşumunun devam ettiği gelişme bölgesi olarak adlandırılmaktadır. Burada oluşan hasar mekanizmaları bu bölgenin eğiminden sorumlu fiber köprülü çatlaklar (fiber bridged cracking) ve gelişen soyulmadır. Yorulma duyarlılığı genellikle yorulma-ömür diyagramındaki II. Bölgenin eğimi ile tanımlanmaktadır. Bu eğim bölgede gelişen hasar mekanizmalarının yoğunluğunu ifade etmektedir.

Kompozit malzemelerde yorulma limiti üzerindeki gerilmelere ve uzamalara izin verilmemektedir. Teorik yorulma limiti altındaki yüksek yük çevrim sayılarında, 10^8 veya 10^9 çevrim ve oldukça uzun yükleme sürelerinde kompozit bağlantılarda hasar meydana gelmez. Yorulma-ömür diyagramında bu bölge III. Bölge olarak tanımlanmıştır. Buradaki uzama miktarları oldukça küçük olduğundan bölgede hasar gelişmez ve malzeme tekrarlı yükleme esnasında tamamen elastik davranış sergiler. Bu bölgede hasarın ilerlemesi kompozitin doğal heterojen yapısı tarafından engellenerek durdurulmaktadır. Yorulma-ömür diyagramında dikkatlerin II. Bölgede meydana gelen hasar mekanizmaları üzerinde yoğunlaştırılması gerekir, çünkü bu bölge yapının ömrü üzerinde oldukça etkilidir. Gerçekleştirilen çeşitli araştırmalarla II. Bölgede meydana gelen yorulma degradasyonunun oluşmasında etkili en önemli hasar mekanizmasının fiber/matris ara yüzey ayrılmaları olduğu gösterilmiştir. Fiber/matris ara yüzey mukavemeti karbon fiber takviyeli kompozitlerde dayanımı etkileyen temel özelliktir (Yılmaz, 2006). Yükleme ekseni fiber eksenine belli bir açı yapıyorsa, en önemli hasar mekanizması fiber-matris ara yüzeyi boyunca oluşan matris çatlağıdır. Bu durumda, enine fiber ayrılması için en düşük yorulma genleme sınırı, kuvvetli olarak yükleme açısıyla "θ" ilişkilidir (Şekil 2.17).



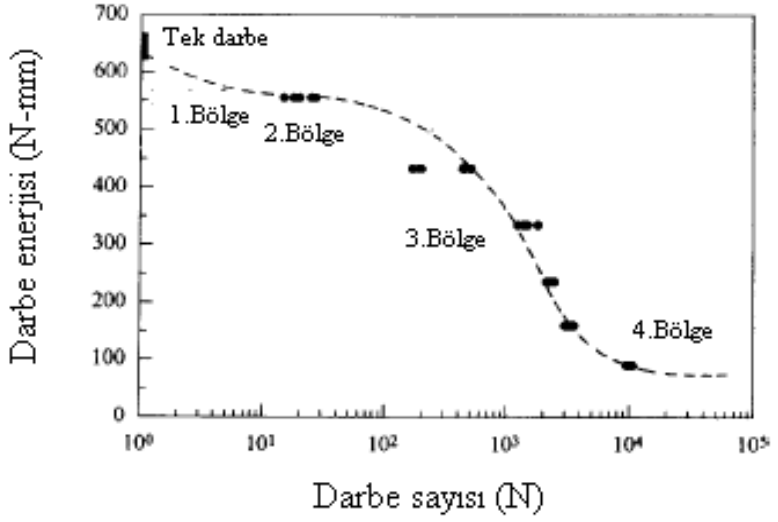
Şekil 2.17. Malzeme eksenine göre "θ" açısı ile yüklenen tek yönlü kompozitin yorulma ömrü grafiği (Pantelakis ve Labeas, 2001)

2.1.4. Fiber takviyeli kompozitlerde darbe yorulması özellikleri

Cam fiber takviyeli polimer kompozitlerin ve takviyesiz polimerlerin darbe yorulma özellikleri üzerinde çok az çalışma yapılmıştır. Bunların çoğu darbe yorulması tekrar sayısı üzerine yoğunlaşmıştır. Darbe yorulma tekrar sayısının çok olduğu polimer tabanlı kompozitlerdeki direnç, bu malzemelerin uzun süreli performansını belirleyebilmek için önemlidir. Bu yüzden, tek yönlü cam fiber takviyeli polimer kompozitlerin mekanik davranışları ve bu malzemelerin darbe yorulma özellikleri incelenmiştir (Kawaguchi ve diğ., 2004). Hasara uğratan çevrimdeki farklılıkların sebebi uygulama süresi ve yükleme modu gibi yükleme durumlarına bağlı olarak açıklanmıştır. Hasar mekanizmaları arasındaki ilişki uygulama süresi, yükleme modu ve çevrim sayısına bağlanmıştır (Kawaguchi ve diğ., 2004).

Kısa fiber takviyeli polyphenylennether (GF-PPE) ve polyphenylenesulfide (GF-PPS)'nin darbe yorulma özellikleri tek eksenli ve tekrarlı testler yardımıyla incelenmiştir. Çatlağın başladığı tekrar sayısının temas süresine bağlı olduğu gözlenmiştir. Tek eksenli testlerde, çatlağın başladığı tekrar sayısı yüksek olup, tekrarlı testlerde ise tekrar sayısının az olduğu görülmüştür. (Kawaguchi ve diğ., 2004).

Darbe yorulma çalışması tekrarlı yükleme altında E-cam fiber takviyeli vinilester kompozit malzemesine uygulanmış ve yorulma ömrü grafiği belirlenmiştir. Şekil 2.18'de cam fiber takviyeli polimer kompozitin S-N darbe yorulma eğrisi çizilmiştir. Çekme-çekme yorulma yüklemesinde üç bölge oluşurken darbe yorulmasına maruz bırakılmış numunede dört bölge göze çarpmaktadır.



Şekil 2.18. Cam fiber takviyeli polimer kompozitin yorulma darbe eğrisi (Roy ve diğ., 2001)

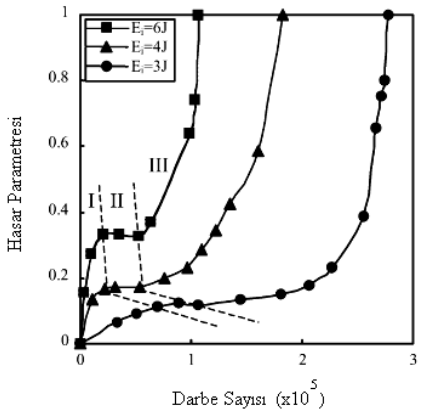
Birinci bölge, numunenin kritik darbe dayanımının altında numuneye çok az darbe sayısı uygulanırken, darbe yorulmasının başladığı bölgeyi göstermektedir. Bu bölge matriste ilk çatlakların oluştuğu ve oluşan çatlakların ilerleyerek soyulmaya (de-bonding) ve fiberlerin zayıflanmasına neden olmaktadır. İkinci bölge eğrinin düzleştiği; ilk çatlakların ara yüzeyde ayrılma ile ilerlediği bölgedir. Üçüncü bölgede, dayanımın azalmasıyla uygulanan darbe enerjisinde ani bir azalma görülür. Dördüncü bölgede 10^4 darbe çevriminde dayanım sınırı belirlenmiştir. Bu bölgede darbe yükleri kırılma nedeniyle yeterli olarak mikro-çatlakları ve soyulmayı (de-bonding) büyütmez. Böylece tipik bir yorulma davranışı gözlenmiştir (Roy ve diğ., 2001).

Sürekli fiber takviyeli kompozit plakalar yüksek spesifik dayanım, yüksek kimyasal direnç ve rijitlik gibi avantajlarına rağmen bakım ve servis esnasında oluşan düşük enerjili darbe yüklemesi, statik yükleme gibi çeşitli yüklerden dolayı hasara karşı duyarlı olmaktadırlar (Sınmazçelik ve diğ. ,2006).

Çatlak başlangıcı ve ilerlemesi, düşük hız, yüksek genleme oranı ve balistik darbeler gibi çeşitli durumlara bağlı olarak kompozit malzemelerde ortaya çıkmaktadır. Bazı

darbeler üretim esnasında, bakımda veya servis esnasında oluşabilir. Bazı hasarlar düşük hızlı darbe hasarına bağlı olarak gözle görülemez. Tekrarlı yüklemenin neden olduğu malzemedeki hasar, kompozit malzemenin basma dayanımını ve rijitliğini düşürdüğünden en önemli olgudur (Sınmazçelik ve diğ. ,2006).

Darbe yüklemesinin sonucu olarak tabakalar arası ayrılmalar ve soyulma kompozitlerde esas hasar tipleridir. Darbe dayanımı genellikle darbe hızı, kullanılan fiber ve matris tipi, fiber hacim oranı ve ara yüzey yapışması gibi parametrelerle saptanmalıdır. Darbe altındaki kompozitin uygunluğu sadece uygun tasarım parametreleriyle belirlememeli, ayrıca malzemenin absorbe ettiği darbe enerjisi de göz önüne alınmalıdır. Fiberlerin yerinden çıkması ve kayma hasarı, matris çatlağı, ayrılma ve tabakalar arası ayrılma çeşitli hasar mekanizmaları olduğu söylenmiştir (Sınmazçelik ve diğ. ,2006). Karbon fiber takviyeli PEI (Polyetheremide) kompozitlerinde ön-darbenin etkisi incelenmiş, çekicin darbe enerjisi ve ön-darbe sayısının esas parametreler olduğu gözlemlenmiştir. Hasar oluşumunda darbe enerjisindeki azalış darbe sayısındaki artışla sonuçlanmıştır. 0,39 J değerinden daha fazla bir darbe enerjisiyle ön-darbe yapıldığında, kompozitlerin son darbe değerleri dikkate değer bir şekilde azalmıştır (Sınmazçelik ve diğ. ,2006). Araştırmacılara göre darbe tekrar sayısına bağlı olarak değişen hasar parametresi eğrileri üç ana bölge halinde incelenmiştir (Şekil 2.19).



Şekil 2.19. Cam/Epoksi kompozitinin farklı darbe enerjilerindeki hasar eğrileri (Azouaoui, 2001)

1.bölgede, tabakalar arası ayrılma ilk darbe tekrarlarında görünmektedir. Bu bölgede iki olay gerçekleşmektedir: tabakalar arası ayrılma yüzeylerinin büyümesi ve yeni ayrılma yüzeylerinin oluşması. 1.bölge tabakalar arası ayrılmanın başladığı ve bunların birleşerek çoğaldığı bölgedir.

2.bölge belirli bir darbe tekrar sayısından sonra, tabakalar arası ayrılma birikiminin gerçekleştiği yerdir. Hasar eğrisinin bu bölümünde tabakalar arası ayrılma işleminin durmasıyla eğri yatay girmektedir.

3.bölge numunede kırılıncaya kadar oluşan hasarların artmasıyla eğrinin dikleştiği bölgedir. Darbe enerjisi artmadıkça malzemede oluşan hasar hızlanmaktadır. İlk iki bölgede uygulanan darbe enerjisi malzemede oluşan tabakalar arası ayrılmaları ilerletmeye ve numuneyi kırmaya yetmemektedir (Azouaoui, 2001).

Karbon fiber takviyeli polimer kompozitler üzerinde yapılan düşük hızlı darbe testleri 20^{o} ile -150^{o} arasındaki farklı sıcaklıklarda uygulanmıştır. Malzemelere yapılan tahribatlı ve tahribatsız muayenelerde sıcaklığın karbon fiber takviyeli kompozitlerde oluşan hasarları nasıl etkilediği incelenmiştir. Eşik darbe enerjisi üzerinde sıcaklığın etkisini ölçmek için kullanılan düşen ağırlık testiyle kuvvet-yer değiştirme eğrilerinin analizleri elde edilmiştir. Deneyler farklı fiber tiplerine ve farklı fiber dizilimlerine sahip kompozitlerde yapılmıştır (Gomez-del Rio ve diğ. 2005).

Karbon fiber takviyeli polimer plakalarda düşük hızlı darbe yükleri nedeniyle oluşan hasar darbe enerjisiyle artmasıyla birlikte artmaktadır. Darbeden önce tabakaları kurutmanın darbe enerjisinin yarattığı etkiye benzer bir etki yarattığı görülmüştür: daha büyük matris çatlağı ve tabakalar arası ayrılma miktarı, darbe bölgesinde daha derin çukurlaşma, fiber-matris ayrılması ve darbenin etki ettiği yüzeyin tersinde fiber kırılması. Polimerik matrisin bu gevrekliği tabakalar arası termal gerilmelerle birlikte düşük sıcaklıklarda tabakalarda oluşur ve darbe yüklemesine maruz kaldığında hasar oluşur ve ilerler (Gomez-del Rio ve diğ. 2005).

Bir çalışmada da $[0/45/90/-45]_{2S}$ 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. Weibull dağılımının teorik modeli ve birleştirilmiş Weibull dağılımı darbe ve yorulma yüklemesine maruz bırakılmış kompozitlerde hasar olasılığını belirlemek için kabul edilmiştir (Tai ve diğ., 1997).

Maksimum yüke ulaşılmadan önce bölgesel tabakalar arası ayrılma gözlemlenmiştir. Düşük-hızlı darbeler için üç farklı enerji (10%, 25%, 40% E_i) kullanılmıştır; analizler yardımıyla, artan darbe enerjisiyle hasar alanının arttığı belirlenmiştir. Bu çalışmada elde edile sonuçlardan, düşük-hızlı darbe yüklemesinin karbon/epoksi kompozitinin yorulma davranışını etkilediği görülmüştür (Gomez-del Rio ve diğ. 2005).

Deneysel çalışma sonuçlarından simetrik olmayan ve çapraz katmanlı kompozitlerin düşük hızlı darbelere karşı tek yönlü katmanlara göre daha iyi dayanım gösterdiği görülmüştür. Tüm kompozit tabakalarda, matris ve fiber-matris ara yüzey bozulmasına işaret eden yüzey çatlak yolu üst katmanın fiber dizilimini izlemiştir. Simetrik olmayan ve çapraz katmanlı kompozitlerde gözle görülebilen büyük yüzey çatlakları (çukurları) oluşmuştur (Morais ve diğ., 2005).

Karbon fiber takviyeli polimer katlı kompozitler mühendislik uygulamalarında en çok aranan yapısal malzemelerdir. Yüksek spesifik rijitlik, yüksek dayanım ve çevresel değişimlere karşı yüksek izafi tolerans gibi mekanik özelliklerine bağlı olarak bu tür malzemeler mühendislik uygulamalarında öne çıkmaktadır. Ne yazık ki, katlı düzlem yönünde itici bir yüklemede çok düşük enerji absorbe yeteneğine sahiptirler. Bu epoksi matrisin kırılganlığı, grafit fiberlerin düşük enine kayma dayanımından ve hasar esnasında oluşan düşük genlemeden kaynaklanmaktadır (Salehi-Khojin ve diğ., 2007).

Fiber takviyeli kompozitlerin çatlak türünü belirlemede kullanılan lineer elastik kırılma mekaniği uygulaması kırılma analizinde kabul edilen bir yaklaşımdır. Hem

deneysel hem de analitik olarak yapılmış birçok metot kompozit malzemelerin ömrünü kırılma dayanımıyla açıklamıştır (Dash ve Chatterjee, 2004).

Gevrek veya sünek, homojen ya da kompozit, tüm malzemelerdeki kırılma az ya da çok çatlaklar, boşluklar gibi mikroskobik süreksizlikler ve kusurlardan kaynaklanmaktadır. Malzemenin dayanımı kırılma enerjisine, elastisite modülüne, ve kırılmaya sebep olan çatlağın büyüklüğüne bağlıdır. Bir dış yük etkisinde malzemenin kırılma dayanımı, çatlak ilerlemesine karşı malzemenin direncini ve kırılma davranışını belirlemede esas rolü üstlenmektedir. Malzeme, yapısının en son dayanımı ve kırılma davranışını incelemeden kullanılmamalıdır (Dash ve Chatterjee, 2004).

Karbon fiber takviyeli kompozitler uzay ve havacılık sanayisinde geniş bir uygulama alanı bulmaktadır. Bu yüzden kompozit malzemelerin kırılma davranışının tahmini ve kırılma davranışını anlamak daha fazla öneme sahip olmuştur. Fiber takviyeli kompozitlerin çatlak türünü belirlemede kullanılan lineer elastik kırılma mekaniği uygulaması kırılma analizinde kabul edilen bir yaklaşımdır. Hem deneysel hem de analitik olarak yapılmış birçok metot kompozit malzemelerin ömrünü kırılma dayanımıyla açıklamıştır (Dash ve Chatterjee, 2004).

2.1.5. Polimer kompozitlerin hidrotermal davranışları

Kompozit malzemeler üstün kullanım yetenekleri ve üstün mekanik özellikleriyle endüstride ve günlük yaşamımızdaki yerini çoktan almıştır. Teknolojik gelişmelerin hızını ve kapasitesini göz önüne alırsak yakın gelecekte yaşamımızda daha da çok yer alacağı kaçınılmazdır.

Birçok kullanım avantajları ve üstünlüklerinin yanı sıra her malzemenin olduğu gibi polimer malzemelerinde bir takım eksiklikleri vardır. Bunlardan bir tanesi de polimer matrisli kompozit malzemelerin çevresel faktörlerden kolay etkilenmesidir. Çevresel faktörlerden (nem, sıcaklık, ültraviyole ışınlar, radyasyon, kimyasal reaksiyonlar,

çeşitli kimyasal çözeltiler v.b) etkilenen kompozit malzemelerin mekanik, fiziksel ve termal özelliklerindeki değişimlerin incelenmesi tasarım süreci için çok önemli bir husustur. Bu konuda araştırma yapan Selzer ve Friedrich (1996), kompozit malzemelerin özelliklerinden tam olarak yararlanmak için değişik koşullar altındaki davranışlarının belirlenmesi gerektiğini vurgulamışlardır. Fiber takviyeli polimer gibi polimer matrisli kompozitlerin mekanik özellikleri önemli ölçüde nem emilimine ve sıcaklığa bağlıdır (Johns ve diğ. 1983).

Polimer kompozitlerin özellikle uçak gövde malzemesi olarak kullanıldığı bilinmektedir. Bu gövde malzemesi kompozitler uçuş süresi boyunca atmosferik koşullarla karşı karşıya gelmektedir. Uçuş esnasında farklı yükseklikler nedeniyle gövdenin sıcaklığının ani düşüş ve yükselmeleri (-50ºC - +100ºC) termal çevrimleri ve yaşlanmayı doğurmaktadır. Bu termal çevrimler nedeniyle yapı içinde termal gerilmeler oluşmaktadır. Bu nedenle de termal çevrimler uçak gövdesindeki malzemeler için ciddi sorun olmaktadır.

Polimerik malzeme üretimi esnasında malzemenin mekanik yükler altındaki tepkisi tasarlanırken; malzemenin nem ve sıcaklığa karşı oluşacak tepkisi de bu sebepler nedeniyle incelenmelidir. Bu tepki hidrotermal tepki olarak tanımlanmıştır. Bu hidrotermal etki kompozit malzeme yapısındaki bileşenleri yani fiber ve matrisi farklı bir şekilde etkileyecektir. Fiber takviyeli polimerik kompozitlerde hidrotermal çevrimin etkisi iyi dokümante edilmiştir (Chung, K., Seferis, J.C.,2000).

Fiber takviyeli epoksi tabakalarda fiber ve matris malzemeleri için ısı ve nem etkili genleşmeler belirgin bir şekilde farklıdır. Kompozit malzemelerdeki termal gerilmelerin oluşumu birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir.

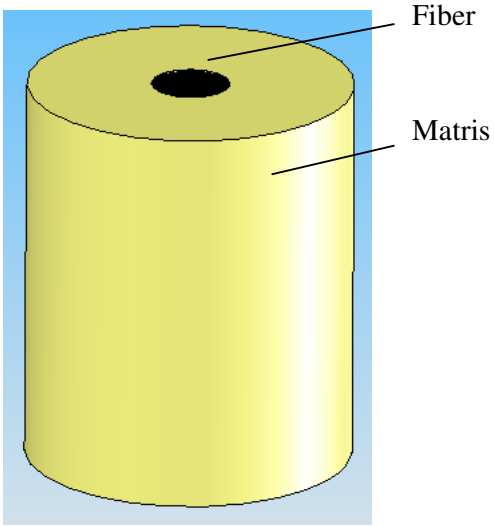
Bu konuyla ilgili bir araştırma yapan Abedian ve Szyszkowski (1997) kompoziti oluşturan bileşenlerin (fiber-matris) birbirinden bağımsız genleşmelerinin dikkate alınması gerektiğini, matrisin fiberden daha fazla genleştiğini ifade etmişlerdir.

Sıcaklık değişimleri esnasında fiber/matris etkileşimini anlayabilmek için bir model geliştirilmiştir (Yılmaz 2006). Şekil 2.20 a'da gösterilen fiber ve matrisi temsil eden geometrik şekillerden oluşan bu model Yılmaz (2006) tarafından analiz edilmiştir.

Yılmaz, fiber ve matris birbirine yapışık halde olmazsa sıcaklık değişimleri esnasında termal genleşme katsayılarına bağlı olarak serbestçe radyal ve eksenel yönde genleşeceği veya büzüleceğini, fiber ve matrisin birbirine yapışık olması halinde ise termal çevrimin soğutma prosesi esnasında modelin eksenel yönde çekme gerilmesine maruz kalacağını belirtmiştir. Bunun sebebi olarak da matrisin fiberden daha fazla büzülmesi olduğunu ifade etmiştir. (Şekil 2.20 b).

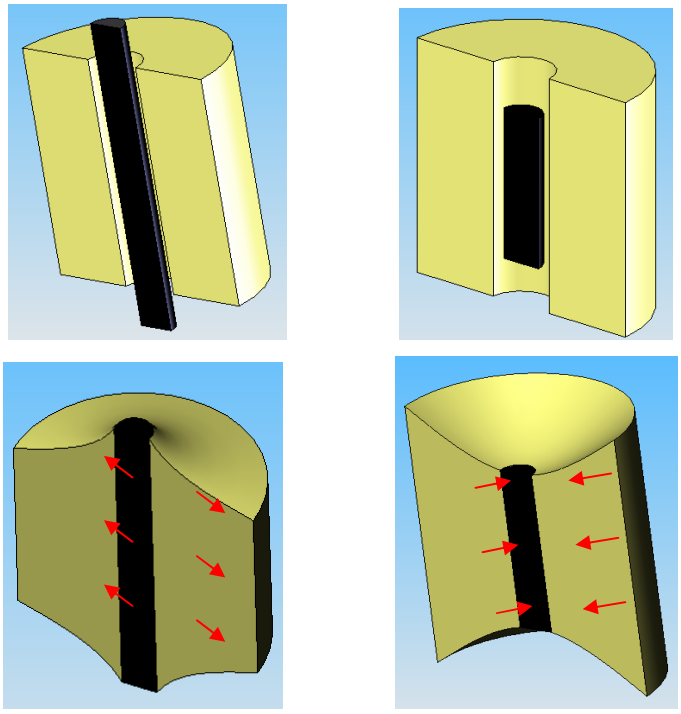
Yılmaz, ısıtma prosesi esnasında ise matrisin fibere nazaran daha fazla genleşeceğini dolayısı ile modelin eksenel basma gerilmelerine maruz kalacağını vurgulamıştır (Şekil 2.20 c). Serbest bir yüzeyin varlığının eksenel gerilmelerin ortadan kalkmasına neden olacağı belirtilmiştir.

Sonuç olarak fiber/matris ara yüzeyinde soğutma prosesi esnasında çekme, ısıtma prosesi esnasında ise basma şeklinde radyal gerilmeler oluşmaktadır (Yılmaz 2006).



a) Fiber-matris modeli

Şekil 2.20. Sıcaklık değişimleri esnasında fiber/matris etkileşimini anlayabilmek için geliştirilen model (Yılmaz, 2006)



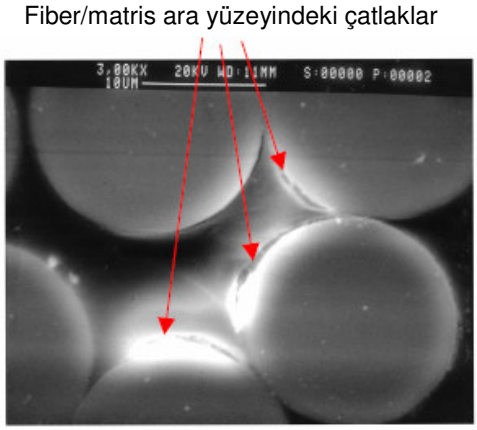
b) Soğutma prosesi c) Isıtma prosesi

Şekil 2.20. (Devamı) Sıcaklık değişimleri esnasında fiber/matris etkileşimini anlayabilmek için geliştirilen model (Yılmaz, 2006)

Buna rağmen kevlar fiber ve karbon fiber takviyeleri düşük termal genleşme katsayılarına sahiptirler. Hatta negatif değerleri vardır, sıcaklığın artmasıyla da çok az büzülme gösterirler. Örnek olarak; kevlar 49 fiberi yaklaşık $-2*10^{-6}$ mm/ºC termal genleşme katsayısına sahiptir buna rağmen karbon fiberlerinki 0,5 ile $-0,5*10^{-6}$ mm/ºC arasında değişim göstermektedir (Scheirs 2000).

Termal yük altındaki bir plakada her bir katmanların farklı şekilde deforme olma eğilimleri vardır. Birçok matris malzemesi için ve özellikle polimer matrisler için nemin artmasının özelliklere etkileri, sıcaklık artmasının etkileriyle oldukça benzerlik göstermektedir. Emilen nemin varlığı ve hidrotermal bozulmanın eğilimi günümüzün gelişen bazı kompozitlerini sınırlayan en önemli faktördür (Scheirs 2000). Nem, polimer matrisli kompozit malzemelerin bütün unsurlarını etkilemektedir. Sözü edilen unsurların en önemlileri matris, fiber-matris ara yüzeyi ve fiberin kendisidir.

Özelliklerin değişimi plastikleştirme kombinasyonları ve nemin neden olduğu şişme sonucu mekanik hasarlar şeklinde olabilir. Birçok polimer ve reçine (örneğin epoksi reçine) yüksek rutubetli ortamlardaki nemi emmektedirler. ompozit sistemlerde reçine malzemesinin atmosferdeki neme bağlı olarak nemi emme veya kendi nem içeriğini azaltma gibi eğilimi vardır. Tek yönlü bir kompozit tabaka için nemli koşulların değişimi altındaki tepki ısıl tepkiye benzerdir; tabakanın fiberin enine yönündeki genleşmesi fiber doğrultusundaki genleşmesinden daha büyüktür. Kompozit tabakalardaki ısı iletiminin nemin emiliminden daha hızlı olduğunu vurgulamak önemlidir. Sıcaklık etkili genleşmelere ek olarak, kompozit malzemeler özellikle reçine bazlı matris sistemliler çevreden emdikleri nem ile genişlerler Ayrıca tek yönlü kompozit katmanlarında hidrotermal kayma deformasyonları oluşmaz (Gürdal,1999). Kompozit malzemelerin su emilimi birçok faktöre bağlıdır bunlar; sıcaklık, fiber hacim oranı, takviyenin dizilimi (yönlenmesi), fiber doğası (geçirgenlik-geçirgen olmaması), etkilenen alanlar, yayılma gücü, suyla matris ve yüzey koruması arasındaki reaksiyon (Petrick ve diğ., 1996). 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 bilinir (Hull ve Clyne, 1996). Su, kompozit içine düzlemsel difüzyon ile veya anizotropik (eşyönsüz) difüzyonla girebilir. Kompozitlerdeki su emilimi ara yüzey boyunca yayılmaya meyillidir. Kompozit içine su emilimi şişmeyi artırır ve iç kısımlarda matrisin gerilme çatlamasına neden olan gerilme yığılmalarını artırmaktadır (Şekil 2.21).



Şekil 2.21. Fiber/Matris ara yüzeyinde nemin etkisiyle oluşan çatlaklar (Jungkuist, 2000)

Su moleküllerinin polimer yapı içine yayılması, makro molekülleri uzaklaştırmaya zorlar; öyle ki malzeme genleşir veya şişer (Salin, 1994). Zincir ayrılmalarındaki bu artış; ikincil moleküller arası bağlantı kuvvetlerinin düşmesiyle sonuçlanır ve bu sonuçla da malzeme yumuşar ve daha sünek olur (Shirrell ve Halpin, 1977, Browning ve diğ., 1977). Plastikleşme aynı zamanda malzemenin camsı geçiş sıcaklığının düşmesiyle sonuçlanır ve elastomerik bölgeyi daha düşük sıcaklıklara öteler bu nedenle polimerin dayanımını düşer (Earl, J.S., Shenoi R.A.,2005, Scheirs 2000). Buna ek olarak fiber takviyesi boyunca su varlığı ara fazların kimyasal olarak bozulmasından dolayı ara yüzeysel ayrılmaya neden olur.

Fiber/matris ayrılmasının; suda çözünen maddelerin fiber yüzeyinden süzülmesinden dolayı fiber yüzeyindeki osmotik basınç paketlerinin gelişimiyle başladığı belirtilmektedir (Springer, 1981). Yüksek sıcaklıklardaki yüksek nem oranı etkisiyle hem zincir bağları kopacağından hem de Tg düşeceğinden kırılma deformasyonları görülme olasılığı mutlaka artacaktır (Scheirs, 2000). Başka bir çalışmada da su emiliminin PEI matrisi ve fiber/matris ara yüzeyinin bozulması sonucu tabakalar arası kayma dayanımını düşürdüğü rapor edilmiştir (Hussain ve Nihara, 1999).

Polimerik kompozit malzemelerin sıcaklıkla birlikte neme maruz kalması oluşacak bozulmayı daha da ciddi bir duruma getirmektedir. Belirli kritik sıcaklıklarda nemin neden olduğu gerilmelerden dolayı kompozit içinde oyuk oluşumunu artıran olgu termal şok özelliği olarak nitelendirilmiştir (Scheirs, 2000).

Termal şartlarda ve farklı yükleme durumlarında kullanılan fiber tipi ve dizilimi karbon fiber takviyeli polimer kompozitlerin davranışında önemli bir rol oynar. Her katmanda karbon fiberlerin dizilimini farklı olduğu bantlı katmanlarda (quasi-isotropik ve çapraz tabakalı) termal etki şiddetli olmaktadır. Bu tip malzemelerde düşük sıcaklık, tabakalar arası artık termal gerilmeleri oluşturur; kompozit malzemede tabakalar arası ayrılmayla birlikte düşük hızlı darbe esnasında matris çatlaklarını yaratır. Örgü tabakalı kompozitlerde ise termal değişkenlik tabakalar arası gerilmelere sebep olmaz ve darbeden sonra hasarın gelişmesi düşük hızda gerçekte artmaz (Gomez-del Rio ve diğ. 2005).

Yapılan bir başka araştırmada $[0/45/90/-45]_{2S}$ yönlü karbon/epoksi plakalar düşük-hızlı darbeye maruz bırakılmıştır. Bu plakalara değişik darbe enerjileri uygulanmış ve darbe etkidikten sonra yorulma ömrü ve artık dayanım test edilmiştir. Darbeli ve darbesiz kompozitlerin yorulma dayanımı ölçülmüştür. Weibull dağılımının teorik modeli ve birleştirilmiş Weibull dağılımı darbe ve yorulma yüklemesine maruz bırakılmış kompozitlerde hasar olasılığını belirlemek için kabul edilmiştir (Tai ve diğ., 1997).

Termal çevrim durumunda yüksek sıcaklıkta çapraz katmanlı karbon fiber takviyeli polimer AS4/PEEK malzemesinde matris çatlağı görülmüştür ve hasarın gelişimi bir hasar-mekanik analizi ile analiz edilmiştir. Tüm katmanlarda, -196–250^{o} C çevriminde matris çatlağı yoğunluğu 0^{o} katmanlarına göre 90^{o} katmanlarında yaklaşık olarak iki kat fazla olmuştur. Hasar mekanik analizi her katmanda matris çatlağını göz önüne alarak enerji salıverme oranı ve ortalama enine gerilmeleri hesaplamada kullanılmıştır. İnce katmanlarda matris çatlağı için Paris kanunu yaklaşımının etkili olduğu ve kalın katmanlar için ortalama gerilme yaklaşımının etkili olduğu görülmüştür (Kobayashi ve diğ., 2001)

Çok eksenli karbon fiber takviyeli polimer tabakalardaki darbe hasarı ve gelişme davranışı incelenmiş, optik enine kesik gözlemlemesi ve ultrasonik tarama aygıtıyla malzeme üzerindeki darbe hasarları belirlenmiştir. Yorulma testi ve darbe hasarı olduktan sonra genelde tabakalar arası ayrılmalar darbenin etkidiği noktadan dikine ilerlemiştir. Enine-kesit gözlemleriyle, darbenin etkidiği noktanın yanındaki enine çatlakların çatlağın ilerlemesiyle birleştiklerini göstermiştir (Saito ve Kimpara, 2006).

Polyetherethercetone (PEEK) çevresel etkilere karşı direnci ve iyi mekanik özellikleri nedeniyle ileri bir termoplastiktir. Sonuçta, karbon/PEEK kompozitinin yüksek performans özellikleri havacılık endüstrisinde karbon/epoksi kompozitiyle yarışır hale getirmiştir. Havacılık endüstrisinde kullanılan polimerik kompozitler için, malzemenin termal yükleme çevirimine maruz kalacağı açıktır. Termal yorulma

diye adlandırılan yükleme düşük-hızlı yorulmadır çünkü termal yorulma çatlakları 50,000 çevrimden sonra oluşmaya başlar (Tai ve diğ., 1999).

Kompozitler havacılık endüstrisinde kullanılırken, mekanik yorulma ve termal yorulma gibi yüklemelere maruz kalırlar ve düşük-enerjili darbeler malzemede hasarı başlatan unsur olabilir. Karbon/PEEK kompoziti, düşük-enerjili darbeyle etkilenmiş katmanların yorulma davranışının ve mekanik özelliklerin değişiminin üzerinde termal çevrimin etkisi görmek amacıyla test edilmiştir (Tai ve diğ., 1999).

Darbe etkiyen levha yüzeyine bir kevlar veya hibrit tabakası birleştirerek oluşturulan plakaya ve üç kat karbon fiber katlı kompozit plakaya -50^{o} C ila 120^{o} C arasındaki sıcaklıkta 15,25 ve 45 J değerindeki enerji seviyelerinde düşük hızlı darbeler uygulanmıştır. Maksimum absorbe enerjisi, çarpma performansı, gerilmeyi karşılama ve kesme gerilmesi araştırılmış, ve darbe testlerinden sonra artık basma dayanımlarını belirlemek için basma uygulanmıştır (Salehi-Khojin ve diğ., 2007).

Bir başka araştırmada, sıcaklık kevlarla grafitin hibrit birleşimi ve grafitin darbe davranışını önemli ölçüde etkilemiştir. Yüksek enerji seviyesinde kompozit plakanın alt yüzeyinde penetrasyon oluşurken, artan sıcaklıkla maksimum absorbe edilen enerjinin miktarı karbon-karbon ve karbon-kevlarda artmış karbon-hibritte ise azalmıştır (Salehi-Khojin ve diğ., 2007).

Farklı çentik boyutuna sahip çeşitli çevresel etkilere maruz bırakılmış karbon fiber takviyeli kompozitler için yapılan deney sonuçları şu şekilde sıralanmaktadır;

- Kırılma dayanımı çatlak büyüklüğüne bağlıdır.
- Çevresel etkilerin mekanik özelliklere ve kırılma dayanımına büyük bir etkisi vardır. Çeşitli çevresel etkilerin etkimesinden sonra kırılma dayanımı testlerinin başında ayrılma ve tabakalar arası ayrılmalar oluşmuştur. Bu olgu çekme yüklemesinde numunelerin tamamen hasara uğramasına neden olmaktadır.

- Sıcaklığın matris ayrılmasına gözle görülür bir etki ettiği gözlenmiş ve malzemenin esas dayanımını düşürmüştür.

Sıvı ortam durumunda, malzemeye nem difüzyonunun miktarı önemli bir etkidir. Osmotik basınç ve malzemedeki boşluklar gibi özelliklere bağlıdır (Dash ve Chatterjee, 2004).

BÖLÜM 3. MALZEME VE YÖNTEM

3.1. Kullanılan Malzeme

3.1.1. Malzeme hakkında genel bilgiler

Sürekli karbon fiber takviyeli Polieterimid (SKF-PEI), yüksek ısı direncine ve sertliğe sahip olan amorf yapılı termoplastik kompozittir. Yapısı gereği bu malzeme düşük duman oluşturması nedeniyle yüksek yanma direncine sahiptir.

Bu malzeme havacılık endüstrisinde hem gövdede hem de içyapıda kullanılmaktadır. Reçine konvansiyonel termoplastik kalıp ekipmanında işleme tabi tutulur. Enjeksiyon kalıp uygulamalarında erime sıcaklığı $660-800°F$ 'dir. Kalıp sıcaklığı ise $150-350°F$ arasında olmalıdır (www.tencate.com).

3.1.2. PEI malzemesinin özellikleri

Üretici firmadan getirtilen PEI malzemesinin bütün özellikleri Tablo 3.1'de geniş bir şekilde gösterilmiştir.

Tablo 3.1. PEI malzemesinin özellikleri (www.tencate.com)

Spesifik yoğunluk	1,27 gr./cm^3	Eğilme dayanımı	138 MPa
T_g (Camsı geçiş sıcaklığı)	215 °C	Eğilme modülü	3,450 MPa
Erime sıcaklığı	300 °C	Kesme dayanımı	103 MPa
Nem emilimi	% 1,25	Poisson oranı	0,44
Çekme dayanımı	105 MPa	Izod çentiksiz	1,335 J/m
Çekme modülü	% 7 uzamada 3,276 MPa	Izod çentikli	53,4 J/m
Basma dayanımı	152 MPa	Termal iletkenlik	0.067W/m-°K
Basma modülü	3,310 MPa		

3.1.3. Deneyde kullanılan kompozit malzeme hakkında bilgiler

Deneylerde kullanılan sürekli karbon fiber takviyeli polieterimid (PEI) kompozitler sıcak presleme yöntemiyle üretilmiş halde Ten Cate Advanced Composites (Nijverdal/Hollanda) firmasından tedarik edilmiştir.

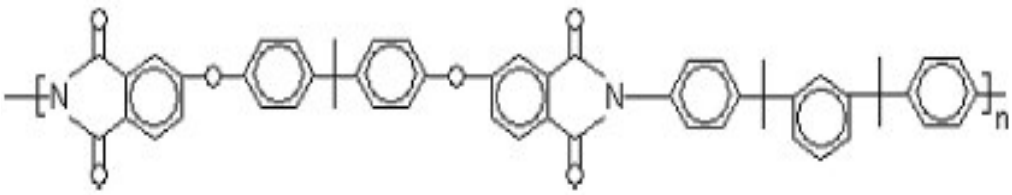
Poliakrilonitril (PAN) bazlı karbon fiberler kompozit plakalarda (T300 12 K 309 NT tipi) kullanılmak üzere Amoco tarafından üretilmiştir. Fiber hacim oranı % 60'tır. Plakalar, her birinin ağırlığı 222 g/m^2 ve kalınlığının 0,14 mm olan 14 tabakadan oluşmaktadır.

Plakanın ticari kodu CD5150'dir. Kompozit tabakanın mekanik özellikleri Tablo 3.2'de verilmiştir.

Tablo 3.2. Sürekli karbon fiber takviyeli PEI kompozit malzemesinin mekanik özellikleri (Sınmazçelik ve Arıcı, 2006)

	-55°C	23°C	80°C	Metod
Çekme dayanımı (0°) (MPa)	1583	1890	1728	ASTM D3039
Çekme modülü (0°) (GPa)	131	128	127	ASTM D3039
Basma dayanımı (0°) (MPa)	936	876	814	ASTM D3039
Basma modülü (0°) (GPa)	120	119	120	ASTM D3410
Kesme dayanımı (MPa)	121	104	94	ASTM D3518
Kesme modülü (MPa)	4395	3208	2744	ASTM D3518
Eğilme dayanımı (MPa)	-	1289	1072	ASTM D790
Eğilme modülü (GPa)	-	99	100	ASTM D790

PEI malzemesinin kimyasal yapısı Şekil 3.1'de gösterilmiştir (Sınmazçelik ve Arıcı, 2006).



Şekil 3.1. PEI malzemesinin kimyasal yapısı (Sınmazçelik ve Arıcı, 2006)

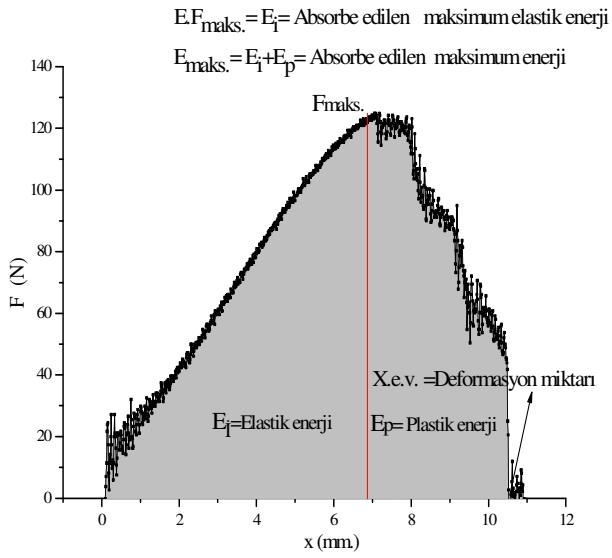
3.2. Uygulanan Deneysel Yöntem ve Standartları

3.2.1. Darbe testi

3.2.1.1. Genel açıklamalar

Darbe testi yüksek-hızlı yüklemeler altında malzemenin davranışını belirleyen test sistemidir. Darbe testi yüksek hızda kırılan malzemede enerji absorbsiyonunu belirlemek için yapılan bir deneydir. Birçoğumuz bu deneyin, bir nesnenin yüksek hızda diğer bir nesneye çarptığı bir metot olduğunu bilmekteyiz.

Darbe direnci bir tasarımcı için malzeme seçimi yaparken göz önünde bulundurması gereken en önemli özelliklerden biridir. Birçok uygulamada bir parçanın darbe direnci servis ömrü için kritik bir ölçüttür. Şekil 3.2'de darbe testi esnasında gerçekleşen yük-zaman eğrisi gösterilmektedir.

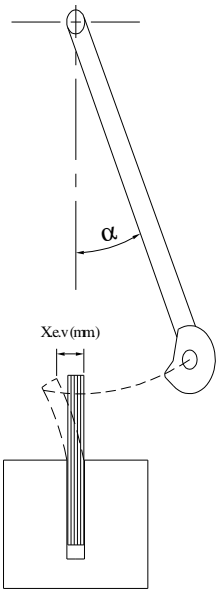


Şekil 3.2. Deneylerde belirtilen büyüklüklerin F-x grafiğinde sembolik olarak gösterimi

Şekil 3.2'de sembolik olarak çizilen kuvvet-deplasman (F-x) grafiğinde deneylerde yorum yapılmasına yardımcı olan büyüklükler gösterilmiştir. F-x grafiğinin altında kalan alan numunenin test esnasında absorbe ettiği toplam enerji ($E_{maks.}$) miktarıdır. Bu alanın büyüklüğü fazla ise uygulanan darbeye karşı gösterilen direnç yüksektir. Darbe testlerinde numunelere farklı enerjilere sahip tekrarlı darbeler uygulanmıştır ve numunelerin darbelere gösterdiği direnç incelenmiştir.

3.2.1.2. İzod darbe deneyi (Çentiksiz izod)- ASTM D4812 VE ISO 180

Kullanımı: Çentiksiz izod darbesi salınım hareketi yapan sarkaç ile malzemeye darbe uygulayarak malzemenin direncinin ölçüldüğü tekil nokta testidir. İzod darbe testi malzeme kırılıncaya kadar, kırılma başlangıcı ve kırılmanın devam etmesi için gereken kinetik enerjiyi belirler. Bu test çok hızlı uygulanır ve malzemenin spesifik darbe özellikleri ve malzemenin rijitliği arasında kıyaslama yapmak için kullanılan bir testtir. Bu test yöntemiyle kırılmaya karşı polimer malzemelerin direnci belirlenir. Bu test yönteminin sonuçları numunenin kalınlığıyla değişen absorbe edilen enerji miktarını gösterir (ASTM D 4812 – 06, 2007).



Şekil 3.3. İzod darbe test düzeneği (ASTM D 4812-06 , 2007)

Test Yöntemi: Dikdörtgen geometrili numune Şekil 3.3'te görüldüğü gibi tutucu çeneler arasına yerleştirilir. Test numunesinin malzemesine ve boyutuna göre, uygun çekiç ağırlığı ve darbe enerjisi belirlenir. Çekiç bırakılacağı yüksekliğe ayarlanır. Sonuçların alınacağı programın girdileri girildikten sonra çekiç bırakılır ve numuneye çarpar. Eğer kırılma olmazsa, hasar oluşuncaya kadar daha ağır bir çekiç yada daha yüksek çekiç açısı kullanılır (ASTM D 4812 – 06, 2007).

Kullanılan çekiç: Çekiç, çarpma ucunu içeren ve numuneye belli bir yükseklikten bırakılan cisimdir. Çekiçteki numuneyle temas eden çarpma burnu, sertleştirilmiş çelikten imal edilmiş olup sarkacın sallandığı düzleme yatay duran 0.80 ± 0.20 mm' lik bir yarıçapa sahip silindirik bir yüzeydir (ASTM D 4812–06, 2007).

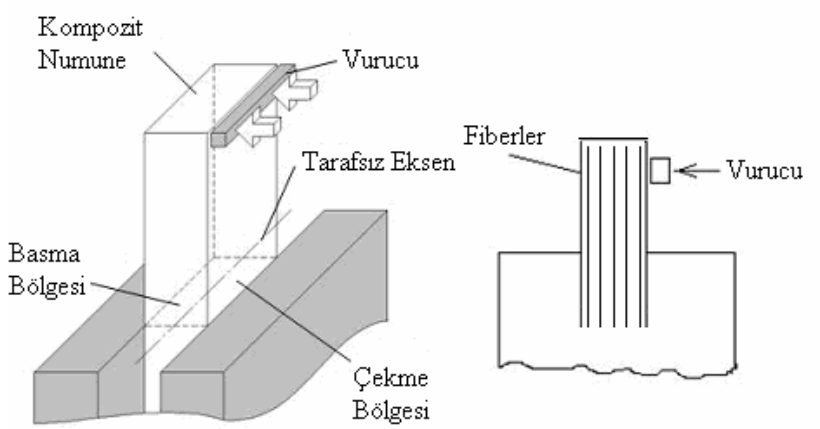
Test numunesi: ISO ve ASTM'de belirlenmiş ve çentiksiz izod darbe testinde kullanılan test numunelerinin boyutu Tablo 3.3'de gösterilmiştir.

Tablo 3.3. ASTM ve ISO standartlarında belirlenmiş çentiksiz izod darbe testinde kullanılan test numunelerinin boyutu

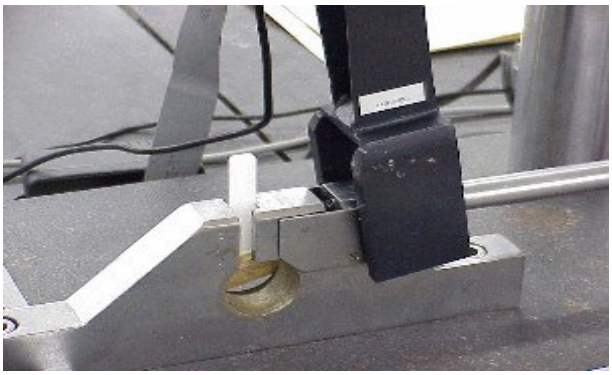
Test numunesi	ASTM (mm)	ISO (mm)
Uzunluk	64	80
Genişlik	12,7	10
Kalınlık	3,2	4

Veriler: ASTM darbe enerjisi J cinsinden okunmaktadır. Test sonuçları için en az beş numune kullanılmalıdır. ISO darbe dayanımı J/m^2 cinsinden okunmaktadır. Darbe dayanımı J cinsinden darbe enerjisinin çentikli bölgenin olduğu yerdeki alana bölünmesiyle hesaplanmaktadır. Test sonuçları için en az beş numune kullanılmalıdır (ASTM D 4812–06, 2007).

Deneyin yapılışı: Deneyler Ceast firmasının Resil 25 model sarkaç tipi cihazı ile yapılmıştır. İzod tipi test numuneleri ISO 180 standartlarına göre hazırlanmıştır. Çentiksiz numuneler ISO standartları toleransı kabulünde 10×2×65 mm boyutlarına sahiptir. Bu çalışmada malzemelerin belirli bir darbe enerjisine sahip kaç adet tekrarlı darbe sonrası hasara uğrayacağını tespit etmek için bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Çalışılacak çekiç açısı ve enerjisini belirlemek için bir ön çalışma yapıldı ve bu çalışma sonucunda 0,54 J–0,94 J darbe enerjileri arasında çalışılmasına karar verildi. Numunelerin cihaza yerleştirilme şekli şematik olarak Şekil 3.4 ve 3.5'te verilmiştir.



Şekil 3.4. Çentiksiz izod numunesinin sarkaç tipi Ceast Resil 25 test cihazına yerleştirilmesi



Şekil 3.5. Numunesinin sarkaç tipi Ceast Resil 25 test cihazında çekiç darbesine maruz kalışı

3.2.2. Dinamik mekanik termal analiz (DMTA)- ASTM D4065, D4440, D5279

3.2.2.1. Genel açıklamalar

Dinamik mekanik termal analiz (DMTA); malzemelerin viskoz ve elastik davranışlarını anlatan dinamik ve termal malzeme özellikleri hakkında bilgi veren bir tekniktir.
DMTA ölçümleri sıcaklığa bağlı olarak aşağıdaki özellikleri verir:

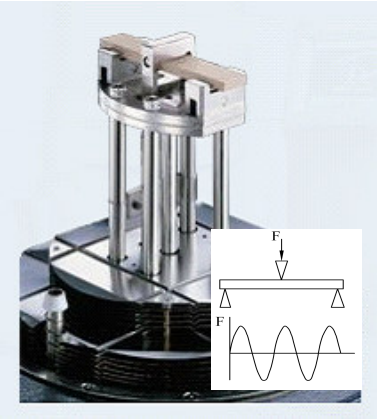
- polimerin ne kadar enerji depoladığını gösteren elastik modülü (E')
- polimerin ısıl olarak enerji dağıtabilme kabiliyetini gösteren viskoz modülü (E'')

E' ve E'' sırasıyla dinamik depolama modülü ve dinamik kayıp modülü olarak da ima edilir ve ilki malzemenin rijitliğini diğeri ise malzemenin içindeki enerji sönümleme kabiliyetini anlatır. Dinamik mekanik analiz (DMA) elastik modül (veya depolama modülü, E') , viskoz modül (veya kayıp modül, E'') ve iki modül arasındaki ilişkiyi ($Tan\delta$), ısıtma hızının, frekansın veya zamanın fonksiyonu olarak belirleyen test sistemidir. Sonuçlar genelde sıcaklığa göre E', E'' ve $Tan\delta$ olarak çizilir. DMA polimerlerde camsı geçiş sıcaklığı gibi değişimleri belirler ve ürün geliştirme veya kalite kontrol amaçlı kullanılır. DMA, DSC'nin (Diferansiyel taramalı kalorimetre) çözünürlüğünün belirleyemediği küçük değişim bölgelerini bile belirleyebilmektedir.

Test yöntemi: Test numunesi sabit ve hareketli tutucular arasına yerleştirilir ve sonra fırın içine kapatılır. Test numunesi için deney girdileri frekans, genlik ve sıcaklık aralığıdır. Test numunesinin tutucu çeneler arasına nasıl yerleştirildiği ve deney esnasında çenenin nasıl hareket ettiği Şekil 3.6'da gösterilmiştir.

Numune boyutu: Test numuneleri ISO çok amaçlı test numunesidir. Boyutu standartlar toleransı kabulünde 15x5x2 mm'dir (ASTM D4065,2007).

Test modu: Üç nokta eğme modu seçilerek deneyler yapılmıştır. DMTA çalışmaları 25°C –200°C aralığında 5°C/dakika ısıtma hızı ve 1 Hz'lik eğme frekansı ile yapılmıştır (Şekil 3.6).



Şekil 3.6. Dinamik mekanik ısıl analizler esnasında kullanılan üç nokta eğme testi düzeneği ve bu düzeneğe tespit edilmiş numune

Deney Cihazı: Dinamik mekanik ısıl analizler için TA Instruments firmasının ürettiği DMTA Q800 tipi cihaz kullanılmıştır (Şekil 3.7).



Şekil 3.7. DMTA cihazı

Birçok önemli polimer özelliği camsı geçiş sıcaklığında (Tg) hızlı bir şekilde değişim gösterir. Bir tasarımcıya göre bir polimerin Tg'si onun en yüksek servis sıcaklığını belirtir. Amorf polimerler Tg değerlerinin yaklaşık 30–50 ºC üzerinde yumuşama davranışı sergilerler (Scheris, 2000).

Bu dinamik testte zamanın periyodik fonksiyonu olan genlemedeki değişimler ölçülür. Yorulma testlerinin aksine, dinamik mekanik özellikler kalıcı deformasyonların olmadığı düşük genlemelerde ölçülür. Dinamik test elemanları birçok deformasyon ve frekans modundaki işlemler için kullanılabilirler (çekme, burulma, basma, eğme ve kayma) (R.Fried, 2003).

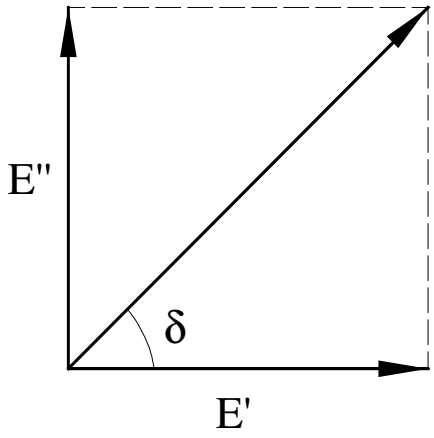
Eğer bir sinüs dalga salınımlı gerilim tamamen elastik bir katıya uygulanırsa deformasyon ve genleme gerilmeyle birlikte tamamen aynı fazda olacaktır. Aynı sinüs dalga salınımlı gerilim viskoelastik bir katıya uygulanırsa genleme gerilmenin gerisine düşer ve δ açısı kadar faz kayması gerçekleşir yani girdi ile yanıt arasında faz farkı oluşmaktadır Belirli bir frekansta (ω=2πf) zamanın fonksiyonu olarak uygulanan gerilme aşağıda verilmiştir:

$$\sigma(t) = \sigma_0 . Sin(\omega t + \delta) \tag{3.1}$$

Karışık dinamik modül (E*; uzama modunda) şu şekilde kullanılabilir:

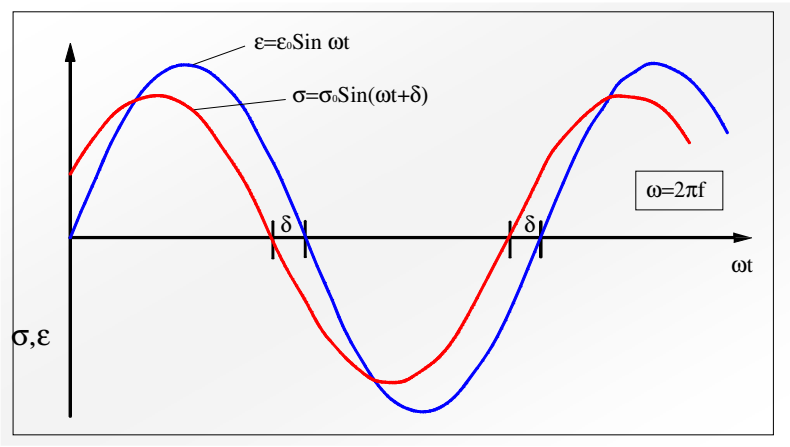
$$E^* = E' + i.E'' \tag{3.2}$$

Bu ifade $i = \sqrt{-1}.E'$ olduğu zaman geçerlidir. Kayıp enerjinin depolanan enerjiye oranı tan delta (kayıp faktör) olarak adlandırılan faz açısının tanjantıdır. Bu eşitlik $\tan\delta = \frac{E''(\omega)}{E'(\omega)}$ şeklinde tanımlanmıştır. Çok iyi bilinen modüller arasındaki bu ilişki Şekil 3.8'de gösterilmiştir.



Şekil 3.8. Depolama modülü EI, kayıp modül EII, dinamik modül E* ve kayıp faktör tan δ arasındaki dinamik mekanik ilişki

Şekil 3.9'da gerilme genliği (ε) ile gerilme (σ) arasındaki faz açısı farkı açıkça görülmektedir. Aşağıdaki şekilde ilk önce gerilme değeri daha sonra belirli bir gecikme ile gerilme genliği değeri sıfır olmaktadır.



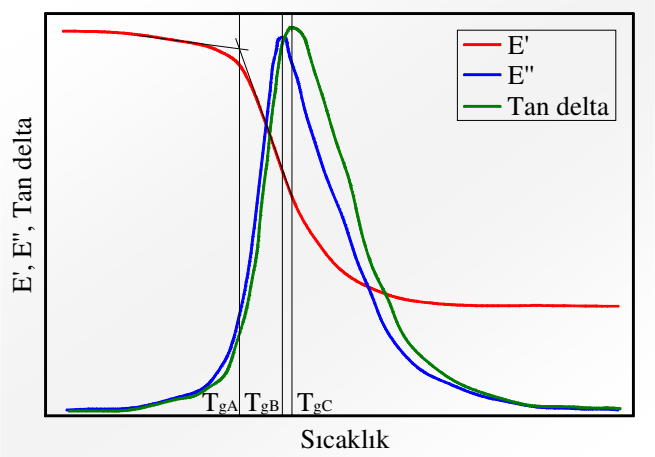
Şekil 3.9. Uygulanan frekans (f) değerinde sinüzoidal değişime sahip gerilme genliği (ε) ile gerilme (σ) arasındaki faz açısı, (δ), farkı

Modül değerleri sıcaklıkla beraber malzemenin moleküler yapısındaki hareketler nedeniyle değişirler. Polimerlerin zincir hareketleri ve özellikle camsı geçiş sıcaklığı, modülü ve tanδ'yı etkileyecektir. Frekans aralığı genellikle 0,01 ve 100 Hz arasındadır (J.Haines, 1995)

3.2.2.2. Camsı geçiş sıcaklığı

Camsı geçiş sıcaklığı (Tg) polimer malzemelerin karakteristik bir özelliğidir. Bu nedenle polimerleri daha çok Tg'leri ile tanımlarız. Tg, camsı halden lastiksi hale geçiş sıcaklığı olduğu için bu sıcaklığın üzerindeki sıcaklıklarda iç hareketlilik artar, malzeme yumuşar, bunun sonucu olarak da çok önemli olan fiziksel ve mekanik özellikler önemli derecede değişir. Tüm bu sayılan nedenlerle Tg, polimer malzemeler için çalışma sıcaklığını ve şartlarını kısıtlayan en önemli faktördür. Bu karakteristik değer ayrıca üretim proseslerinde de birçok faktöre yön vermektedir. Camsı geçiş sıcaklığı (Tg), polimer malzemede kristalleşmenin başladığı sıcaklıktır. Polimer esaslı malzemelerde kristalleşme sonrasında moleküler boyutta devinimler oldukça artar ve makro düzeyde kararsızlık görülür. Tg'nin altındaki çalışma sıcaklıklarında polimer camsı özellikler gösterir. Yani endüstriyel anlamda kullanım aralığındadır. Camsı geçiş sıcaklığı Tg, bir polimer esaslı malzemenin, yumuşak veya sert olduğuna karar verilen sıcaklıktır. Tg'nin altındaki sıcaklıklarda polimer sert yani camsı yapıdadır. Tg'nin üzerindeki sıcaklıklarda ise polimer yumuşaktır. Bu yumuşaklık pek arzu edilmez çünkü bu durundaki bir polimer esaslı malzeme tamamen kullanım dışıdır. Tg aşıldıktan çok sonra yani epey yüksek sıcaklıklarda polimer, lastiksi özelliklerinden sıyrılarak sıvı benzeri bir davranışa geçer. Bu durum özellikle sakınılan bir durumdur.

DMTA analizi ile elde edilen veriler olan depolama modülü, kayıp modül ve tanδ sıcaklığın fonksiyonu şeklinde ele alınmaktadır. Tipik DMTA eğrileri Şekil 3.10'da gösterilmiştir. Camsı geçiş sıcaklığı bu eğrilerin herhangi birinden, depolama modülü eğrisinin ilk büküm noktasından (T_{gA}), kayıp modül eğrisinin tepe noktasından (T_{gB}) veya tan delta (tan δ) eğrisinin tepe noktasından (T_{gC}) bulunabilir. Yukarıda sıralanan her bir metot ile elde edilen (T_g) değerleri birbiriden farklıdır Li ve diğ. (2000). Bu farklılık T_g değerlerinde 25^oC'lik değişim yaratabilir (Menard, 1999). ASTM D 4065 standardı T_g değeri olarak kayıp modül eğrisinin tepe noktası olarak alınması gerektiğini belirtmektedir (ASTM, 2004).

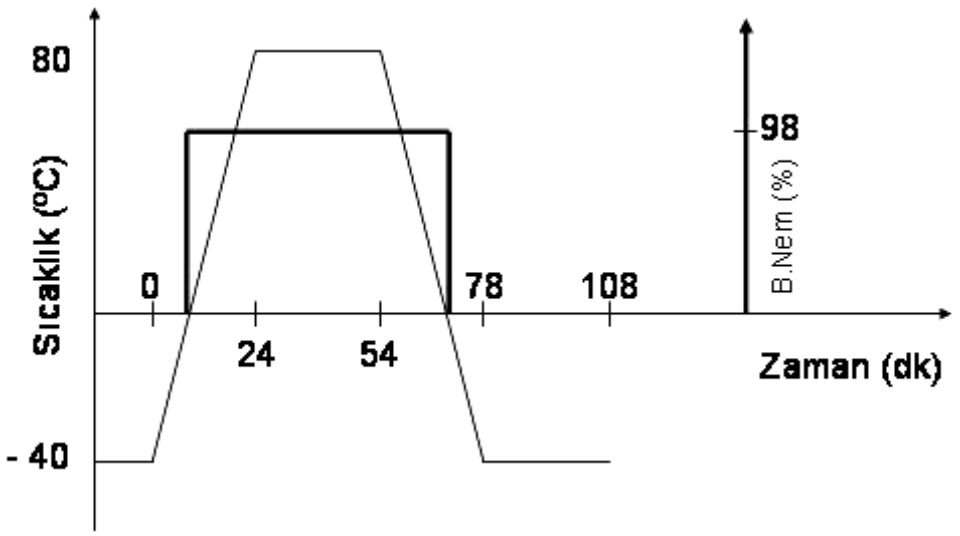


Şekil 3.10. Tipik DMTA diyagramı (Yılmaz, 2007)

Bu çalışmada orijinal numuneler ile hidrotermal yaşlandırmaya maruz bırakılmış karbon/PEI kompozitlerin dinamik mekanik ısıl analiz yöntemi ile camsı geçiş sıcaklığındaki (T_g) değişimler araştırılmıştır.

3.2.3. Klimatik yaşlandırma işlemi

Polimer matrisli kompozit malzemeler havacılık endüstrisinde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Uçaklar uçuşları esnasında önemli ölçüde sıcaklık, nem, hızlı sıcaklık düşüş ve yükselmeleri, hava kirliliği, uv ışınımı vb. gibi çevresel şartlara maruz kalmaktadır. Bu hava şartları kompozit yapıyı önemli derecede etkiletmedirler. Bu iklim şartlarından sıcaklık ve nemin kompozit yapı üzerindeki etkisi araştırılmak üzere bilgisayar kontrollü test cihazında bu iklim şartları taklit edilmiştir (Şekil 3.11). Klimatik yaşlandırma için numune boyutları değiştirilmemiştir yani çentik darbe standardına göre alınmıştır. Klimatik yaşlandırma işlemi; Weiss-WK 180/40 model iklimlendirme test kabininde gerçekleştirilmiştir. Her biri 108 dakika süren toplam 532 çevrim yapılmıştır.



Şekil 3.11. Klimatik kabinde gerçekleştirilen yaşlandırma işlemi programı

Programda -40ºC'den başlayan sıcaklık 24 dakikada +80ºC'ye çıkarılırken 0ºC'den sonra nem devreye girmektedir. Sıcaklık +80ºC'de 30 dakika sabit tutuluyor bu esnada bağıl nem oranı %98 olmak suretiyle etkimeye devam ediyor. 54. dakikadan sonra sıcaklık 80ºC'den -40ºC'ye 24 dakikada düşürülüyor. 0ºC'nin altında bir nemin olmadığı program çalıştırılıyor. Sıcaklık son olarak -40ºC'de 30 dakika sabit tutuluyor ve bir klimatik yaşlandırma çevrimi tamamlanmış oluyor.

Klimatik yaşlandırma işlemi sonunda malzemeler kabinden çıkartılıp bir günlüğüne laboratuar atmosferinde kurumaya bırakılmıştır. Klimatik yaşlandırma sonucu darbe davranışlarındaki değişimleri incelemek üzere malzemeler çentik darbe deneylerine tabi tutulmuştur.

3.2.4 Termal yaşlandırma İşlemi

Uçakların uçuşları esnasında karşılaştıkları nem ve sıcaklık ani değişimlerinin etkilerini araştırmak üzere termal yaşlandırma işlemi hazırlanmıştır. Sürekli Karbon Fiber Takviyeli PEI Kompozit numuneler; laboratuar şartlarında hazırlanan bir kova 0ºC'deki soğuk su ve 100ºC'de kaynar su içine ard arda daldırılarak termal

yaşlandırma işlemi uygulanmıştır. Bu uygulamada termal yaşlandırmaya maruz bırakılacak numuneler bir numune tutacağı içinde toplanıp önce 100ºC'deki kaynar su tankı içine daldırılıp 5 saniye bekletildikten sonra çıkartılıp hemen diğer kovadaki 0ºC'deki soğuk su içine daldırılarak burada da 5 saniye bekletilmiştir. Bu işlem toplam 10 saniye sürmektedir ve bir çevrim olarak adlandırılmışır. Termal yaşlandırma işlemi numunelere 4 farklı çevrimde (50, 200, 500, 1000) uygulanmıştır. Her farklı çevrim sayısına maruz kalan numunelerin mekanik özelliklerindeki değişimler incelenmek üzere bir takım testlere tabi tutulmuşlardır.

3.2.4. Fraktografik inceleme

Polimer kompozit malzemelerin darbe davranışları araştırılmak üzere bir dizi darbe deneyi yapılmıştır. Bu deneylerin sonuçları enerji ve deformasyon miktarları dikkate alınarak irdelenmiştir. Darbeler ve darbeler sırasında numune kesitinin ne tür değişimler gösterdiği mikroskop altında ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir.

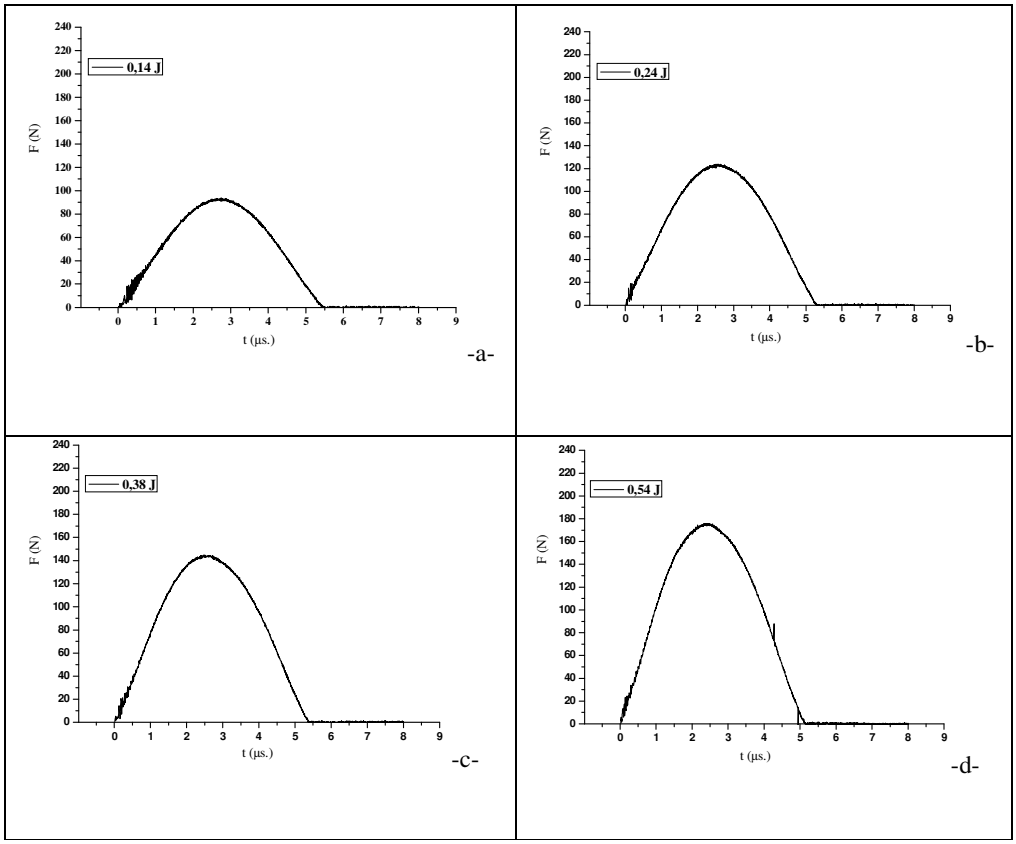
Darbe-yorulma deneyleri sonucu kırılan kesitler taramalı elektron mikroskobu (TEM) altında incelenmek üzere hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler fotoğraf çekimi için taramalı elektron mikroskobuna (JOEL JSM-6335F TEM) yerleştirilmiştir ve fraktografik incelemeler gerçekleştirilmiştir.

BÖLÜM 4. DENEYSEL SONUÇLAR

4.1 Sabit Enerjilerle Tekrarlı Darbelere Maruz Kalan Kompozitlerin Darbe Davranışlarının İncelenmesi

Polimer kompozitler endüstriyel uygulamalarda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu malzemeler kullanıldıkları yerlerde bakım ve servis durumları sırasında küçük ama uzun sürede tehlike yaratabilecek darbelere maruz kalmaktadırlar. Bu darbeler düşük enerjilidirler ancak kullanım süresince tekrarlanmaları ciddi deformasyonlara neden olmaktadır. Bu nedenlerden ötürü polimer kompozitlerin kullanım sürecinde maruz kalacakları düşük enerjili tekrarlı darbelere karşı tepkileri incelenmesi gerekilen önemli bir konudur. Literatür araştırmalarına göre PEI matrisli kompozitler de bu konuyla ilgili çok çalışma bulunmamaktadır. Üretici firmadan temin edilen sürekli karbon fiber takviyeli PEI matrisli kompozit Ceast firmasının enstrumante edilmiş Resil 25 model sarkaç tipi cihazı ile düşük enerjili tekrarlı darbelere maruz bırakılmıştır. İlk olarak çalışılacak darbe enerji aralığını seçmek için bir dizi ön çalışma yapıldı. 0.14 J büyüklüğünde darbe uygulanınca malzemenin elastik tepki verdiği tespit edildi (Şekil 4.1-a). 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 elastik tepki vermiştir. 0,54 J değerindeki enerjiden sonraki 0.57 J enerjili darbeyle malzeme elastik ve plastik tepki vermiştir. Bu nedenle başlangıç darbe enerjisi olarak 0.54 J değeri seçilmiş oldu. Üst değer için başka bir numuneye 2.65 J değerindeki bir darbe uygulandı ve malzeme tek vuruşta kırıldı (Şekil 4.2-d). Darbe enerjisi 2.01 J değerine düşürüldüğünde de malzeme yine bir vuruşta kırıldı (Şekil 4.2-c). Darbe enerjisi 1.44 J değerine düşürüldü ve 10 test yapıldı. Testlerin çoğunda numune kırılmadı fakat numuneyi önemli ölçüde plastik deformasyona uğrattı (Şekil 4.2-b). Darbe enerjisi 0.94 J değerine düşürüldü ve 10 adet test uygulandı. Numunelerin hiçbiri kırılmadı ve önemli ölçüde plastik deformasyona

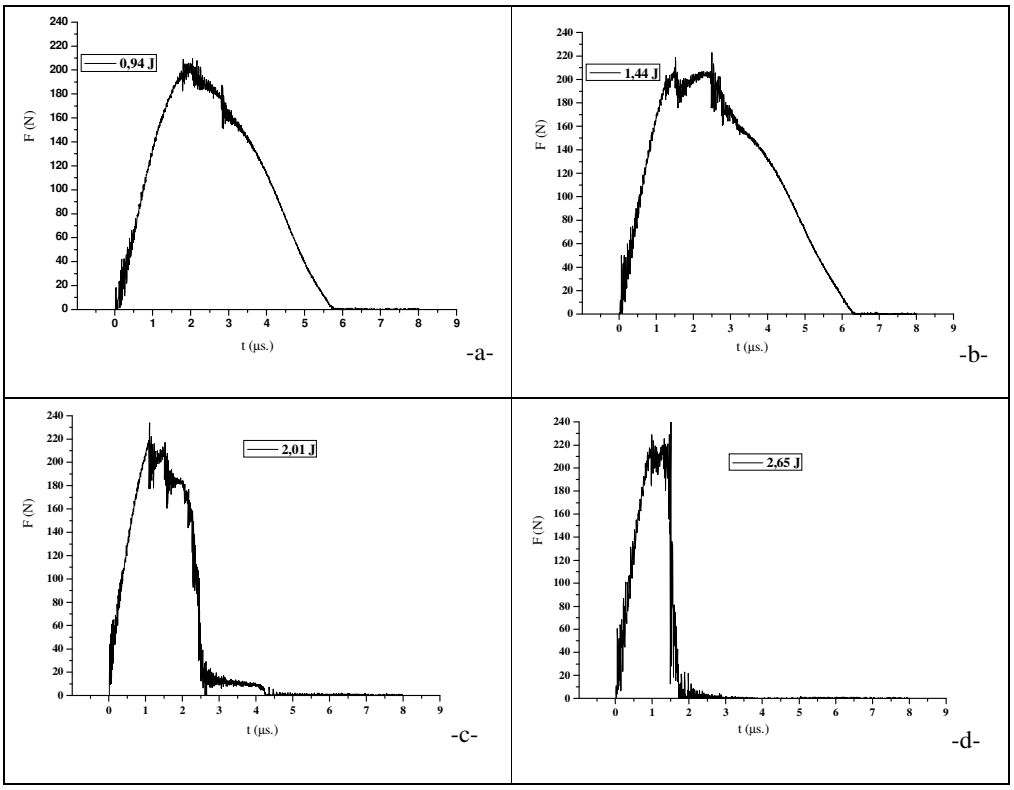
uğradıkları görüldü. Bu nedenle üst darbe enerjisi değeri olarak 0,94 J değeri kabul edildi. Sonuç olarak darbe-yorulma testi için enerjisi aralığı 0.54 J -0.94 J olarak belirlendi.



Şekil 4.1. Numunelerin tamamen elastik deformasyona uğradığı küçük enerjili darbeler (0.14, 0.24, 0.38, 0.54 J)

Çalışılacak darbe enerjisi aralığını belirledikten sonra darbe-yorulma çalışması gerçekleştirildi. Belirtilen darbe enerjisi aralığında sistematik olarak arttırılan 11 adet darbe enerji değeri belirlendi: (0.54, 0.57, 0.61, 0.65, 0.69, 0.73, 0.77, 0.81, 0.85, 0.90 ve 0.94 J). Çekicin bu darbe enerjilerinde numuneye çarpma hızı sırasıyla; 0.93, 0.96, 0.99, 1.02, 1.05, 1.11, 1.14, 1.17 ve 1.20 m/sn'dir. Belirtilen enerjilerdeki darbeler numunelere ardı arda uygulandı. Her bir deney grubunda periyodik olarak kayıt alındı ve veriler bilgisayar ortamında çizilerek grafiksel sonuçlar elde edildi. Grafikler F_{maks}, E_{maks}, $E.F_{maks}$, X.e.v. ve zaman parametrelerine göre çizildi. F_{maks} değeri her bir darbe de ulaşılan en yüksek kuvvet değeridir. E_{maks} değeri her bir

darbede absorbe edilen maksimum enerji miktarını göstermektedir. $E.F_{maks}$ değeri en yüksek kuvvete ulaşıldığı anda absorbe edilen en yüksek enerji miktarıdır. Son olarak da X.e.v. değeri malzemede her bir darbede oluşan maksimum deformasyon miktarıdır. Her bir darbedeki veri alma işlemi 8 μs'dir. Bu sürede toplam 2000 veri alınmaktadır.



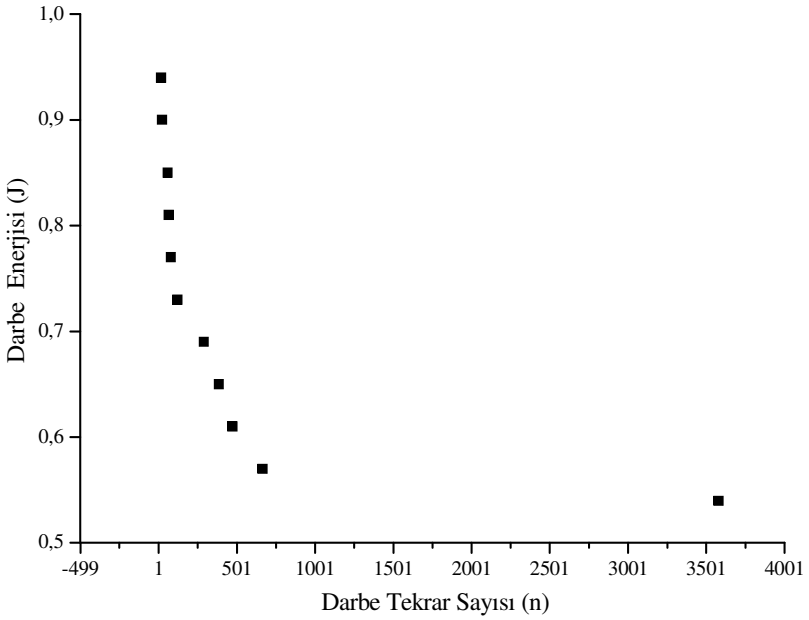
Şekil 4.2. Darbe-Yorulma deneyleri için gerçekleştirilen ön çalışma sonuçları (0.94,1.44, 2.01, 2.65 J)

Malzemeye kalıcı deformasyon yaratmayacak kadar küçük darbe enerjileri seçildikten sonra yapılan çalışmanın sonuçları grafikler ile açıklanılacaktır. Düşük enerjili tekrarlı darbelerin malzemeye uygulanmasıyla malzemede darbe-yorulması meydana gelmektedir. Malzeme darbe enerjisinin büyüklüğü ile orantılı bir tekrar sayısından sonra hasara uğrayıp kırılmaktadır.

Normal numuneler için 11 farklı darbe enerjisiyle yapılan darbe-yorulma deneyi sonuçları Tablo 4.1'de gösterilmiştir.

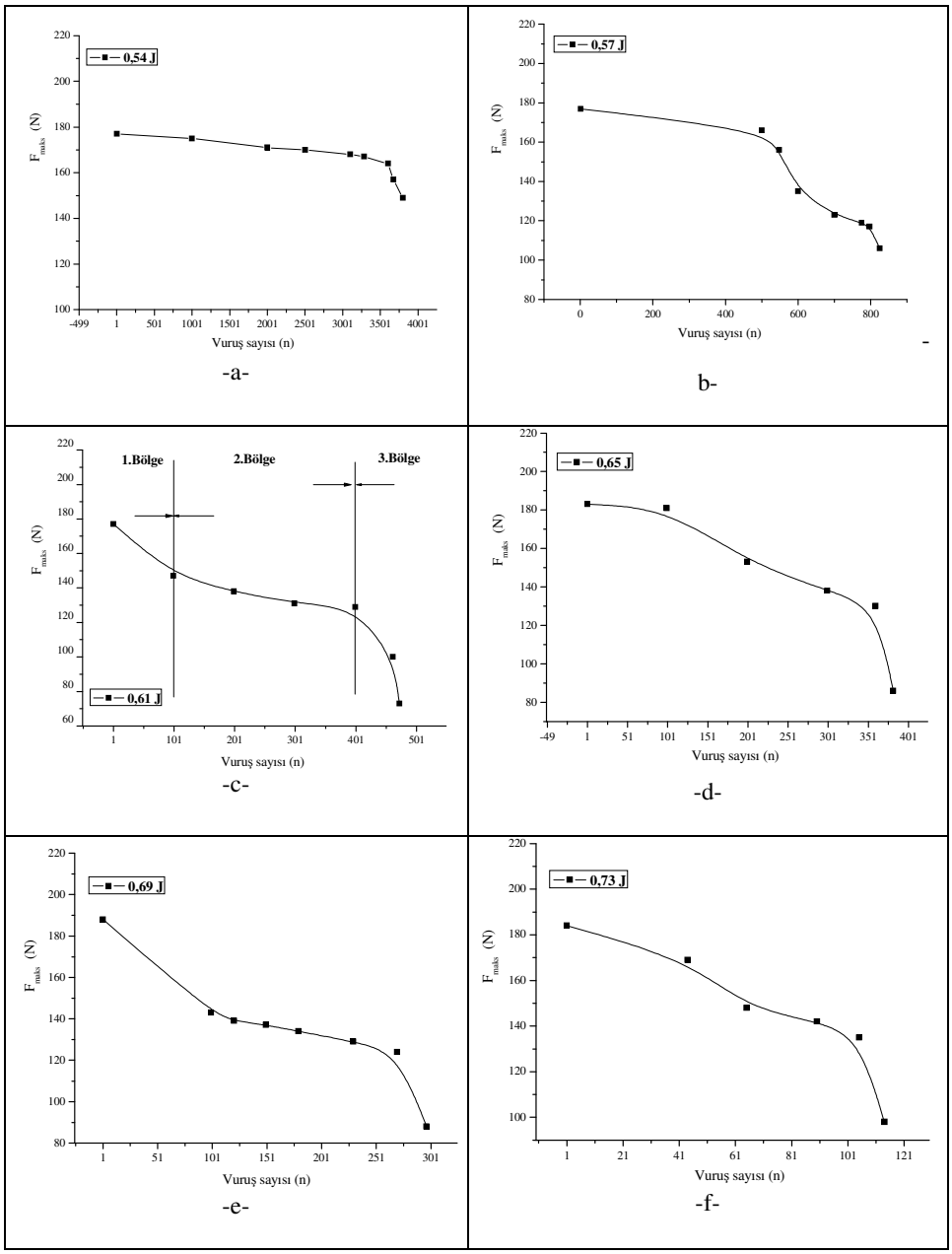
Tablo 4.1. Normal numuneler için darbe enerjisine bağlı olarak değişen kırılma için gerekli darbe tekrar sayılarının karşılaştırılması

Darbe Enerjisi	Numune Kırılıncaya Kadar Uygulanan Darbe Sayısı	Darbe Enerjisi	Numune Kırılıncaya Kadar Uygulanan Darbe Sayısı
0.54 J	3580	0.77 J	80
0.57 J	829	0.81 J	66
0.61 J	473	0.85 J	59
0.65 J	382	0.89 J	43
0.69 J	208	0.94 J	21
0.73 J	122		

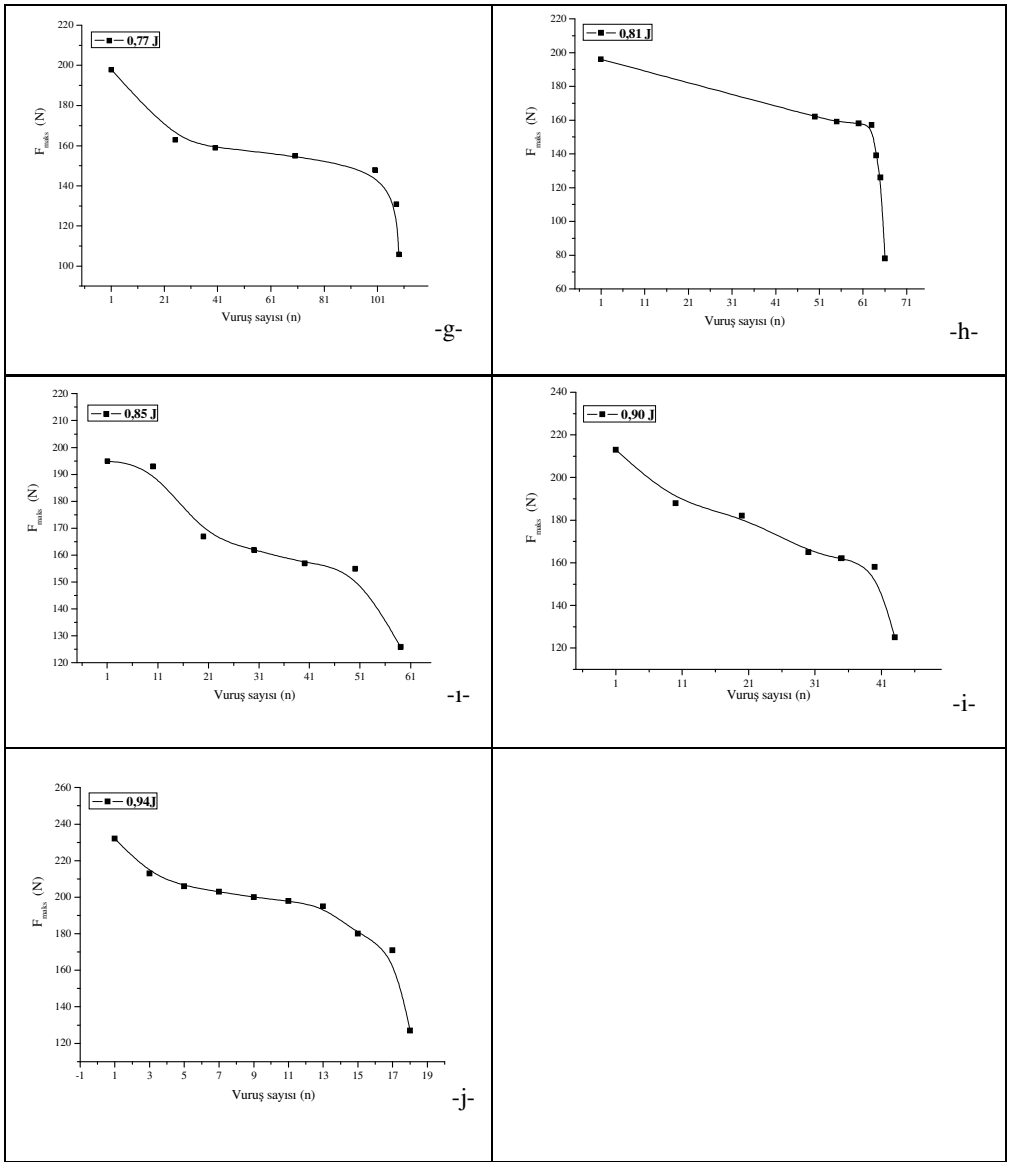


Şekil 4.3. Normal numunenin darbe-yorulma ömür grafiği

Şekil 4.3'te görüldüğü üzere kompozit malzemesinin darbe yorulma ömrü azalan darbe enerjisi değeriyle sonsuza doğru asimptotik olarak artmaktadır. Her bir darbe enerjisi için tekrarlı darbeler sonucu malzeme kırılıncaya kadar çekicin teması ile oluşan F_{maks} değerindeki değişimler grafikler yardımıyla Şekil 4.4'te gösterilmiştir. Darbe enerjisinin artmasıyla darbe tekrar sayısının ve F_{maks} azaldığı görülmüştür.



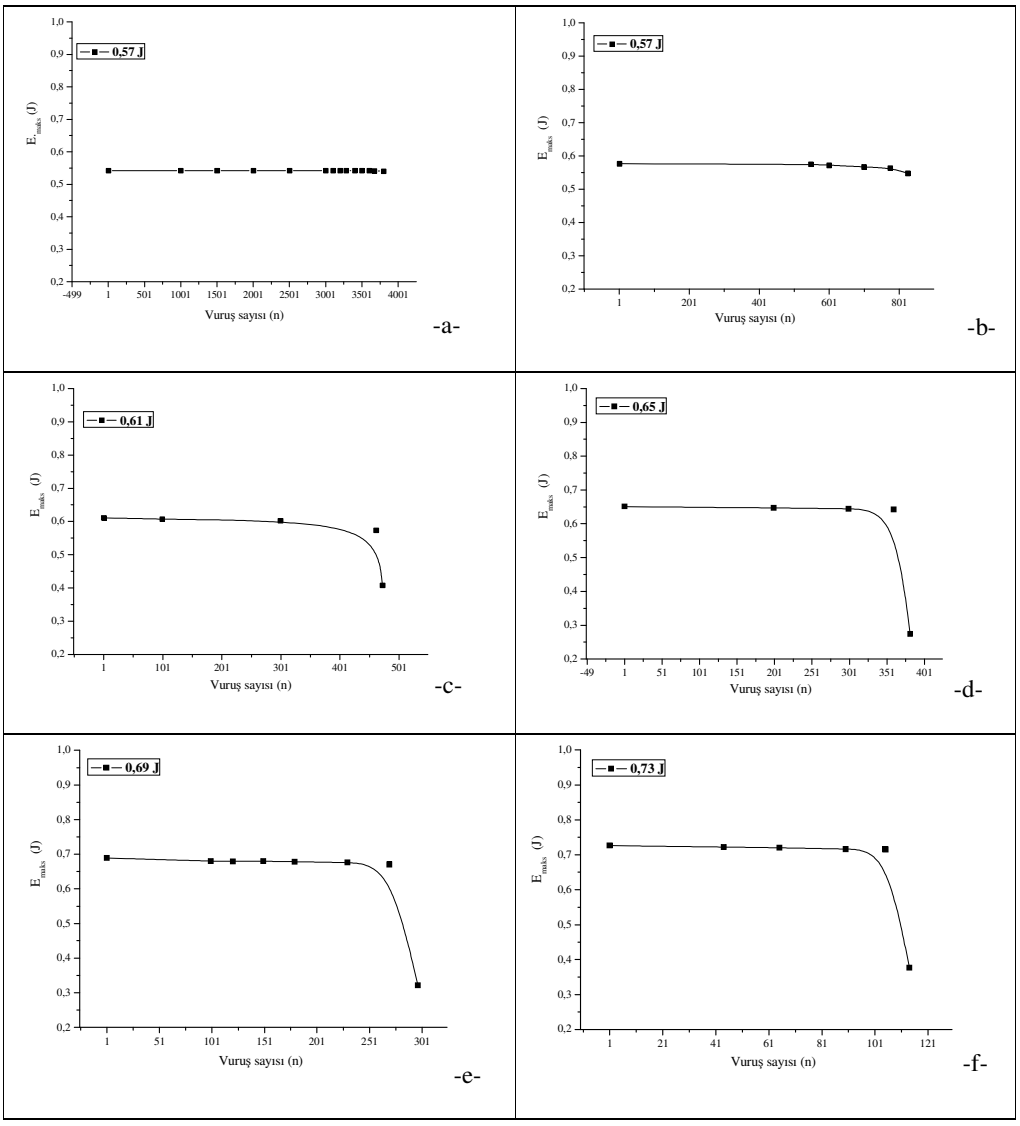
Şekil 4.4. Her bir darbe enerjisi için F_{maks}-Tekrar darbe sayısı grafikleri



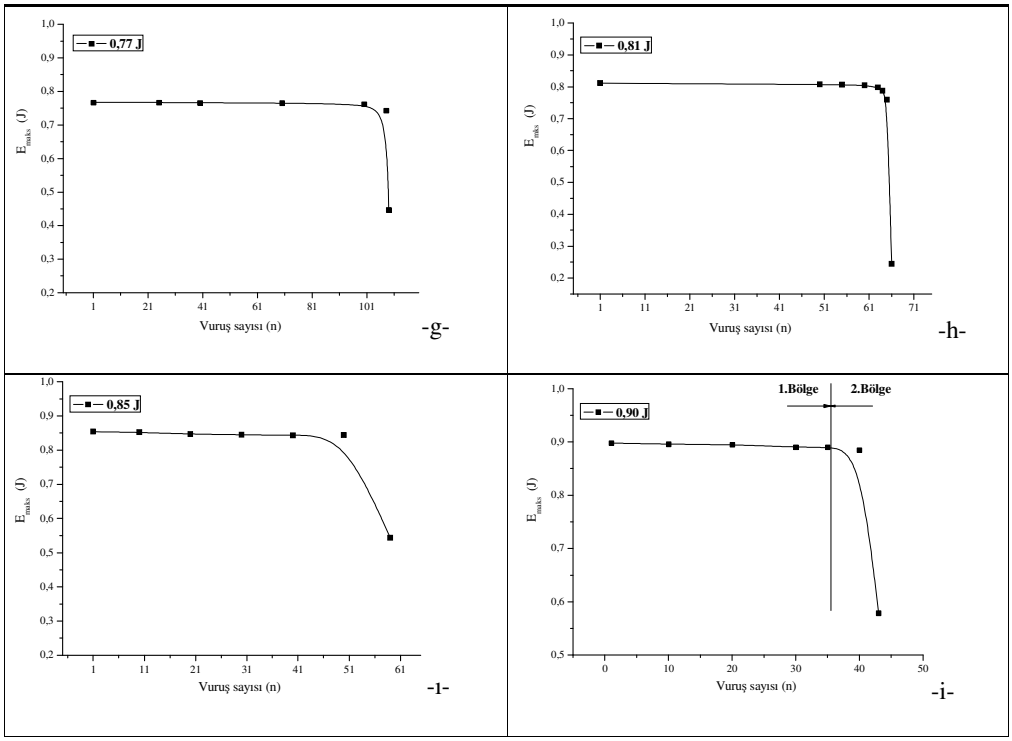
Şekil 4.4. (Devamı) Her bir darbe enerjisi için F_{maks}-Tekrar darbe sayısı grafikleri

Yüksek darbe enerji seviyelerinde beklenildiği gibi ilk vuruşlardan elde edilen F_{maks} değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir. Şekil 4.4'te gösterilen darbe sayısı ile F_{maks}'ın değişimini gösteren grafiklerde üç ayrı bölge oluştuğu tespit edilmiştir. Birinci bölge belirli bir darbe sayısına kadar F_{maks} değerlerinde hızlı bir düşüşün olduğu ve darbe etkisi ile basma bölgesinde ilk fiber hasarlarının oluştuğu bölgedir. İkinci bölge "plato" bölgesi olarak adlandırılan ve birinci bölgede oluşan matris çatlaklarının birleşerek ilerlemesi, fiber-matris ara yüzeyinin soyulması, tabakalar arasında oluşan tabakalar arası ayrılmaların büyümesi ve yenilerinin oluşması gerçekleşmektedir.

Üçüncü bölgede ise artan tekrarlı darbe sayısıyla matris-fiber ara yüzeyinde oluşan tabakalar arası ayrılmalar nedeniyle yeterince desteklenmeyen fiberlere gelen yük miktarı artmış ve fiberler hızla kırılmıştır. F_{maks} değerlerinin vuruş sayısı ile değişmesi ve bu esnada üç ayrı bölgenin oluşumu Şekil 4.4-c'de temsili olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.5. Her bir darbe enerjisi için E_{maks}-Tekrar darbe sayısı grafikleri

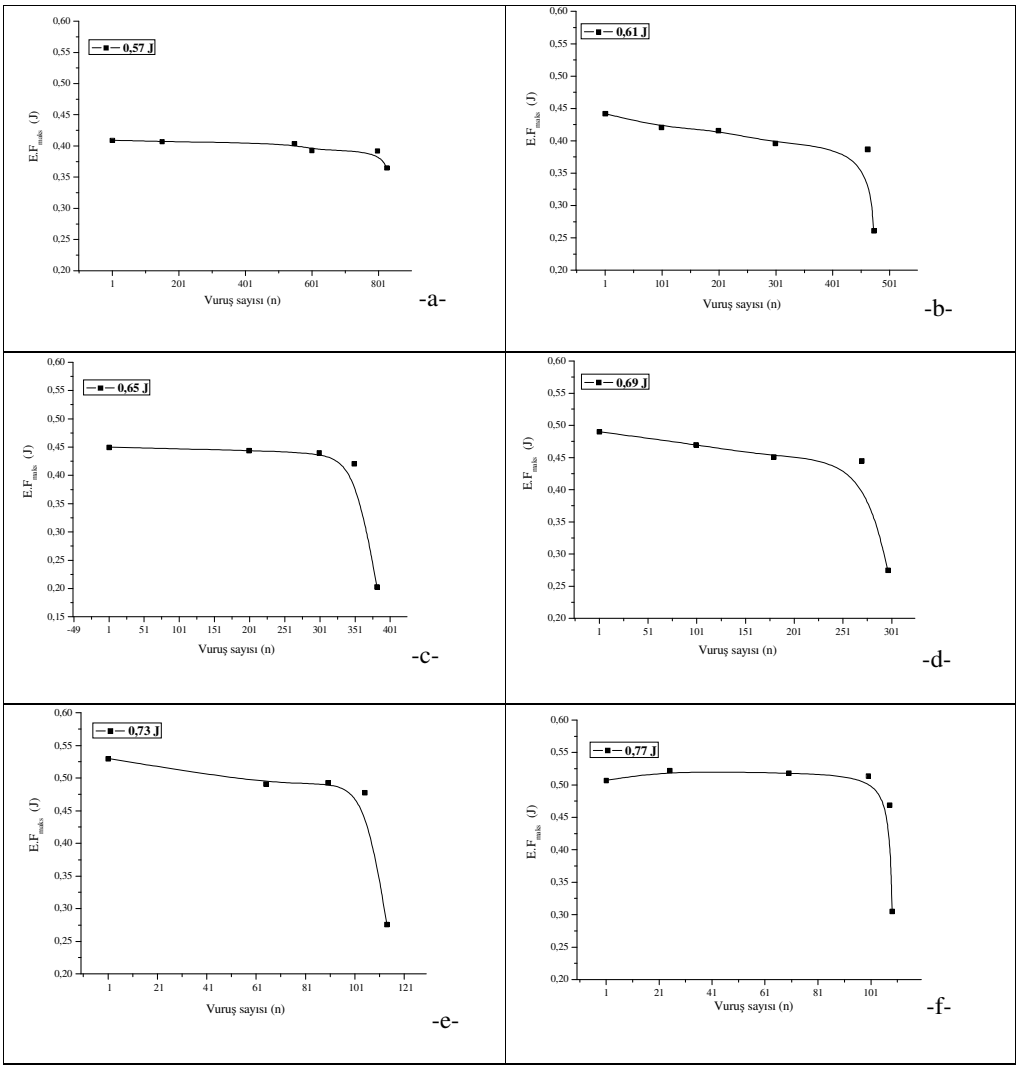


Şekil 4.5. (Devamı) Her bir darbe enerjisi için E_{maks}-Tekrar darbe sayısı grafikleri

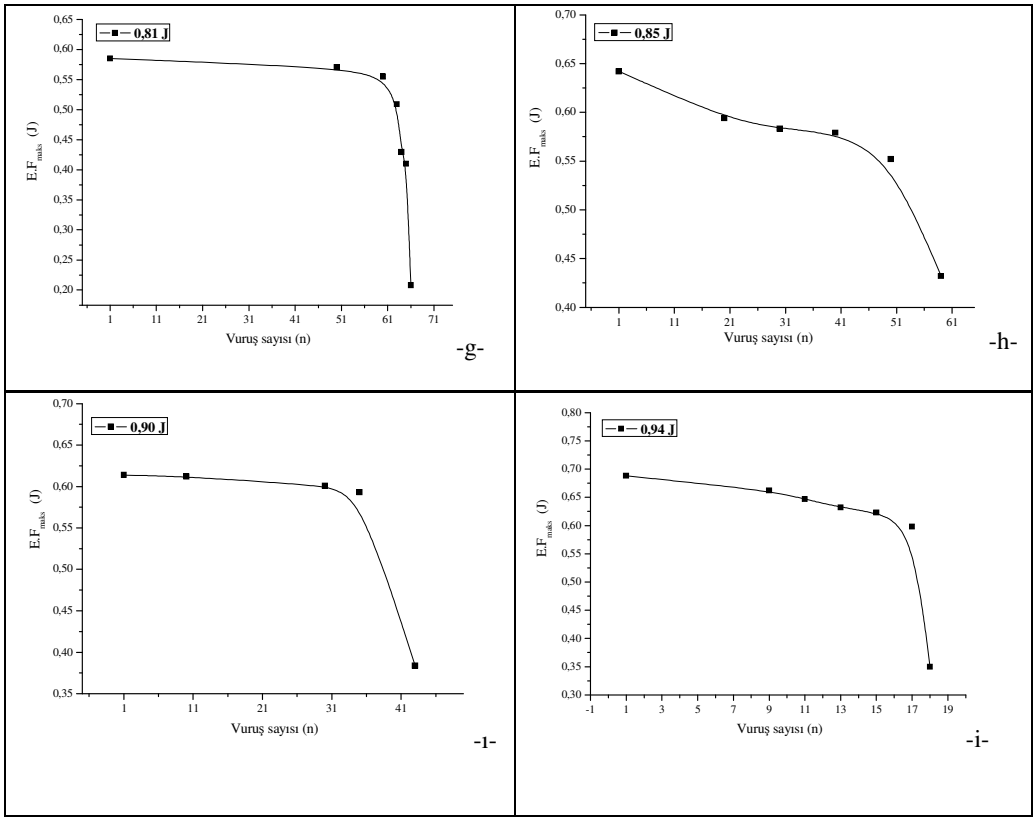
Şekil 4.5'teki çizilmiş grafiklerde, darbe enerjisinin artmasıyla malzemenin hasara uğraması için gerekli olan darbe tekrar sayısı azaldığı görülmüştür. E_{maks} değerleri artan darbe tekrar sayısıyla giderek azalmaktadır. Artan enerji seviyesiyle her bir deney için ilk vuruşlarda elde edilen E_{maks} değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir. Şekil 4.5'te gösterilen E_{maks}- tekrarlı darbe sayısı eğrilerinde iki ayrı bölge bulunmuştur. Birinci bölge belirli bir darbe sayısına kadar maksimum absorbe edilen enerji değişimi yaklaşık olarak sabit kalmaktadır. Bunun nedeni olarak, F_{maks}-tekrar darbe sayısı eğrilerindeki (Şekil 4.4) ilk iki bölgede gerekli olan enerjinin sabit kaldığı gözlenmiştir. E_{maks} değerlerinin ikinci bölgesindeki ani düşüşü ile F_{maks} eğrilerinin üçüncü bölgelerindeki düşüş yaklaşık olarak aynı tekrar sayısında meydana gelmektedir. Buna göre, bu bölgede matris ve tabakalar arası ayrılma hasarlarından sonra fiberlere gelen yükün artmasıyla fiberler dayanamamakta ve absorbe edilen darbe enerjisi nedeniyle kırılmaktadır. Şekil 4.5-i'de E_{maks}-vuruş sayısı eğrisinde oluşan iki bölgenin temsili gösterimi yer almaktadır.

Şekil 4.6'da 0.57–0.94 J arasındaki her bir enerji değeri için $E.F_{maks}$-darbe tekrar sayısı eğrileri çizilmiştir. $E.F_{maks}$ değeri maksimum yükün ortaya çıktığı zamana

kadar absorbe edilen elastik enerji miktarını simgelemektedir. Artan tekrarlı yük sayısı ile birlikte $E.F_{maks}$ değerleri azalmaktadır. Tekrarlı yük sayısındaki artışla birlikte numunelerin F_{maks} değerlerinin azalması nedeniyle $E.F_{maks}$ değerlerinde düşüş meydana gelmiştir. E_{maks}-Tekrar sayısı grafiklerindeki (Şekil 4.5) maksimum E_{maks} değerlerine göre $E.F._{maks}$– Tekrar sayısı grafiklerindeki (Şekil 4.6) maksimum $E.F_{maks}$ değerleri yaklaşık olarak yarıya düşmektedir. Bunun sebebi, $E.F._{maks}$ değerlerinin elastik sınırlar içindeki alanı ifade etmesidir.



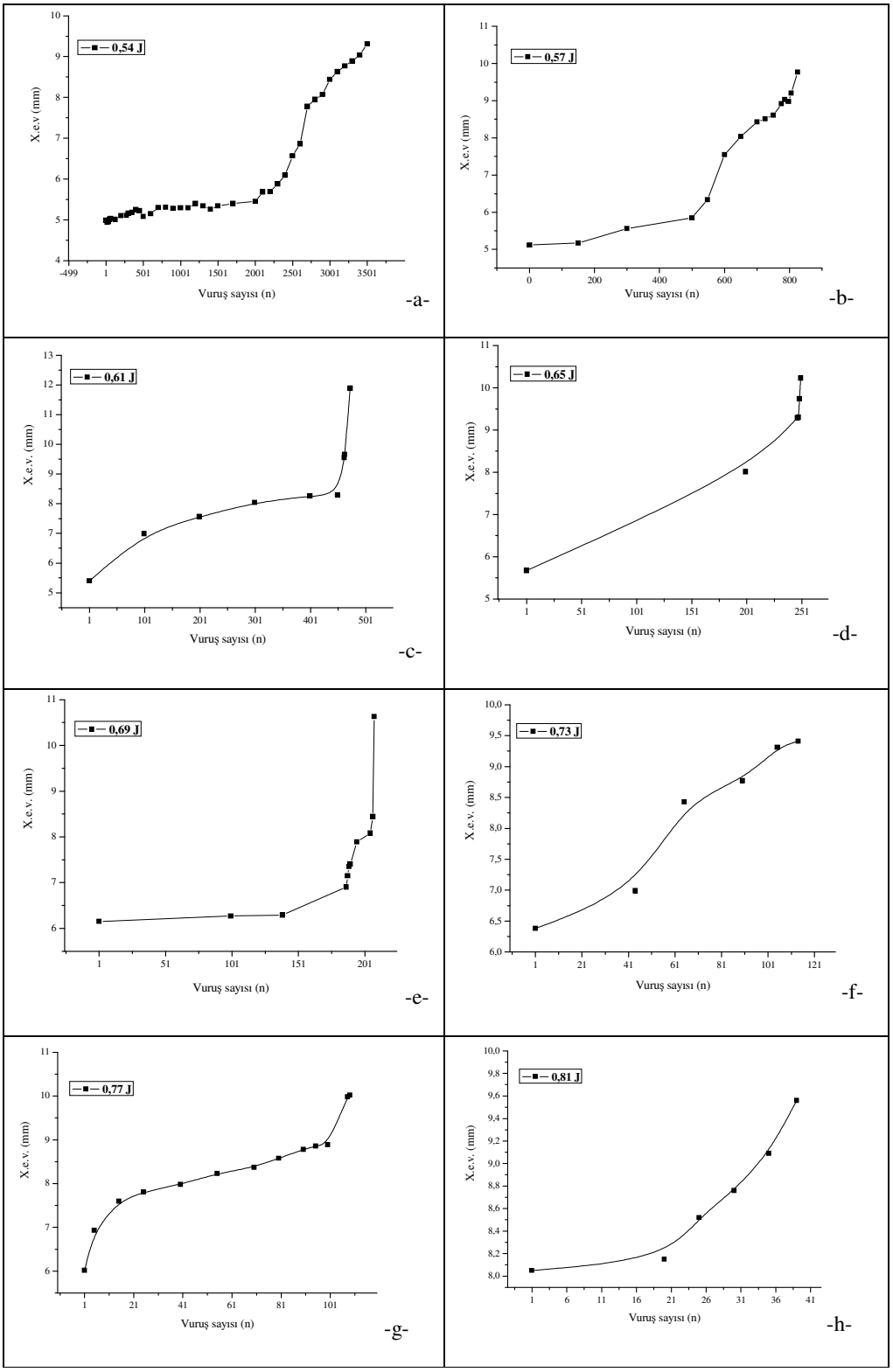
Şekil 4.6. Her bir darbe enerjisi için $E.F_{maks}$-Tekrar darbe sayısı grafikleri



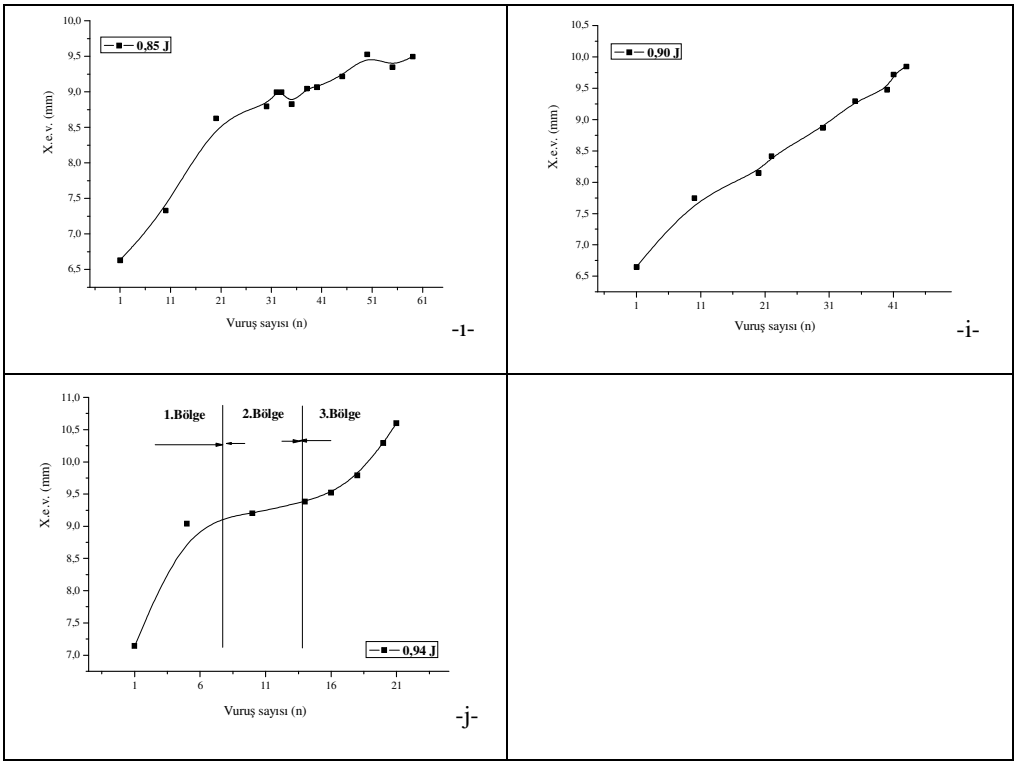
Şekil 4.6. (Devamı) Her bir darbe enerjisi için $E.F_{maks}$-Tekrar darbe sayısı grafikleri

Şekil 4.7'de her bir darbe enerjisi için X.e.v. – Tekrar darbe sayısı grafikleri çizilmiştir. Grafiklerden F_{maks}-Tekrar darbe sayısı grafiklerinde olduğu gibi üç ayrı bölgenin oluştuğu gözlemlenmiştir.

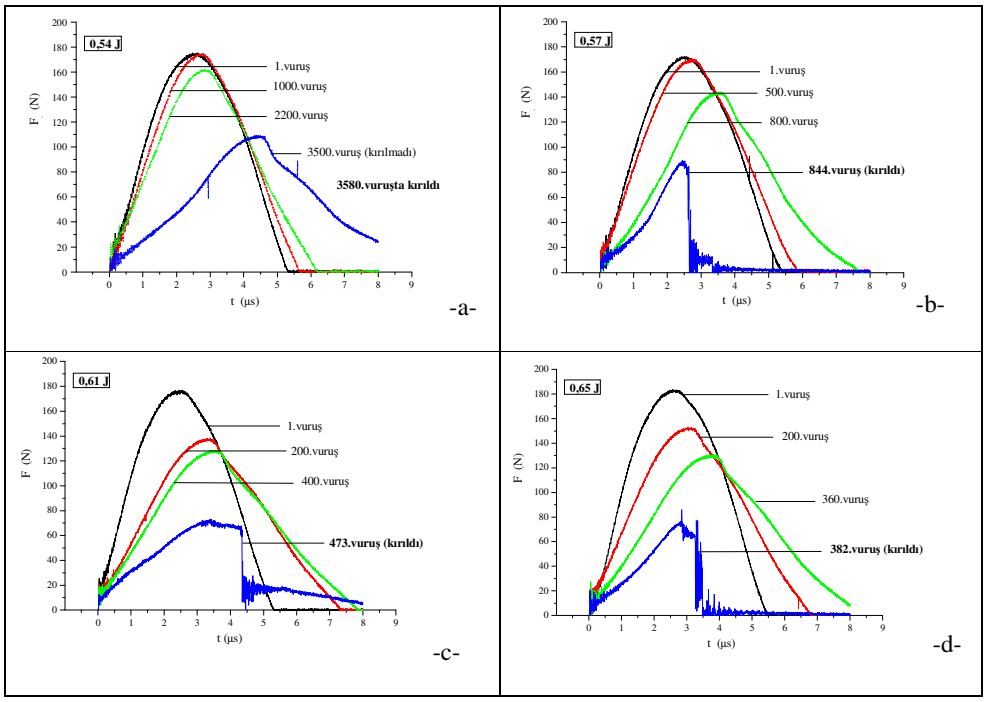
Birinci bölge için fiberlerde basma nedenli burkulma ve kayma hasarları olduğu bölge olarak açıklanmıştı. Düşük enerji ile yapılan darbelerde deformasyonlar yavaş olurken yüksek enerji ile yapılan darbelerde hızlı (az tekrar sayısında) olduğu görülmüştür. İkinci bölge ise "plato" olarak nitelendirilmişti. Bu bölgede ağırlıklı olarak matris çatlakları ilerlemekte ve tabakalar arası ayrılmalar artmaktadır. Fiber kırılmalarının olmadığı bu bölgede deformasyonlarda düşük olmaktadır. Üçüncü bölgede ise fiberler darbelere daha fazla dayanamayıp her bir enerji seviyesinde yaklaşık olarak aynı deformasyon değerinde ($\cong 10$ mm.) hasara uğramışlardır.



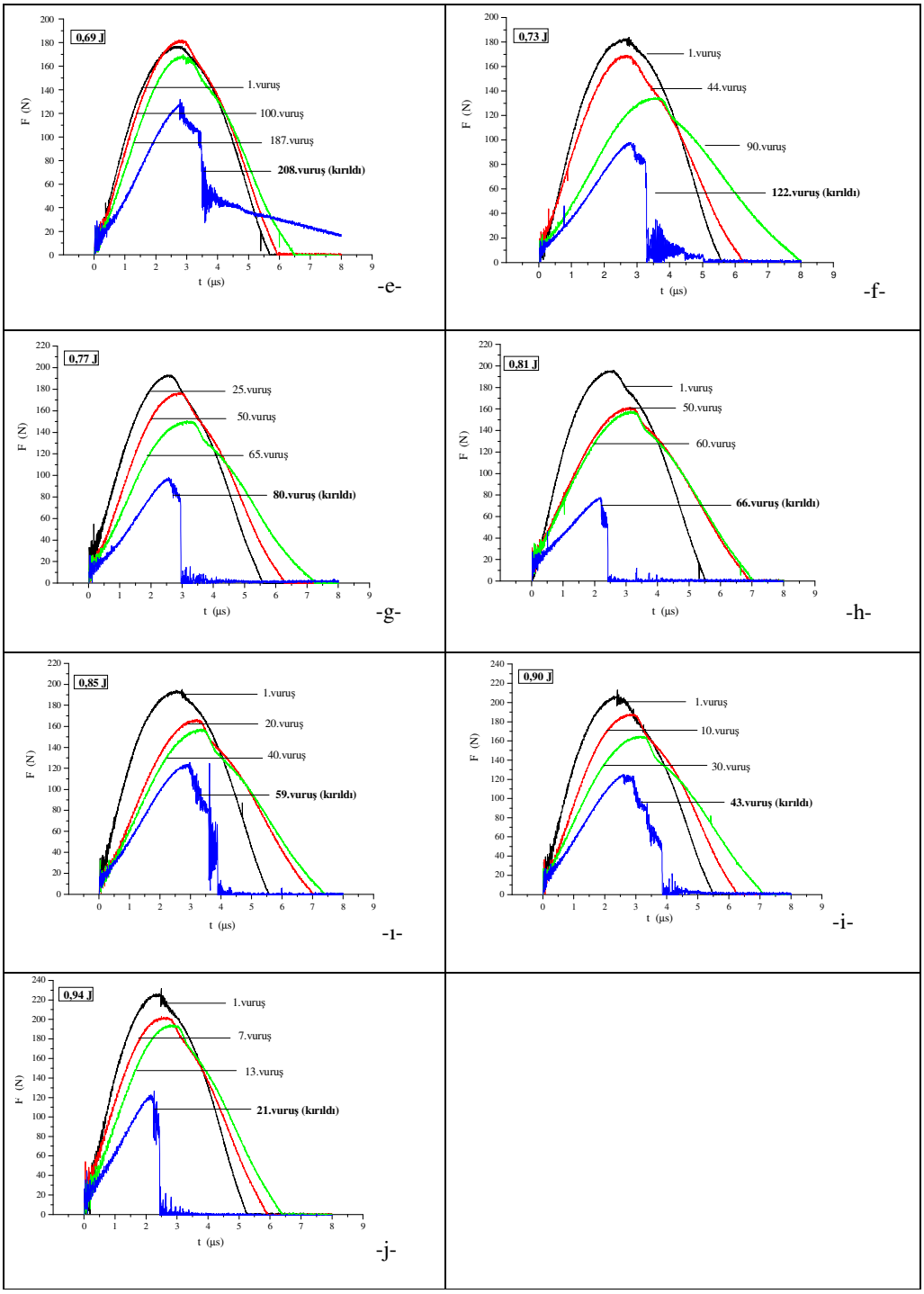
Şekil 4.7. Her bir darbe enerjisi için X.e.v.-Tekrar darbe sayısı grafikleri



Şekil 4.7.(Devamı) Her bir darbe enerjisi için X.e.v.-Tekrar darbe sayısı grafikleri



Şekil 4.8. Her bir darbe enerjisi için çizilen üst üste eğriler

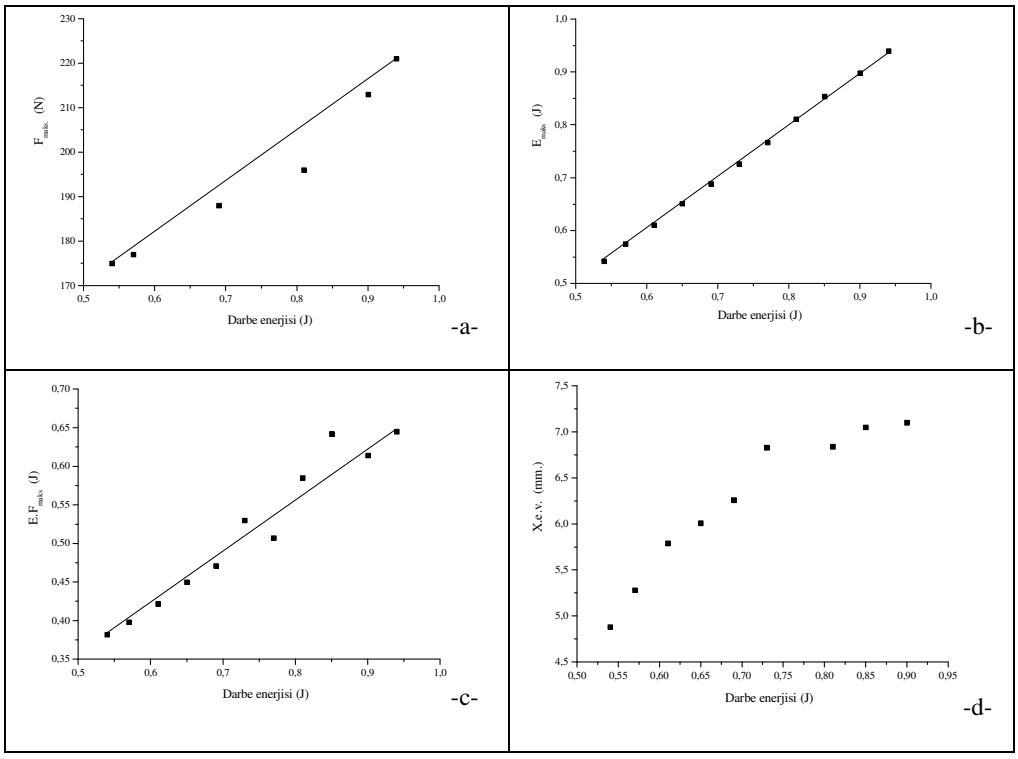


Şekil 4.8.(Devamı) Her bir darbe enerjisi için çizilen üst üste eğriler

Şekil 4.8'de her bir darbe enerjisi için yapılan darbe-yorulma deneylerinden, malzeme kırılıncaya kadar yapılan deneylerden dört deneyin kuvvet deplasman (F-t)

grafikleri aynı skalada çizilmiştir. Artan darbe tekrar sayısıyla ilk vuruşlardaki deformasyon sürelerine göre son vuruşlardaki veri süresi yaklaşık olarak yarı yarıya azalmıştır. Her bir darbe enerjisi seviyesinde artan tekrar sayısı ile eğrilerde oluşan darbe modülü değerlerinde azalma meydana gelmiştir.

Uygulanacak darbe enerjisinin arttırılmasıyla ilk vuruşlarda elde edilen eğrilerin elastik davranıştan plastik davranışa geçiş yaptıkları görülmektedir. Daha önceki F_{maks}. Grafiklerinde belirtildiği üzere bu grafiklerde de artan darbe enerji değeri ile ilk vuruşlarda ulaşılan F_{maks} değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir.



Şekil.4.9. Yorulma deneylerindeki ilk vuruşlarda alınan verilerin toplu olarak gösterimi

$F_{maks.}$, $E_{maks.}$, $E.F_{maks.}$, X.e.v değerleri deneyler esnasındaki değişimlerinin grafikleri Şekil 4.9'da gösterilmiştir. Şekil 4.9–a'ya göre farklı darbe enerjileriyle yapılan her bir darbe-yorulma deneyleri için ilk darbelerde alınan F_{maks} verilerinin artan darbe enerjisi değeri ile doğrusal olarak arttığı görülmektedir. Şekil 4.9–b'ye göre farklı darbe enerjileriyle yapılan her bir darbe-yorulma deneyleri için ilk darbelerde alınan

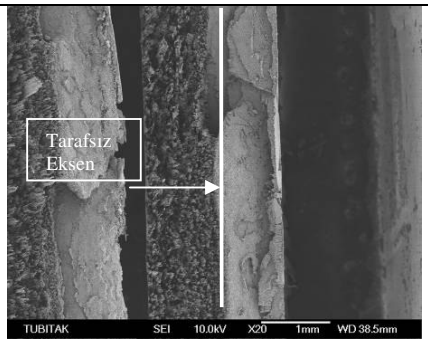
E_{maks} verilerinin artan darbe enerjisi değeri ile arttığı görülmektedir. Şekil 4.9–c'de ilk darbelerde alınan $E.F_{maks}$ verilerinin artan darbe enerjisi değeri ile doğrusal olarak arttığı görülmektedir. Son olarak Şekil 4.9–d'ye göre de farklı darbe enerjileriyle yapılan her bir darbe-yorulma deneyleri için ilk darbelerde alınan X.e.v. verilerinin artan darbe enerjisi değeri ile arttığı görülmektedir.

4.2. Sabit Enerjilerle Yapılan Darbe-Yorulma Deneyleri Sonucunda Hasara Uğrayan Kompozit Kesitlerinin Fraktografik Olarak İncelenmesi

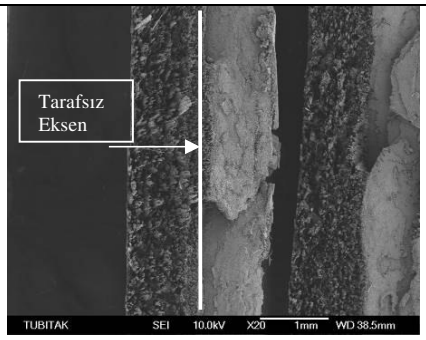
Polieterimid matrisli sürekli karbon fiber takviyeli malzemenin farklı enerjili darbelerle yapılan darbe-yorulma deneyleri sonrası hasar oluşumunu ve deformasyonlarını incelemek üzere taramalı elektron mikroskobuyla fotoğrafları çekilmiştir. Mikro fotoğraflar incelenerek farklı enerji değerinde uygulanan tekrarlı darbelerin kırılan kesitte ne tür deformasyonlar oluşturduğu incelenmiştir.

Şekil 4.10 normal numunenin 0.54 J ve 0.94 J değerindeki tekrarlı darbeler ile darbe-yorulma yüklemesi sonucu kırılan kesitlerini ve 2.65 J değerindeki darbe ile tek darbede kırılan kesitini göstermektedir.

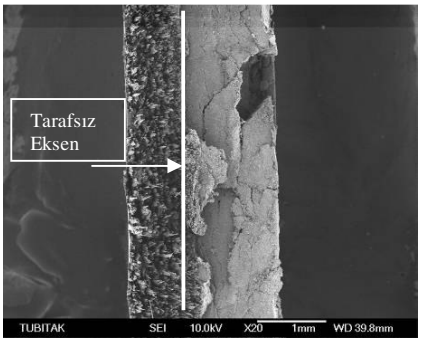
Şekil 4.10-a'da 2.65 J ile tek darbede kırılan malzemenin kesitinin genel görünüşü gösterilmiştir. Tek darbe sonucu kırılan kesit incelendiğinde çekme ve basma bölgelerinin yaklaşık eşit alana sahip oldukları görülmektedir. Çekme bölgesinin genişliğinin basma bölgesi genişliğine oranı 1,4'tür. Şekil 4.10.-b'de gösterilen 0.94 J değerindeki tekrarlı darbeler sonucu kırılan malzeme kesiti incelendiğinde çekme ve basma bölgeleri yine yaklaşık aynı alana sahip ancak basma bölgesinin bir miktar arttığı görülmektedir. Tarafsız eksen olarak nitelendirilen geometrik sınır çizgisi tek seferde kırılan malzemeninkine kıyasla biraz daha sola kaydığı ve kırılan kesitte çekme bölgesi genişliği/basma bölgesi genişliği oranının yaklaşık 1'e düştüğü görülmüştür. Ancak Şekil 4.10.-c'deki 0.54 J darbe enerjisiyle yapılan darbe-yorulma sonucu kırılan kesit incelendiğinde ise basma bölgesinin daha da artarak çekme bölgesine kaydığı görülmektedir (çekme bölgesinin basma bölgesine oranı 0.6).



-a- 2.65 J ile tek vuruşta kırılan kesit



-b- 0.94 J ile 21 adet darbe sonucu kırılan kesit

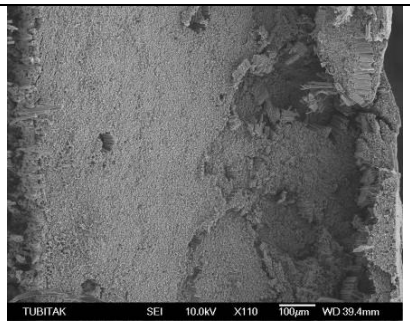


-c- 0.54 J ile 3580 adet darbe sonucu kırılan kesit

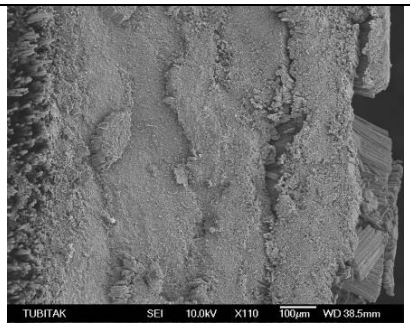
Şekil 4.10. Normal numunenin 0.54 J ve 0.94 J darbe enerjileri ile darbe yorulma sonucu kırılan kesitlerinin ve 2.65 J darbe enerjisiyle tek darbede kırılan kesitinin genel görünümleri.

Şekil 4.11'de normal numunenin 0.54 J ve 0.94 J değerindeki darbeler ile darbe-yorulma zorlanması sonucu kırılan kesitlerinin ve 2.65 J değerindeki tek bir darbe ile kırılan kesitinin basma bölgeleri gösterilmiştir.

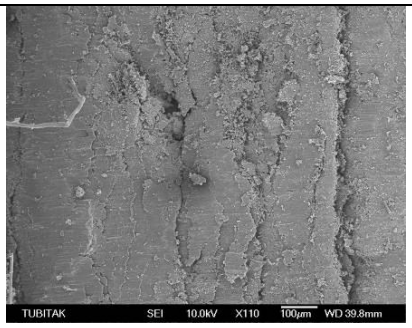
Şekil 4.11-a'da tek darbe ile kesit görülmektedir. Genel itibari ile düz bir kırılma kesiti ortaya çıkmıştır. Şekil 4.11-b,c'deki kırılma kesitlerinde ise tekrarlı darbeler neticesinde tabakalar arası bağıl hareketlerin oluşturduğu tabakalar arası ayrılmaların izleri net bir şekilde görülmektedir. Her iki fotoğrafta da yukarıdan aşağıya doğru oluşan çatlak şeklindeki çizgiler ile her bir kat ayrı ayrı ortaya çıkmıştır.



-a- 2.65 J ile tek vuruşta kırılan kesit



-b- 0.94 J ile darbe-yorulma sonucu kırılan kesit

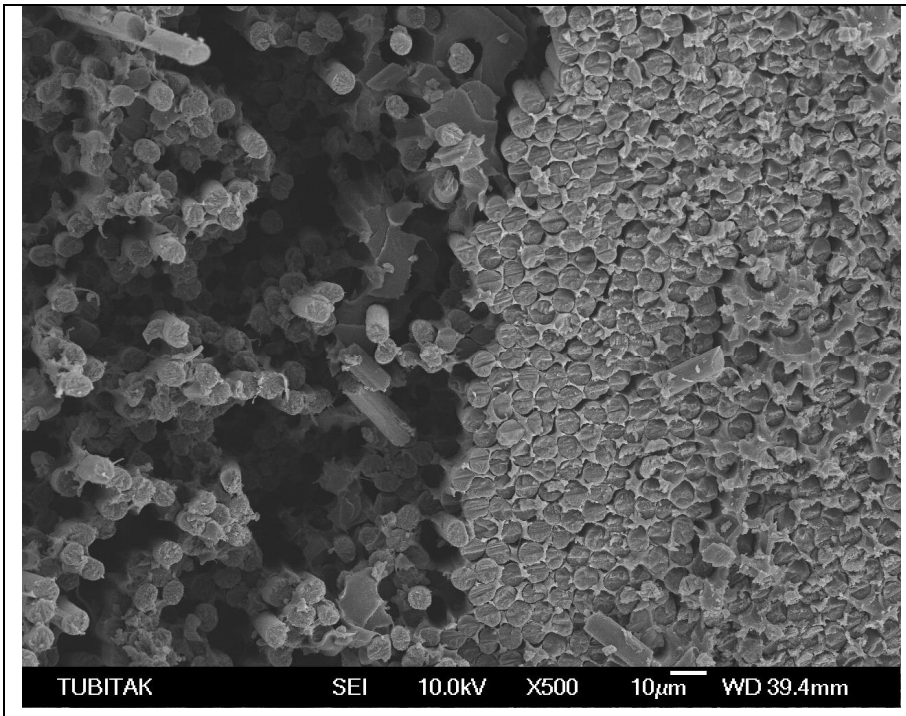


-c- 0.54 J ile darbe-yorulma sonucu kırılan kesit

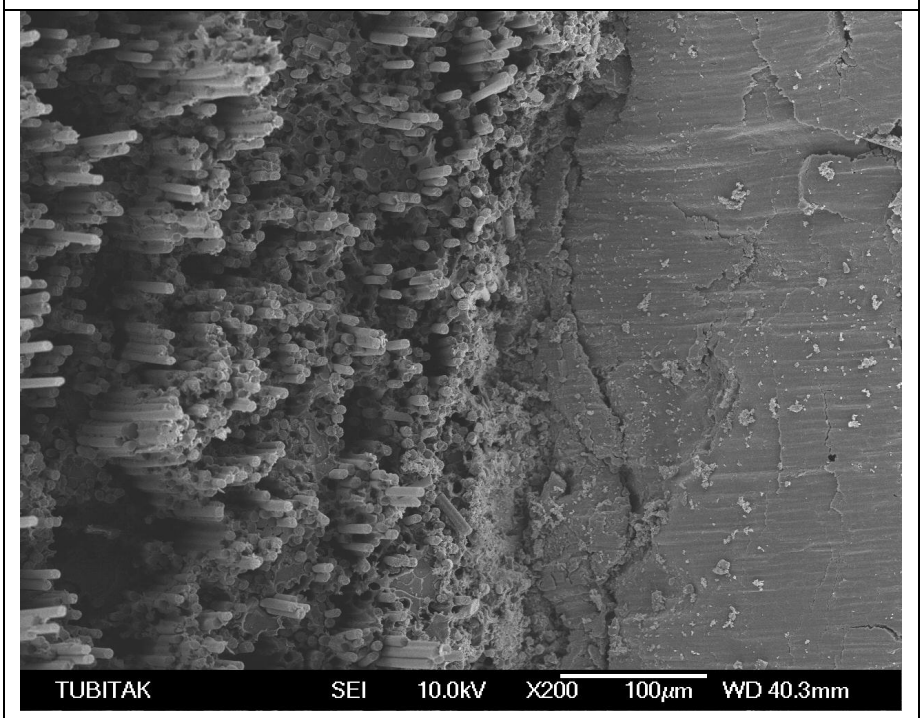
Şekil 4.11. Normal numunenin 0.54 J ve 0.94 J darbe enerjileri ile darbe yorulma sonucu kırılan kesitlerinin ve 2.65 J darbe enerjisiyle tek darbede kırılan kesitinin basma bölgelerinin görünümleri.

Şekil 4.12.-a'da gösterilen 2.65 J değerindeki tek bir darbe ile kırılan kesit incelendiğinde kırılan fiberlerin yüzeyleri tek tek seçilebilmektedir. Tarafsız eksenin hemen sağ tarafı basma bölgesidir. Ancak 0.94 J değerindeki darbe-yorulma deneyi sonucu kırılan kesit (Şekil 4.12.-b) incelendiğinde kırılan fiberlerin yüzeyleri neredeyse görülemeyecek şekilde matris ile sıvanmıştır. Bu sıvanmanın büyüklüğü darbe sayısıyla orantılıdır.

Darbe sayısı arttıkça fiberler çatlağın diğer yüzeyi ile bağıl olarak çok fazla hareket edip çok küçük boyutlarda ufalanırlar. Aynı şekilde deforme olan matris de bu bölgede fiberlerin arasında ve üzerinde bir tabaka oluştururlar. Çatlağın iki yüzeyi arasındaki bağıl hareket sonucu ayrıca yüzey daha parlak bir görünüm almaktadır.



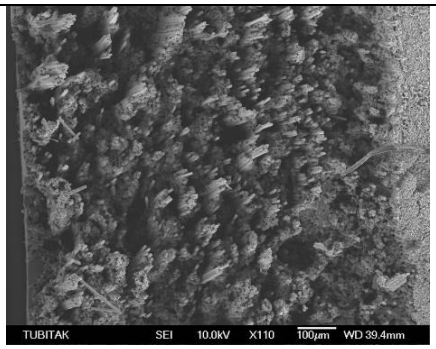
-a- 2.65 J ile tek vuruşta kırılan kesit



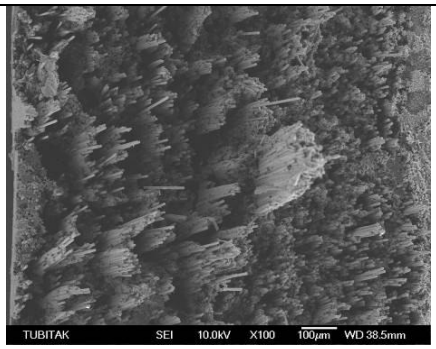
-b- 0.54 J ile darbe-yorulma sonucu kırılan kesit

Şekil 4.12. 2.65 J değerindeki darbeyle tek vuruşta ve 0.54 J değerindeki darbe enerjisiyle darbe-yorulma sonucu kırılan kesitlerin tarafsız eksen bölgesi

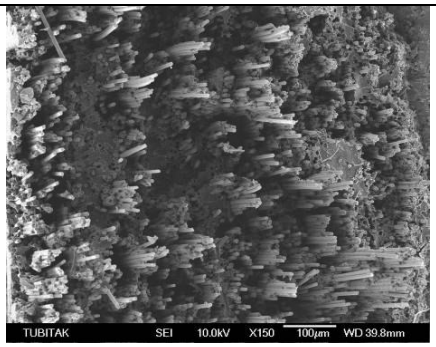
Şekil 4.13'de normal numunenin 0.54 J ve 0.94 J darbe enerjileri ile darbe yorulma sonucu kırılan kesitlerinin ve 2.65 J darbe enerjisiyle tek darbede kırılan kesitinin çekme bölgeleri gösterilmiştir.



-a- 2.65 J ile tek vuruşta kırılan kesit



-b- 0.94 J ile darbe-yorulma sonucu kırılan kesit



-c- 0.54 J ile darbe-yorulma sonucu kırılan kesit

Şekil 4.13. Normal numunenin 0.54 J ve 0.94 J darbe enerjileri ile darbe yorulma sonucu kırılan kesitlerinin ve 2.65 J darbe enerjisiyle tek darbede kırılan kesitinin çekme bölgelerinin görünümleri.

Şekil 4.13-a'da gösterilen 2.65 J darbe enerjisi ile tek darbede kırılan kesitinin çekme bölgesi incelendiğinde fiberlerin kırık boylarının kısa olduğu gözlemlenmiştir. Matristen kırılma esnasında yerinden çıkan fiber uzunluğunun az olması gevrek bir kırılmanın işaretidir. Ayrıca kesit içindeki kırılan fiber boylarının hemen hepsi yaklaşık aynı boydadır. Buna rağmen 0.94 J ve 0.54 J darbe enerjileri ile gerçekleştirilen darbe-yorulma deneyi sonucu kırılan kesit (Şekil 4.13.-b ve -c) incelendiğinde yorulma sonucu soyulan fiber boylarının daha uzun olduğu görülmektedir. Yine bu kesite göre darbe-yorulma zorlanması boyunca kırılan kesitteki fiber boylarının dağınık bir görünümü mevcuttur. Yani kimileri uzun

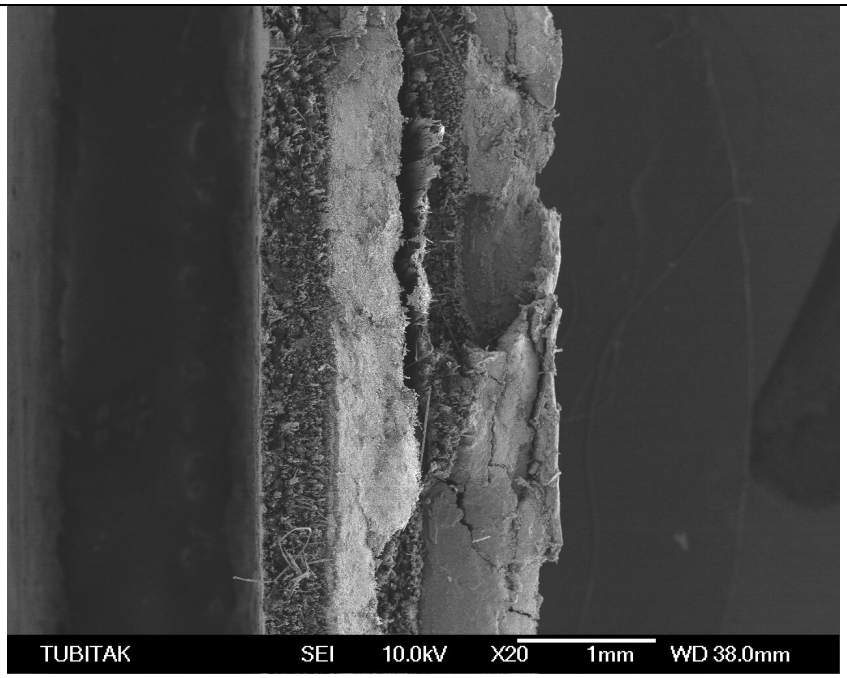
kimileri kısa kalmıştır. Şekil 4.13.-c'de gösterilen 0.54 J darbe enerjisi ile yapılan darbe-yorulma sonucu kırılan kesit incelendiğinde çok daha dağınık bir fiber düzeni görülmektedir. Fiberlerin demet halinde kırılmadığı neredeyse tek tek kırıldığı görülmektedir. Matris içinde görünen fiber deliklerinden de darbeli yorulmanın fiber/matris ara yüzeyini önemli bir şekilde zayıflattığını söyleyebiliriz.

4.3. Normal Numunelerin Karmaşık Enerjili Tekrarlı Darbelere Maruz Kalması Sonucu Kırılan Yüzeylerinin Fraktografik İncelenmesi

Bu uygulamada numuneye 0.77 J enerjili "25" adet darbe ardından 0.61 J enerjili "100" adet darbe tatbik ettirilmiştir. Son olarak da 0.54 J enerjili "2285" adet darbe numune kırılıncaya kadar tatbik ettirilmiştir. Uygulamanın devamı olarak bu iki farklı darbe enerjisi yer değiştirilerek darbeler başka bir numuneye uygulanmıştır. Yine son olarak bu numuneye de kırılıncaya kadar 0.54 J enerjili "323" adet darbe uygulanmıştır.

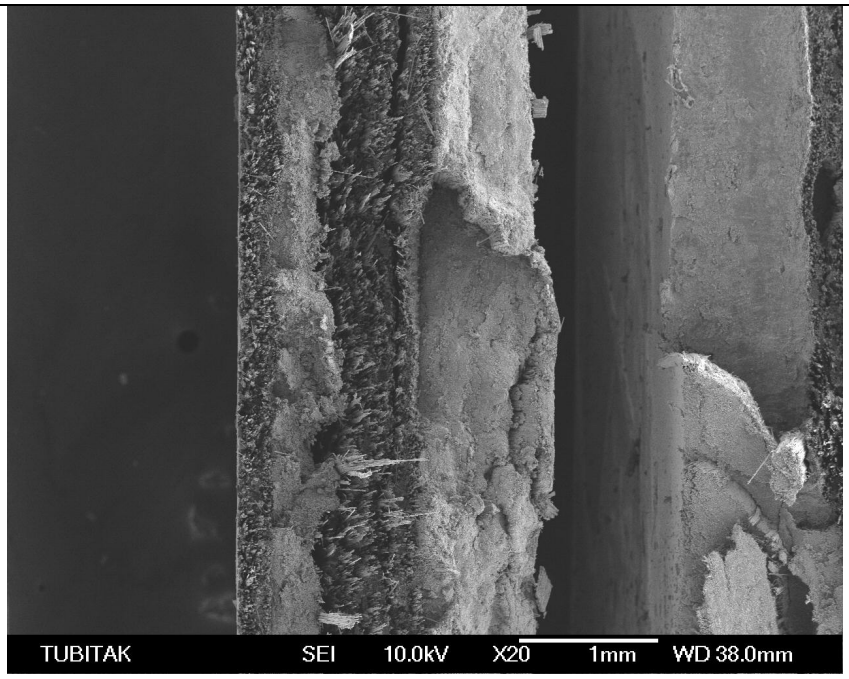
Kırılan kesitlerin fraktografik incelenmesi için TEM fotoğrafları çekilmiştir (Şekil 4.14). Çekilen fotoğraflar yardımıyla farklı enerji seviyelerindeki darbelerin farklı sıralarla numuneye uygulanması sonucu numunede oluşan deformasyon farklılıkları incelenmiştir.

Şekil 4.14'teki görüntüde oldukça karmaşık bir kırılma morfolijisi olduğu görülmektedir. Belirli bir aşamaya kadar çekme ve basma bölgesi olarak şekillenen bölgeler diğer bir darbe bölgesinde yeni çekme-basma bölgeleri halinde şekillenmiştir. Örneğin ilk grup darbe sonrası kırılmayan çekme bölgesi yeni darbelerde ikiye bölünerek ve yeni bir tarafsız bölge etrafında yeni çekme ve basma bölgeleri oluşturmuş ve bu karmaşık kesit ortaya çıkmıştır.



-a- (25*0.77 J + 100*0.61 J + n*0.54 J)

n=2285



-b- (100*0.61 J + 25*0.77 J + n*0.54 J)

n=323

Şekil 4.14. Normal numunenin değişik enerjili tekrarlı darbelere maruz kalması sonucu kırılan yüzeyinin genel görüntüsü

4.4 Tekrarlı Darbelere Maruz Kalan Klimatik Ortamda Yaşlandırılmış Numunelerin Darbe-Yorulma Davranışlarının İncelenmesi

Sürekli fiber takviyeli polimer kompozitler yüksek spesifik dayanım, yüksek kimyasal direnç ve rijitlik gibi avantajlarına rağmen bakım ve servis esnasında oluşan düşük enerjili darbe yüklemesi, statik yükleme gibi çeşitli yüklerden dolayı hasara karşı duyarlı olmaktadırlar. Ayrıca polimer kompozitlerin kullanıldığı yer ve maruz kaldığı çevresel etkiler, polimer kompozitlerin dayanımlarını etkileyen başlıca etkenlerdir. Hiçbir makina parçası ideal ortamda çalışamaz. Sıcaklık, nem, su ve vb. etkiler makine parçasının yapıldığı malzemenin mekanik özelliklerini belli bir zaman sonra etkileyerek makinayı kullanılamaz hale getirecektir. Daha da önemlisi bu ortamlarda çalışacak olan polimer kompozitler yukarıda da belirtmiş olduğumuz bakım ve servis koşullarında darbelere maruz kalması nedeniyle daha fazla etkilenecektir. Bunun sonucunda da malzeme ömrü tahmin edilenden daha kısa olacaktır.

Bölüm 4.1'de belirtildiği gibi normal sürekli karbon fiber takviyeli PEI matrisli kompozitlere sadece değişen enerji seviyelerinde tekrarlı darbe yüklemesi uygulanarak darbe-yorulması özellikleri incelenmişti. Bu bölümde ise yaşlandırılmamış normal numunelere farklı enerji seviyelerine sahip darbelerle yapılan darbe-yorulma deneylerinin aynısını klimatik ortamda yaşlandırılmış kompozit numunelere uygulayarak klimatik etkinin kompozit malzemelerin darbe-yorulma özelliklerini nasıl etkilediği incelenmiştir.

Üretici firmadan getirtilen karbon fiber takviyeli PEI matrisli kompozit malzeme her biri 108 dakika süren toplam 532 klimatik çevrime maruz bırakılmıştır. Klimatik etkiye maruz bırakılan karbon fiber takviyeli PEI matrisli kompozit malzeme daha sonra Ceast firmasının Resil 25 model sarkaç tipi cihazı ile düşük enerjili tekrarlı darbelere maruz bırakılmıştır.

Normal numuneler için başta çalışacağımız darbe enerjileri aralığını seçtiğimiz için aynı darbe enerji değerleriyle deneyler gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak darbe enerjisi çalışma aralığını 0.54 J -0.94 J olarak kullanılmıştır.

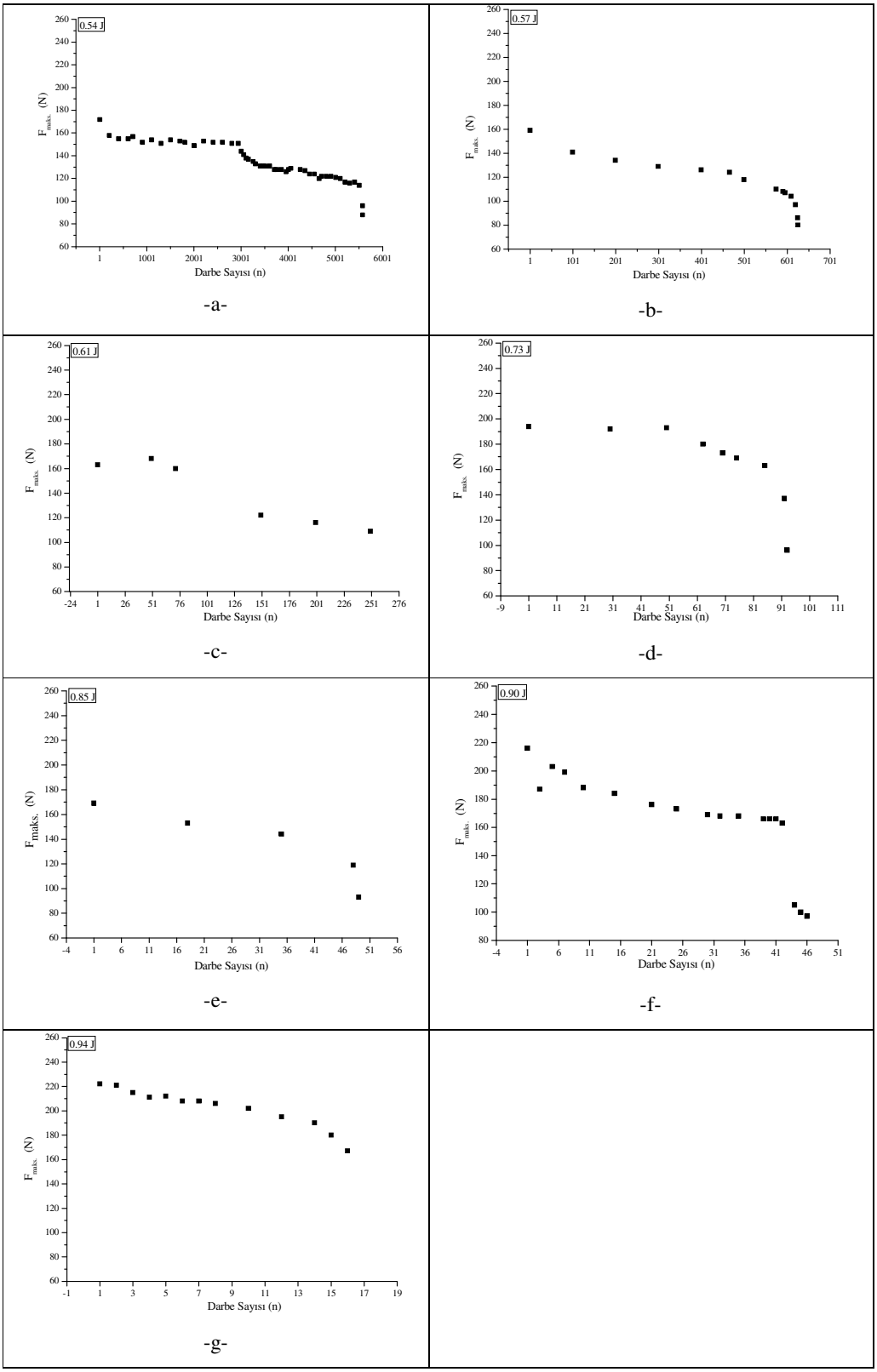
Klimatik numuneler için yedi farklı darbe enerjisiyle yapılan darbe deneyi sonuçları incelenmiş olup değerler Tablo 4.2'de gösterilmiştir.

Tablo 4.2. Klimatik ortamda yaşlandırılmış numuneler için darbe enerjisine bağlı olarak değişen kırılma için gerekli darbe tekrar sayılarının karşılaştırılması

Darbe Enerjisi (J)	Klimatik Numune İçin Tekrar Darbe Sayısı	Normal Numune İçin Tekrar Darbe Sayısı
0.54	5574	3580
0.57	1774	829
0.61	257	473
0.64	-	382
0.69	-	208
0.73	93	122
0.77	-	80
0.81	-	66
0.85	49	59
0.90	46	43
0.94	16	21

Her bir darbe enerjisi için tekrarlı darbeler sonucu malzeme hasara uğratılıncaya kadar F_{maks} değerindeki değişimler grafikler yardımıyla Şekil 4.15'de gösterilmiştir.

Uzun süreli suya daldırılan malzemelerle yapılan bu tür çalışmalarda polimer malzemedeki plastikleşme etkisinin fazla olması nedeniyle darbe dayanımlarının düştüğü rapor edilmiştir. Suya daldırma işleminde ilk aşamada su moleküllerinin yapı içine sızması ile fıçılaşma tabir edilen moleküllerin gerilmesi ve iç gerilmelerin ortaya çıkması sonrasında ise su moleküllerinin polimer içersinde plastikleşme etkisi yaratacak şekilde etkileşime geçmesi sonucu yumuşama gerçekleşmektedir.



Şekil 4.15. Her bir darbe enerjisiyle yapılan darbeli-yorulma için F_{maks}-Tekrar darbe sayısı grafikleri

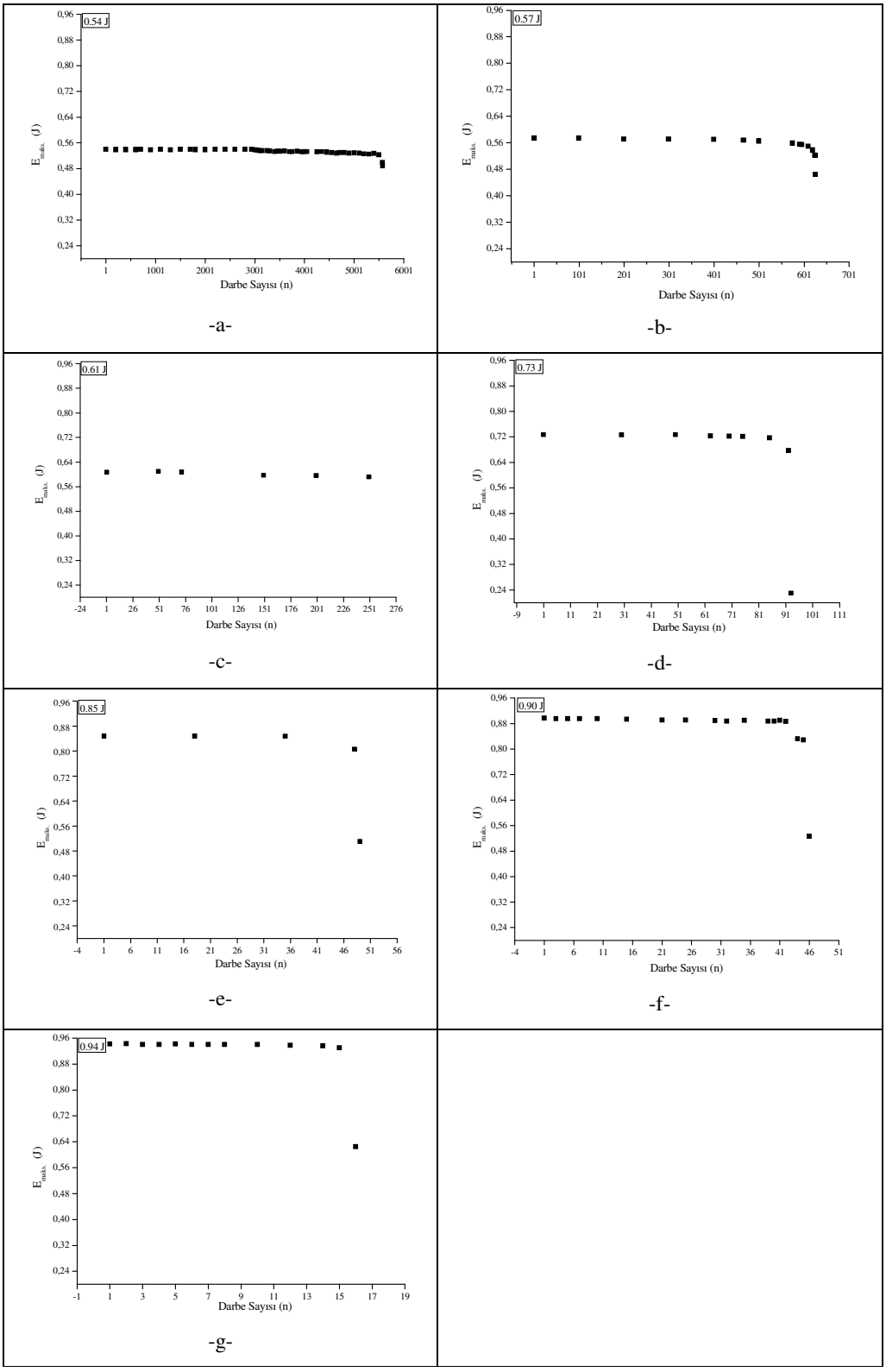
Bizim çalışmamızın sonuçlarından ise malzemenin henüz plastikleşme aşamasına gelmeden önceki safhada bulunduğu anlaşılmaktadır. 0.73 J- 0.94 J arasında yapılan darbe-yorulma deneylerinde klimatik yaşlandırılmış numuneler ile normal numunelerin hasara uğramaları için gerekli olan darbe tekrar sayısı pek farklılık göstermemektedir. 0.61 J–0.69 J arasında yapılan darbe-yorulma deneylerinde klimatik yaşlandırılmış numuneler ile normal numunelerin hasara uğramaları için gerekli olan darbe tekrar sayısı az bir miktar düşüş göstermektedir.

Son iki darbe enerji seviyesi olan 0.54, 0.57 J ile gerçekleştirilen darbe-yorulma deneylerinde klimatik yaşlandırılmış ve normal numunelerin hasara uğramaları için gerekli olan darbe tekrar sayısı kayda değer bir artış gösterdiği gözlemlenmiştir.

Şekil 4.15'deki çizilmiş grafiklere göre, darbe enerjisinin artmasıyla malzemenin hasara uğraması için gerekli olan darbe tekrar sayısının azaldığı görülmüştür. F_{maks} değerlerinin artan darbe tekrar sayısıyla giderek azaldığı görülmüştür. Artan enerji seviyesiyle her bir deney için ilk vuruşlarda elde edilen F_{maks} değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir.

F_{maks}- Tekrarlı darbe sayısı eğrilerinde göze çarpan üç ayrı bölge bulunmuştur. Birinci bölge belirli bir darbe sayısına kadar hızlı bir düşüşün olduğu ve ilk fiber hasarlarının oluştuğu bölgedir. İkinci bölge "plato" bölgesi olarak adlandırılan ve birinci bölgede tekrarlı darbe yüklemesi nedeniyle matriste oluşan mikro çatlaklar birleşerek fiber-matris ara yüzeyinin açılmasının gerçekleştiği, tabakalar arası ayrılmaların oluştuğu ve ilerlediği bölgedir.

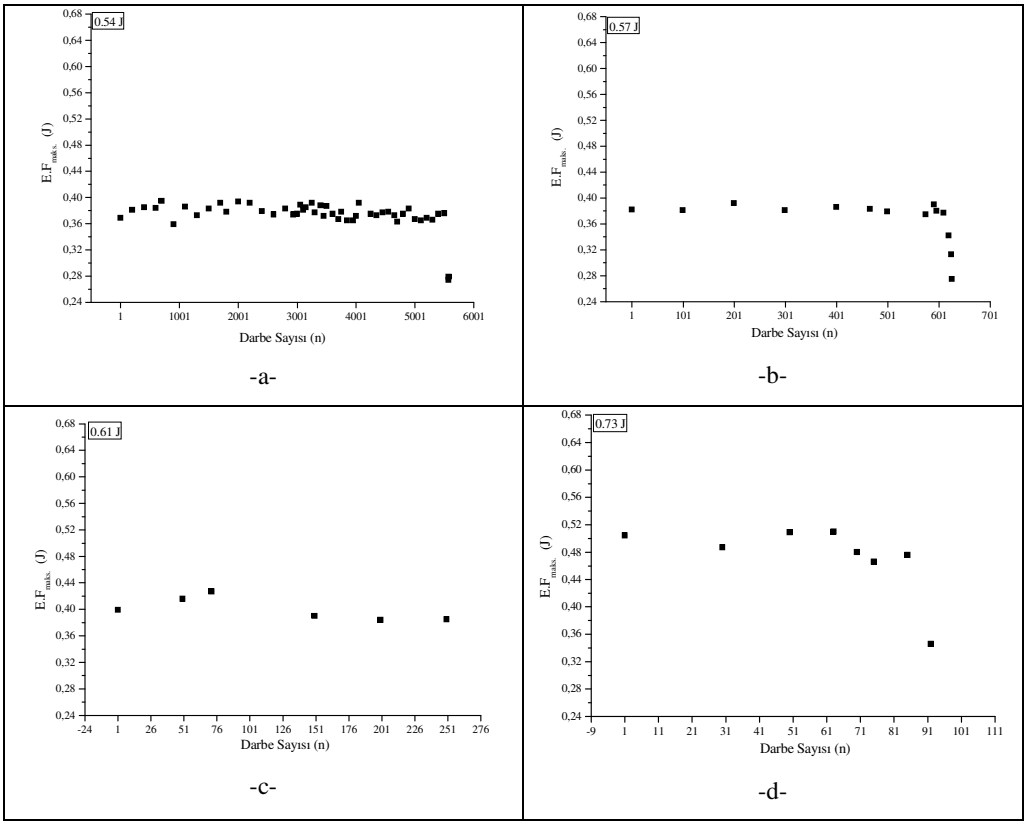
Üçüncü bölgede ise artan tekrarlı darbe sayısıyla matris-fiber ara yüzeyinde oluşan tabakalar arası ayrılmalar nedeniyle fiberlere gelen yük miktarı artmıştır. Belirli tekrar sayısından sonra artan yük nedeniyle fiberler dayanamayıp hasara uğramışlardır. Fiberlerin kırılmaları eğrilerin üçüncü bölgelerinden ani bir düşüşle gerçekleştiği görülmüştür.



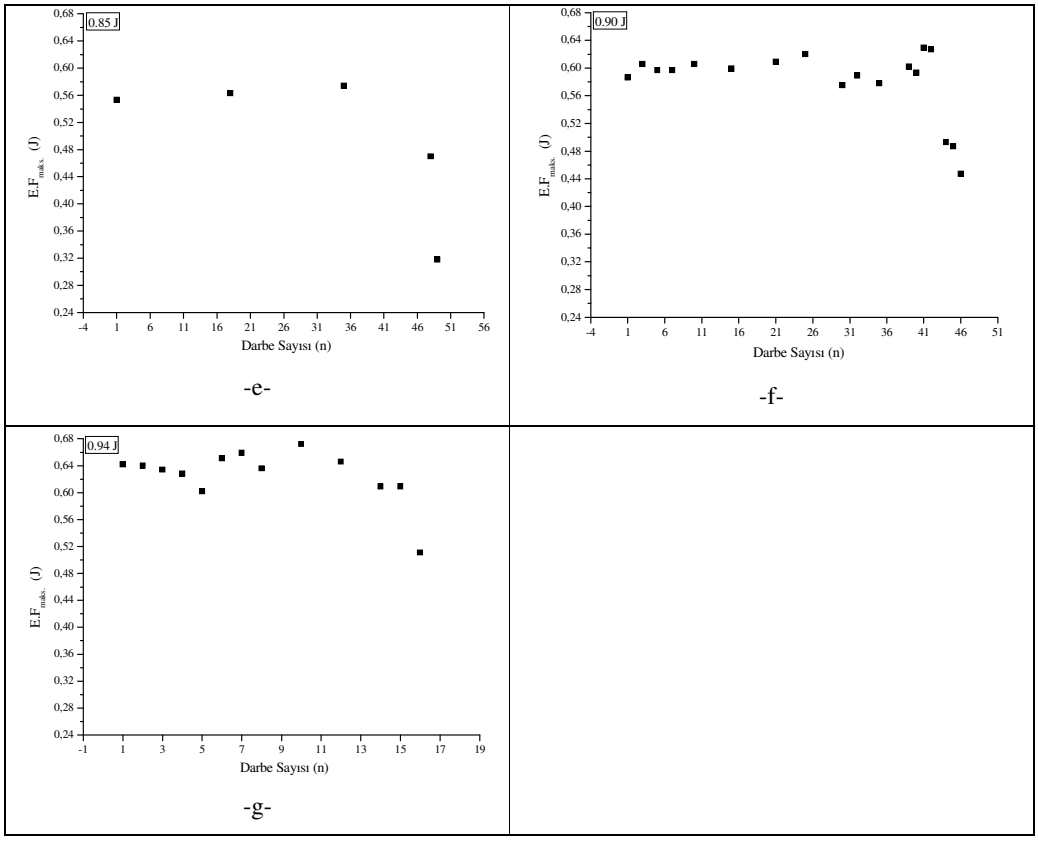
Şekil 4.16. Her bir darbe enerjisiyle yapılan darbeli-yorulma için E_{maks}-Tekrar darbe sayısı grafikleri

Şekil 4.16'daki çizilen grafiklere göre, darbe enerjisinin artmasıyla malzemenin hasara uğraması için gerekli olan darbe tekrar sayısının azaldığı görülmüştür. Her bir enerji seviyesinde E_{maks} değerlerinin artan darbe tekrar sayısıyla giderek azaldığı görülmüştür. Daha yüksek enerji seviyelerinde her bir deneydeki ilk vuruşlarda elde edilen E_{maks} değerlerinin giderek arttığı gözlemlenmiştir.

E_{maks}- Tekrarlı darbe sayısı eğrilerinde iki ayrı bölge bulunmuştur. Birinci bölgede belirli bir darbe sayısına kadar maksimum absorbe edilen enerji değişimi yaklaşık olarak sabit kalmaktadır. Bunun nedeni, F_{maks}-tekrar darbe sayısı eğrilerindeki ilk iki bölgede gerekli olan enerji toplamlarının sabit kalmasıdır. İkinci bölgedeki ani düşüş, F_{maks} eğrilerinin üçüncü bölgelerindeki aynı tekrar sayısıyla çakışmaktadır. Buna göre, bu bölgede matris hasarları ve tabakalar arası ayrılmalar sonunda fiberlere gelen yükün artmasıyla fiberlerin kırılması gerçekleşmektedir.



Şekil 4.17. Her bir darbe enerjisiyle yapılan darbeli-yorulma için $E.F_{maks}$-Tekrar darbe sayısı grafikleri

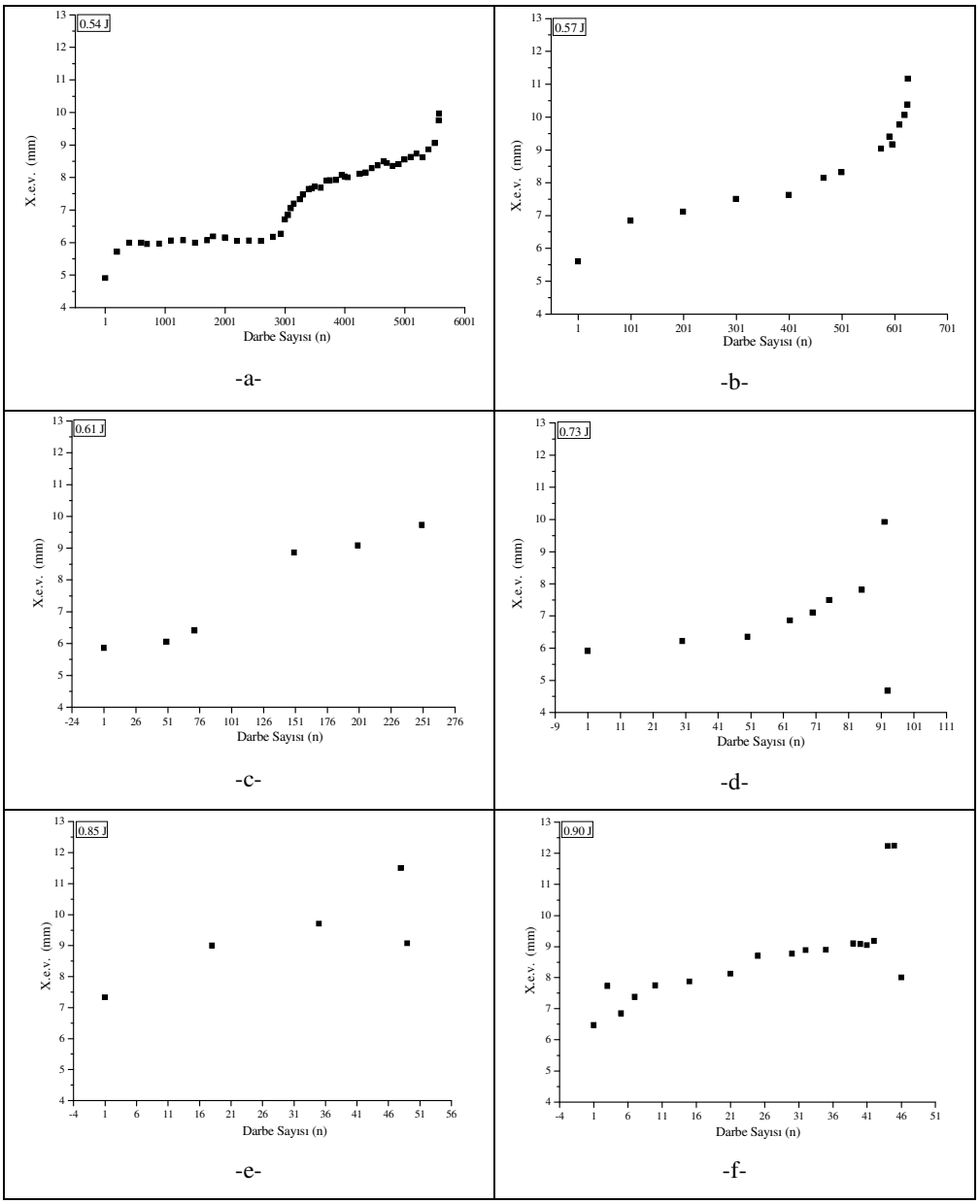


Şekil 4.17. (Devamı) Her bir darbe enerjisiyle yapılan darbeli-yorulma için E.F_{maks}-tekrar darbe sayısı grafikleri

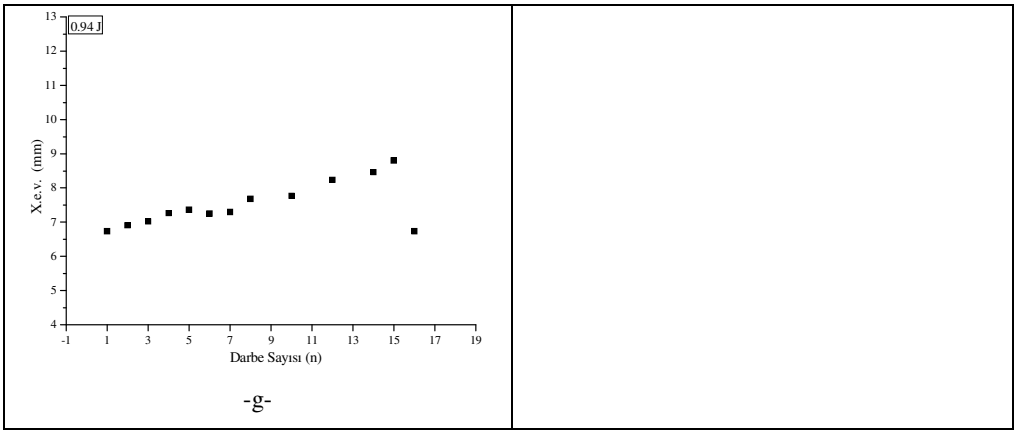
Şekil 4.17'de 0.54–0.94 J arasındaki birbirleri ile uyumlu olan her bir enerji değeri için E.F_{maks} eğrisi çizilmiştir. Artan yük tekrar sayısı ile birlikte eğrilerden de görüldüğü üzere E.F_{maks} değerleri azalmaktadır. Tekrarlı yük sayısındaki artışla birlikte numunelerin F_{maks} değerlerinin azalması nedeniyle E.F_{maks} değerlerinde düşüş meydana gelmiştir. E_{maks}-tekrar sayısı grafiklerindeki maksimum E_{maks} değerlerine göre E.F_{maks}– Tekrar sayısı grafiklerindeki maksimum E.F_{maks} değerleri yaklaşık olarak yarıya düşmektedir.

Şekil 4.18'de her bir darbe enerji için X.e.v. – tekrar darbe sayısı grafikleri çizilmiştir. Grafiklerden F_{maks}-tekrar darbe sayısı grafiklerindeki gibi yine üç ayrı bölge oluştuğu gözlemlenmiştir. Birinci bölgenin ilk fiber deformasyonlarının oluştuğu bölge olduğu belirtilmişti. Bu bölgede oluşan deformasyonlar giderek artarlar. Bu artış düşük enerji ile yapılan darbelerde yavaş olurken yüksek enerji ile yapılan darbelerde hızlı olduğu görülmüştür. İkinci bölge ise plato olarak

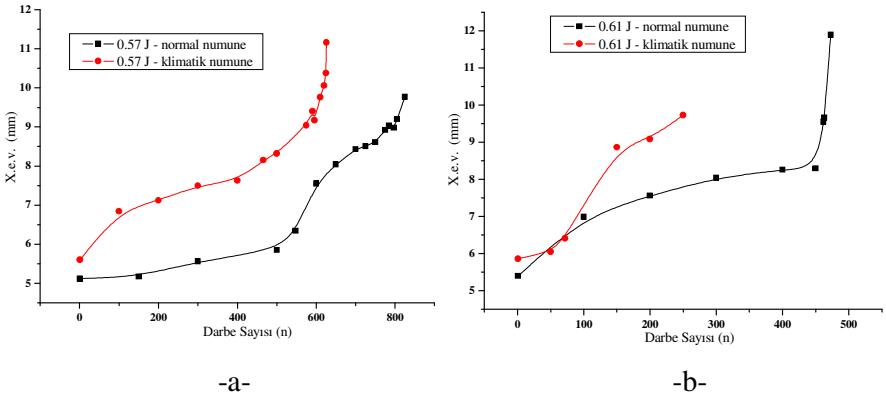
nitelendirilmişti. Bu bölgede matris deformasyonları ve tabakalar arası ayrılmalar giderek artar. Üçüncü bölgede ise fiberler bu darbelere daha fazla dayanamayıp yaklaşık olarak belirli bir deformasyon değerinde hasara uğramışlardır. Artan darbe enerjisi ve tekrar darbe sayısının azalmasıyla X.e.v. değerlerinin eğrisinin eğimi artmaktadır.



Şekil 4.18. Her bir darbe enerjisiyle yapılan darbeli-yorulma için X.e.v.-tekrar darbe sayısı grafikleri

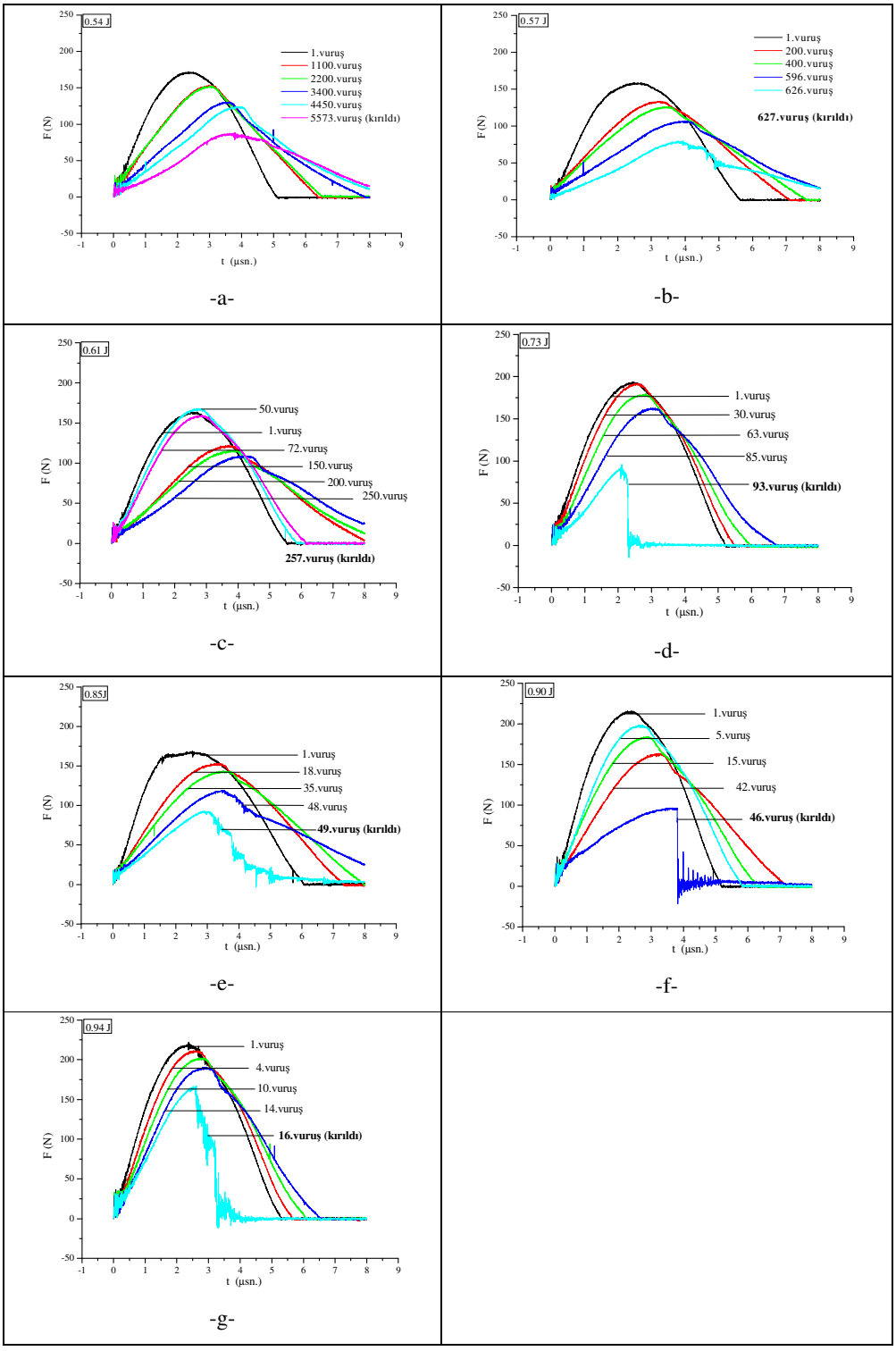


Şekil 4.18.(Devamı) Her bir darbe enerjisiyle yapılan darbeli-yorulma için X.e.v.-tekrar darbe sayısı grafikleri



Şekil 4.19. Klimatik yaşlandırılmış ve normal numunenin deformasyon miktarlarının karşılaştırılması

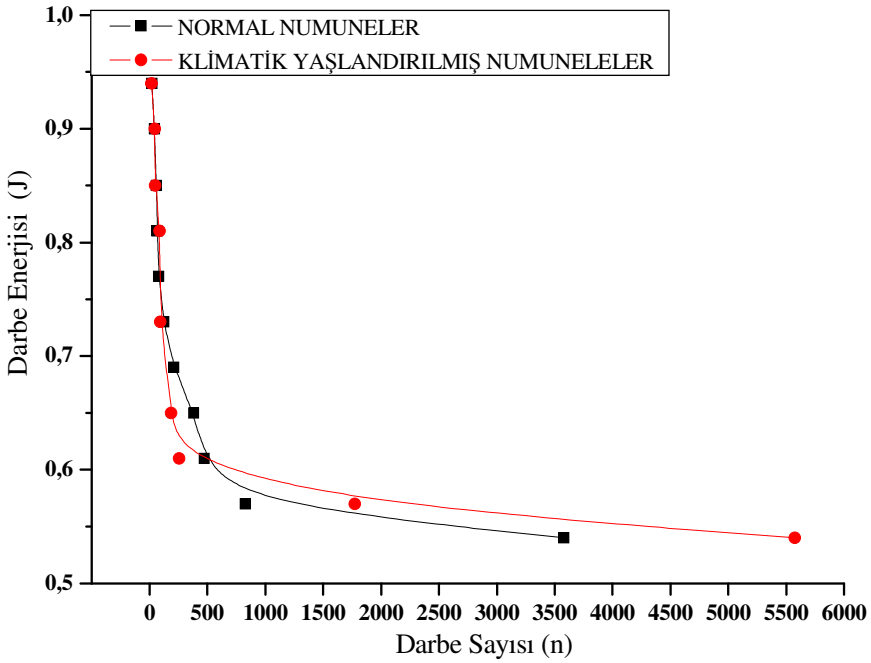
Klimatik yaşlandırılmış numune ile normal numunenin aynı darbe enerjisiyle yapılan darbe-yorulma deneylerinde deformasyon miktarlarının değişimi Şekil 4.19 (a-b)'de gösterilmiştir. Deformasyon miktarlarındaki değişim klimatik çevrim sayısının az oluşu nedeniyle uyumsuzluk göstermektedir. Şekil 4.19-a'da klimatik etki numunede beklenen sonuca neden olup deformasyon daha hızlı bir şekilde ilerleyerek malzeme daha düşük tekrarlı darbe sayısıyla kırılmıştır. Bunun nedeni olarak malzemedeki üretim esnasında meydana gelmiş olacağı düşünülen kalıntı gerilmeler gösterilebilir. Şekil 4.19-b'de ise Şekil 4.19-a'daki sonucun aksine çevrim sayısının azlığı nedeniyle klimatik etki numunede kayda değer bir değişiklik göstermemiştir.



Şekil 4.20. Her bir darbe enerjisiyle yapılan darbeli-yorulma için çizilen üst üste eğriler

Şekil 4.20'de her bir darbe enerjisi için yapılan yorulma deneylerinde malzeme hasara uğrayıncaya kadar uygulanan darbelerden dört farklı darbe verisi alınarak

kuvvet deplasman (F-t) grafikleri aynı skalada çizilmiştir. Artan darbe tekrar sayısıyla ilk vuruşlardaki veri sürelerine göre son vuruşlardaki veri süresi yaklaşık olarak yarı yarıya azalmıştır.



Şekil 4.21. Klimatik ortamda yaşlandırılmış numunenin darbe-yorulma ömür grafiği

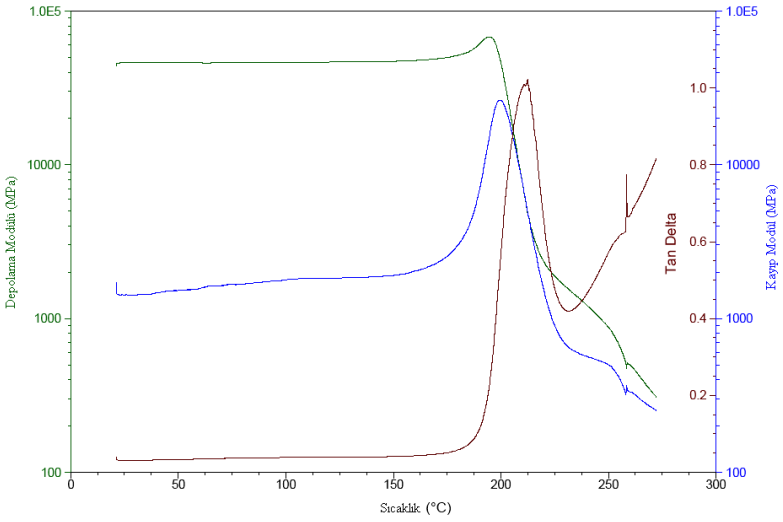
Şekil 4.21'de görüldüğü üzere sürekli karbon fiber takviyeli PEI matrisli kompozit malzemesinin klimatik yaşlandırma işlemi sonucu darbe yorulma ömrü azalan darbe enerji değeriyle sonsuza doğru asimptotik olarak artmaktadır. Ancak normal numunelerle karşılaştırıldığında

0.73 J- 0.94 J arasında yapılan darbe-yorulma deneylerinde klimatik yaşlandırılmış numuneler ile normal numunelerin hasara uğramaları için gerekli olan darbe tekrar sayısı pek farklılık göstermemektedir. 0.61 J–0.69 J arasında yapılan darbe-yorulma deneylerinde klimatik yaşlandırılmış numuneler ile normal numunelerin hasara uğramaları için gerekli olan darbe tekrar sayısı az bir miktar düşüş göstermektedir.

Son iki darbe enerji seviyemiz olan 0.54, 0.57 J ile gerçekleştirilen darbe-yorulma deneylerinde klimatik yaşlandırılmış ve normal numunelerin hasara uğramaları için gerekli olan darbe tekrar sayısı kayda değer bir artış gösterdiği gözlemlenmiştir.

4.5 Klimatik Ortamda Yaşlandırılmış Numunelerin Dinamik Termal Özelliklerinin İncelenmesi

Klimatik ortamda yaşlandırılan numunelerin dinamik termal özelliklerindeki değişimler dinamik mekanik termal analiz (DMTA) yöntemiyle incelenmiştir. Cihazdan alınan veriler yardımıyla sürekli fiber takviyeli polimer matrisli kompozit malzemenin depolama modülü, kayıp modülü, tanδ grafikleri bilgisayar ortamında çizdirilip sonuçlar irdelenmiştir. Şekil 4.22'de normal numunenin dinamik mekanik termal analiz sonucu elde edilen depolama modülü, kayıp modül, tanδ verilerinin grafikleri gösterilmektedir.



Şekil 4.22. Normal numunenin DMTA sonuçlarının grafiksel olarak gösterimi

Yeşil renkli eğri depolama modülünü ifade etmektedir. Depolama modülü şekilden de görüldüğü üzere 45000 MPa civarında başlayıp 175 ºC civarına kadar sabit

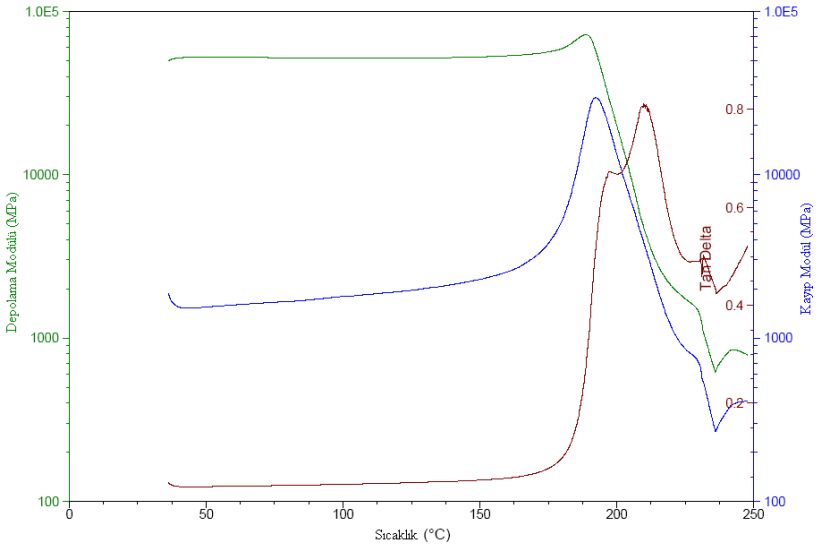
ilerlemiştir. Bu sıcaklık değerinden sonra malzeme yumuşamaya başlamıştır ve eğri hafifçe yükselerek 62500 MPa civarında tepe yapmıştır. Bu tepe noktası kimi araştırmacılar için camsı geçiş sıcaklığıdır. Bu sıcaklık değeri malzememizin en yüksek kullanım değeridir. Bu sıcaklıktan sonra eğri ani bir düşüşe geçmiştir.

"Kayıp modül" değerleri deformasyonlar esnasında geri dönüşü olmayan ısıl ve mekanik kayıpları temsil etmektedir. Kayıp modül eğrisi mavi renkle gösterilmiştir. Kayıp modül eğrisi yaklaşık 1500 MPa değerinde başlamış çok küçük bir eğimle 165ºC civarına kadar yükselmiştir ve 2000 MPa değerine ulaşmıştır. Bu sıcaklık değerinden sonra eğri ani bir yükseliş yaparak 25000 MPa'a yakın bir değere çıkmıştır. Ulaşılan en yüksek kayıp modül değerine karşılık gelen sıcaklık da kimi araştırmacılar için camsı geçiş sıcaklığı olarak kabul edilmiştir. Bu sıcaklık değerine kadar malzeme kararlı davranmıştır ancak bu sıcaklık değerinden sonra malzeme hızla yumuşamaya başlamıştır ve kayıp modül eğrisi de hızla düşüşe geçmiştir.

Tanδ eğrisi yaklaşık 0.05 değerinden başlamıştır ve sabit bir şekilde yine 160ºC civarına kadar sabit ilerlemiştir. Bu sıcaklık değerinden sonra eğri ani bir yükseliş göstermiştir. Bu artış yaklaşık 1 değerine kadar artış göstermiştir ve bu değerde tepe noktası oluşmuştur. Bu tepe noktasına karşılık gelen sıcaklık ASTM 4045 standardına göre camsı geçiş sıcaklığını ifade etmektedir. Bu sıcaklık değerine kadar malzeme kararlı olup bu değerden sonra eğri hızla düşüşe geçip malzeme de yumuşamaya başlamıştır. Bu tepe sıcaklığın ilerlemesiyle aşılmıştır ve tanδ hızla düşüşe geçmiştir.

Şekil 4.23'de klimatik ortamda yaşlandırılmış numunelerin dinamik mekanik termal analiz sonuçlarının grafiklerini göstermektedir. Depolama modülü şekilden de görüldüğü üzere 50000 MPa civarında başlayıp yine 175 ºC civarına kadar sabit ilerlemiştir. Bu sıcaklık değerinden sonra malzeme yumuşamaya başlamıştır ve eğri hafifçe yükselerek 70000 MPa civarında tepe yapmıştır. Bu sıcaklıktan sonra eğri ani bir düşüşe geçmiştir. Kayıp modül eğrisi yaklaşık 1500 MPa değerinde başlamış çok küçük bir eğimle 160ºC civarına kadar yükselmiştir ve 2000 MPa değerine ulaşmıştır. Bu sıcaklık değerinden sonra eğri ani bir yükseliş yaparak 30000 MPa'a yakın bir kayıp modüle çıkmıştır. Ulaşılan en yüksek kayıp modül değerine karşılık

gelen sıcaklık da kimi araştırmacılar için camsı geçiş sıcaklığı olarak kabul edilmiştir. Bu sıcaklık değerine kadar malzeme kararlı davranmıştır ancak bu sıcaklık değerinden sonra malzeme hızla yumuşamaya başlamıştır ve kayıp modül eğrisi de hızla düşüşe geçmiştir. Tanδ eğrisi kırmızı renkle ifade edilmiştir.

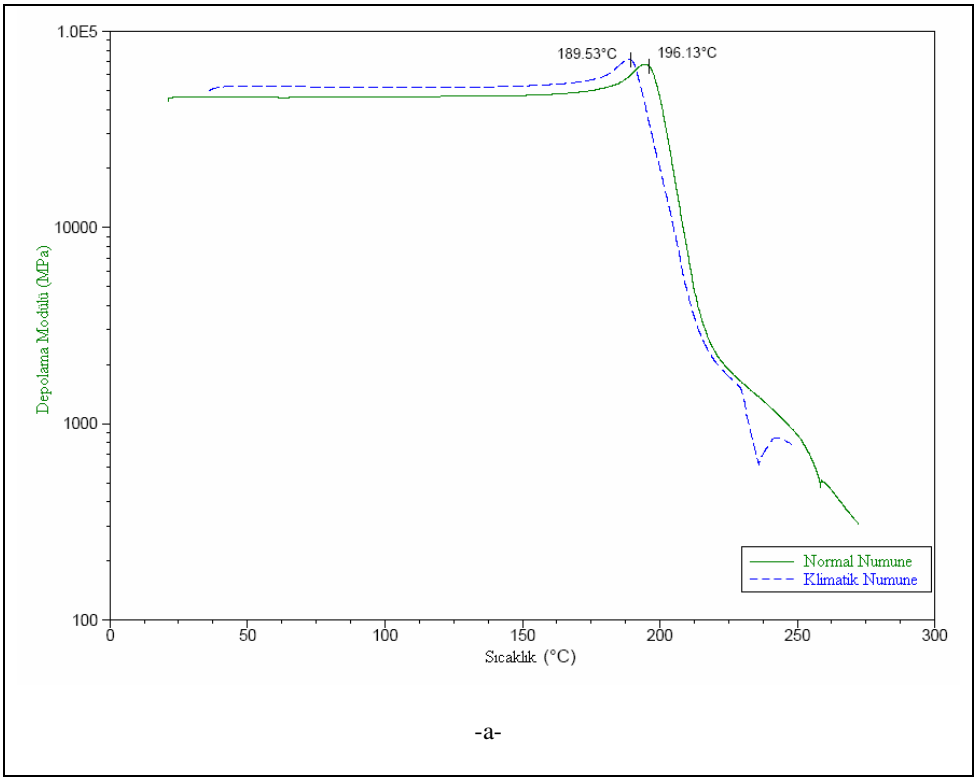


Şekil 4.23. Klimatik ortamda yaşlandırılmış numunenin DMTA sonuçlarının grafiksel olarak gösterimi

Tanδ eğrisi yaklaşık 0.05 değerinden başlamıştır ve sabit bir şekilde yine 170ºC civarına kadar sabit ilerlemiştir. Bu sıcaklık değerinden sonra eğri ani bir yükseliş göstermiştir. Bu artış yaklaşık 0.65 civarında ufak bir tepe oluşturmuştur. Bu tepe noktasının oluşmasının nedeni olarak soğuk kristalleşme ya da ısıl kalıntı gerilmeler gösterilebilir. Bu tepe sıcaklığın ilerlemesiyle tekrar aşılmıştır yani tan δ tekrar artmaya devam etmiştir. Artış yine bir tepe noktasında yaklaşık 0.8 değerinde sona ermiştir. Bu değerden sonra sıcaklık artmış ve tanδ hızla düşüşe geçmiştir.

Şekil 4.24'de klimatik ortamda yaşlandırılmış numuneler ile normal numunelerin dinamik mekanik termal analiz deneyi sonuçlarından depolama modülü eğrileri karşılaştırılarak gösterilmiştir. Dinamik mekanik termal analiz deneyleri sonucunda elde edilen verilerden depolama modülü değerleri kullanılarak hem normal

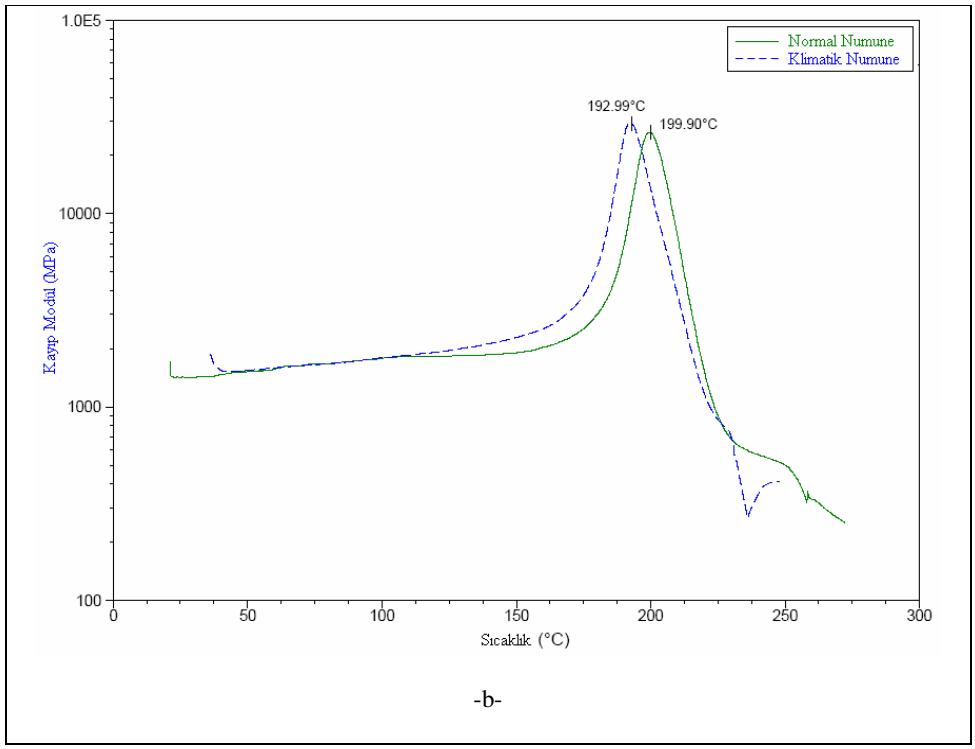
numuneler için hem de klimatik ortamda yaşlandırılmış numuneler için bilgisayar ortamında grafikleri çizdirilmiştir (Şekil 4.24). Grafikler üzerinde ayrıca camsı geçiş sıcaklıkları da gösterilmiştir.



Şekil 4.24. Klimatik ortamda yaşlandırılmış numuneler ile normal numunelerin dinamik mekanik termal analiz deneyi sonuçlarından depolama modülü eğrilerinin karşılaştırılması

Camsı geçiş sıcaklığının bulunuşunun kesin bir çözümü olmadığı için her üç eğri çeşidi için (depolama modülü, kayıp modül, tanδ) ayrı ayrı gösterilmiştir. Yeşil renkli eğri normal numuneler için depolama modülünü belirtmektedir. Mavi renkli eğri de klimatik numunelere aittir. Şekilden de görüldüğü üzere eğriler birbirlerine çok yakındır. Klimatik numunelerin eğrisi normal numunelerinkine göre çok az sola kaymıştır. Klimatik yaşlandırma neticesi yapıda su absorbsiyonu ile yayılan gerilme etkisi ile modül değerleri az da olsa normal numuneye kıyasla yüksektir. Aynı şekilde camsı geçiş sıcaklığı da 196ºC'den 189ºC civarına düşmüştür. Camsı geçiş sıcaklığı malzemeler için çok kritik bir değerdir. Bu değerden sonraki sıcaklıklarda malzemenin kullanılamayacağı anlaşılır. Grafikte görülen küçük düşüş malzememiz

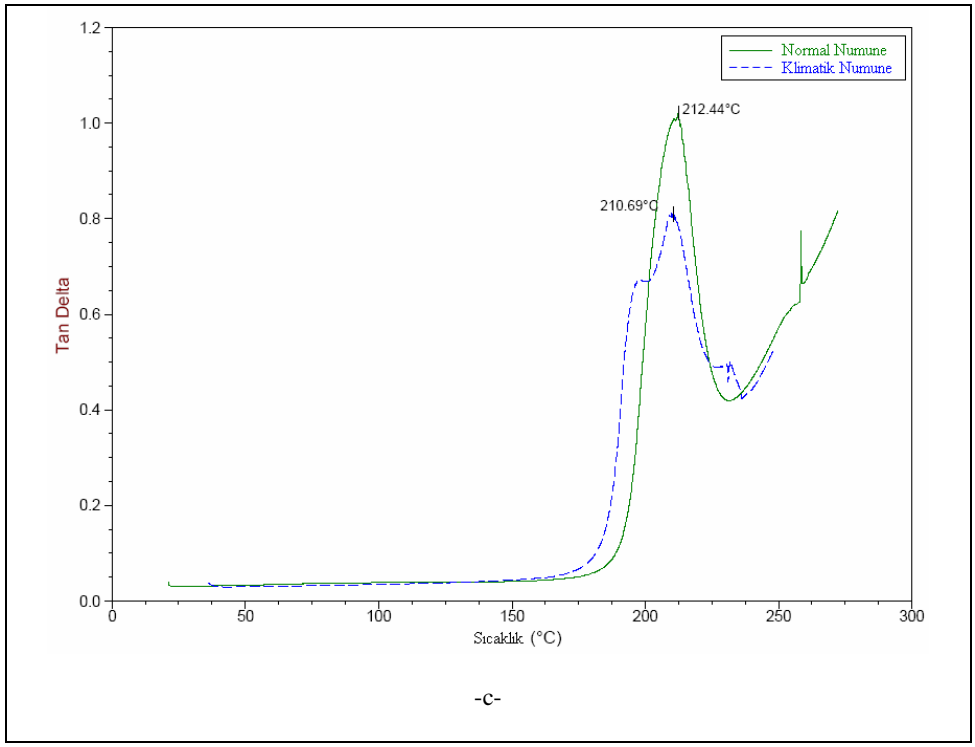
için çok kritik bir değer değildir. Ama yine de ihmal edilmemelidir. Buradaki düşüşün az oluşunun nedeni klimatik yaşlandırma süresinin az oluşundan kaynaklanmaktadır. Yani malzemelerin nemin ve sıcaklığın etkisiyle plastikleşme ve yumuşama safhasına gelmeden henüz önceki safhada olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 4.25. Klimatik ortamda yaşlandırılmış numuneler ile normal numunelerin dinamik mekanik termal analiz deneyi sonuçlarından kayıp modül eğrilerinin karşılaştırılması

Dinamik mekanik termal analiz deneyleri sonucunda çizdirilen grafiklerden bir diğeri de kayıp modül eğrileridir. Hem klimatik ortamda yaşlandırılmış hem de normal numuneler için ayrı ayrı eğriler çizdirilip aynı eksende karşılaştırılmıştır (Şekil 4.25). Depolama modülü eğrilerinin karşılaştırılmasındaki gibi bu eğrilerde de birbirlerine benzerlik vardır. Klimatik numunelerin eğrisi normal numunelerinkine göre biraz sola kaymıştır. Aynı şekilde camsı geçiş sıcaklığı da yaklaşık 200ºC'den 193ºC'ye düşmüştür. Bu sıcaklık değeri düşüşü malzemeyi ciddi şekilde etkileyecek kadar büyük değildir ancak ihmal de edilmemelidir. Bu ufak düşüşün nedeni yukarıda da açıklandığı gibi az da olsa klimatik yaşlandırmadır. Klimatik numunelerde kayıp

modül değeri yaklaşık 115 ºC'den sonraki sıcaklıklarda diğerine göre biraz daha yüksek olmuştur.



Şekil 4.26. Klimatik ortamda yaşlandırılmış numuneler ile normal numunelerin dinamik mekanik termal analiz deneyi sonuçlarından tanδ eğrilerinin karşılaştırılması

Dinamik mekanik termal analiz deneyleri sonucunda çizdirilen grafiklerden bir diğeri de tanδ eğrileridir. Yine hem normal numuneler hem de klimatik ortamda yaşlandırılmış numuneler için ayrı ayrı eğrileri çizdirilmiştir (Şekil 4.26). Diğer verilerin grafiklerine göre bu grafik de biraz farklılık gözlenmektedir. Normal numunelerin tanδ değeri yaklaşık 1 civarına yükselirken klimatik numunelerin tanδ değeri önce 0.65 civarına yükselmiştir. Burada bir ufak tepe oluşumu gözlenmektedir (197.66 ºC). Sıcaklığın artmasıyla 210 ºC civarında tanδ değeri tekrardan yükselişe geçerek 0.8 değerinde bir tepe oluşturmuştur. Camsı geçiş sıcaklığı ise normal numunede 212.44ºC klimatik numunede 210.69ºC civarındadır. Görülüyor ki yaklaşık 2ºC gibi bir fark ortaya çıkmıştır. Klimatik numunelerde plastikleşme etkisi olmamıştır. Tanδ değerleri normal numunelerinkinden daha düşük çıkmıştır. Sıvının yapıya girmesi ile mekanik bir gerilme olmuş ve bu da tanδ değerleri aşağı gelmiştir.

4.6. Termal Şok İle Yaşlandırılmış Numunelerin Darbe Davranışlarının, Dinamik, Mekanik, Termal Özelliklerinin Ve Kırılma Yapılarının İncelenmesi

4.6.1 Termal şok ile yaşlandırılmış numunelerin darbe davranışlarının incelenmesi

Polimer kompozit malzemeler endüstriyel uygulamalarda yaygın bir şekilde kullanılmaktadırlar. Havacılık endüstrisinde uçak gövde malzemesi olarak kullanılan sürekli karbon fiber takviyeli polieterimid kompozit malzemeler vardır. Uçağın uçuşu sırasında farklı yüksekliklerde gövde sıcaklığı yaklaşık +100 ºC'ye kadar yükselmektedir. Bununla birlikte havanın sıcaklığı da aniden 0ºC civarına düşebilmektedir. Bu ani hava sıcaklık değişimleri uçak gövde malzemesi polimer kompozitlerin sıcaklıklarını da etkilemektedir. Kompozit malzemedeki bu ani sıcaklık değişimi ise malzemenin darbe davranışlarında değişimlere neden olacaktır.

Literatür araştırmalarına göre termal şok sonucu polimer kompozitlerin darbe davranışlarında düşüş gözlemlenmiştir. Polieterimid matrisli kompozit malzeme ile bu konuda pek fazla çalışma mevcut değildir. Bu değişimleri incelenmesi için bir dizi çalışma yapıldı. Malzeme 0ºC - 100 ºC arasında termal şoka tabi tutuldu. Malzeme önce 0ºC'deki buzlu su içine daldırılıp bir dakika bekletildikten sonra aniden 100 ºC' deki kaynar su içine daldırılıp bir dakikada burada bekletildikten sonra bir çevrim tamamlanmış oldu. Malzemeler 10'arlı gruplar halinde 50 – 200 – 500 – 1000 termal şok çevrimlerine tabi tutuldu. Bu yaşlandırılmış malzemelerin darbe davranışlarındaki değişimler darbe test cihazında darbe yorulma testlerine tabi tutularak araştırıldı. Termal şoka tabi tutulan numuneler hem normal numunelerle hem de farklı termal çevrim sayılarına maruz kalan numunelerle karşılaştırılarak incelenmiştir. Termal şoka tabi tutulan numuneler normal numunelerdeki parametreler ile aynı darbe yorulma deneylerine tabi tutuldu. Sonuç olarak darbe enerjisi çalışma aralığını 0.54 J -0.94 J olarak belirlendi.

Bu darbe enerjisi aralığında belirli bir farkla 10 adet darbe enerji değeri belirledik. Bu darbe enerjileri; 0.54, 0.57, 0.61, 0.65, 0.73, 0.77, 0.81, 0.85, 0.90, 0.94 J olarak seçildi. Bu darbe enerjilerinin her biriyle numunelere tekrarlı darbeler uygulandı. Her bir deney sırasında sık sık kayıt alındı ve veriler bilgisayar ortamında çizilerek

grafiksel sonuçlar elde edildi. Grafikler F_{maks}, E_{maks}, $E.F_{maks}$, $X_{e.v.}$, zaman parametrelerine göre çizildi. Her bir darbedeki veri alma işlemi 8 μs. kadar sürmektedir ve bu sürede toplam 2000 veri alınmaktadır.

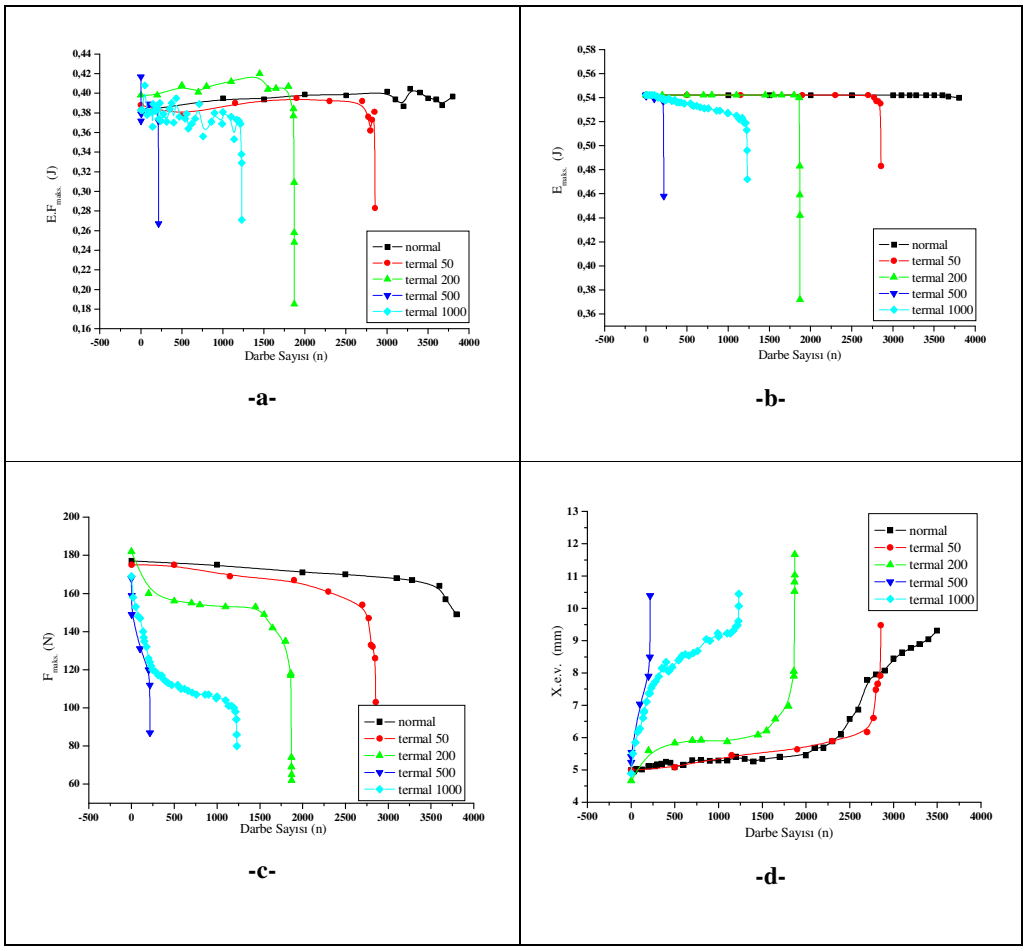
Tablo 4.3. Termal çevrimlerle yaşlandırılmış numuneler ile normal numuneler için darbe enerjisine bağlı olarak değişen kırılma için gerekli darbe tekrar sayılarının karşılaştırılması

Darbe Enerjisi (J)	Normal Numuneler (n)	50 Termal Çevrim (n)	200 Termal Çevrim (n)	500 Termal Çevrim (n)	1000 Termal Çevrim (n)
0.54	3580	2856	1873	218	1231
0.57	829	825	804	364	342
0.61	473	961	396	428	302
0.65	382	334	295	195	182
0.69	208	24	180	174	79
0.73	122	115	92	91	47
0.77	80	60	38	19	36
0.81	66	67	42	30	34
0.90	43	34	13	12	22
0.94	21	19	6	10	8

Tablo 4.3'de normal numuneler ile farklı termal çevrim sayıları ile yaşlandırılmış numunelerin darbe-yorulma deneylerinde hasara uğramaları için gerekli darbe tekrar sayılarının karşılaştırılması gösterilmiştir. Sonuçlardan birbirleriyle uyumsuz gibi görünen yani standart sapması yüksek olanlar da vardır. Bunlar yorumlara katılmamaktadır yani ihmal edilmektedir. Tablodaki 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.

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. Bu konuyla ilgili bir araştırma yapan Abedian ve Szyszkowski (1997) kompoziti oluşturan bileşenlerin (fiber-matris) birbirinden bağımsız genleşmelerinin dikkate alınması gerektiğini, matrisin fiberden daha fazla genleştiğini ifade etmişlerdir. Farklı bileşenler arasında oluşan iç gerilmelerde malzemenin mekanik özelliklerini düşürmektedir.



Şekil 4.27. 0.54 J Darbe enerjisi için $E.F_{maks}$, E_{maks}, F_{maks}, X.e.v. grafiklerinin normal numuneler ile termal numuneler için karşılaştırılması

Şekil 4.27'de 0.54 J darbe enerjisi için $E.F_{maks}$, E_{maks}, F_{maks}, X.e.v. grafiklerinin normal numuneler ile termal yaşlandırılmış numuneler için karşılaştırılması gösterilmiştir.

Termal yaşlandırılmış numunelerin darbe-yorulma deneyleri sonrası verilerle çizdirilen E_{maks} grafiklerinde de önceki bölümlerde anlatılmış olan normal

numunelerin grafiklerinde olduğu gibi iki ayrı bölgenin oluşumu görülmüştür. Bu iki bölge normal numuneler için anlatılmıştı. Yineleyecek olursak birinci bölgede belirli bir darbe sayısına kadar maksimum absorbe edilen enerji değişimi yaklaşık olarak sabit kaldığı belirtilmişti. Bunun nedeni olarak, $F_{maks.}$-tekrar darbe sayısı eğrilerindeki (Şekil 4.27-c) ilk iki bölgede gerekli olan enerjinin sabit kaldığı gözlenmiştir. E_{maks} değerlerinin ikinci bölgesindeki ani düşüşü ile F_{maks} eğrilerinin üçüncü bölgelerindeki düşüşün yaklaşık olarak aynı tekrar sayısında meydana geldiği belirtilmişti. Buna göre, bu bölgede matris ve tabakalar arası ayrılma hasarlarından sonra fiberlere gelen yükün artmasıyla fiberlerin dayanamayıp absorbe edilen darbe enerjisi nedeniyle kırıldıkları anlatılmıştı. Termal yaşlandırılmış numunelerin E_{maks} grafikleri normal numunelerin E_{maks} grafiklerinden daha eğimlidir. Termal çevrim sayıları artırıldıkça grafiğin eğiminin daha da arttığı gözlemlenmiştir.

Şekil 4.27-a'daki $E.F_{maks}$ grafikleri incelendiğinde artan tekrarlı yük sayısı ile birlikte $E.F_{maks}$ değerlerinin azaldığı görülmektedir. Tekrarlı yük sayısındaki artışla birlikte numunelerin F_{maks} değerlerinin azalması nedeniyle $E.F_{maks}$ değerlerinde düşüş meydana gelmiştir. E_{maks}-Tekrar sayısı grafiklerindeki (Şekil 4.27-b) maksimum E_{maks} değerlerine göre $E.F_{maks}$– Tekrar sayısı grafiklerindeki (Şekil 4.27-a) maksimum $E.F_{maks}$ değerleri bir miktar düştüğü görülmüştür. Bunun sebebinin, $E.F_{maks}$ değerlerinin elastik sınırlar içindeki alanı ifade ettiği belirtilmişti.

Şekil 4.27-a'daki karşılaştırma sonucunda termal yaşlandırılmış numunelerin $E.F_{maks}$ grafiklerinin eğimlerinin normal numunelerin grafiklerinin eğimlerine göre biraz daha artmış olduğu görülüyor. Normal numunelere göre termal yaşlandırılmış numuneler daha hızlı şekilde hasara uğramıştır diyebiliriz. Termal çevrim sayısı arttırıldıkça bu düşüş eğimi daha da artmıştır. Normal numuneler için ilk darbelerde elde edilen $E.F_{maks}$ değerleri termal yaşlandırılmış numuneler için ilk darbelerde elde edilen $E.F_{maks}$ değerlerinden daha yüksek çıkmıştır. Bunun nedeni olarak termal yaşlandırılmış numuneler darbe enerjilerini daha çok sönümlemişlerdir yani plastikleşerek yumuşamışlardır denebilir.

Normal numunelerin F_{maks} grafiklerinde olduğu gibi termal yaşlandırılmış numunelerin F_{maks} grafiklerinde de üç ayrı bölge görülmüştür (Şekil 4.27-c). Birinci bölgenin belirli bir darbe sayısına kadar F_{maks} değerlerinde hızlı bir düşüşün olduğu

ve darbe etkisi ile basma bölgesinde ilk fiber hasarlarının oluştuğu bölge olduğu belirtilmişti. İkinci bölge "plato" bölgesi olarak adlandırılmıştı 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 oluştuğu belirtilmişti. Üçüncü bölgede ise artan tekrarlı darbe sayısıyla matris-fiber ara yüzeyinde oluşan tabakalar arası ayrılmalar nedeniyle yeterince desteklenmeyen fiberlere gelen yük miktarı arttığı ve fiberlerin hızla kırılmış olduğu anlatılmıştı. F_{maks} değerlerinin vuruş sayısı ile değişmesi ve bu esnada üç ayrı bölgenin oluşumu Şekil 4.27-c'de temsili olarak gösterilmiştir. Termal yaşlandırılmış numunelerin grafikleri normal numuneninkilere göre daha eğimlidir. Eğimin fazla olması artan darbe tekrar sayısıyla her darbede 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 karşın termal yaşlandırılmış numunelerin daha hızlı hasara uğradığını söylemiştik. Bunu destekleyen bir diğer sonuç da deformasyon miktarlarındaki (X.e.v.) değişim grafikleridir. Bu grafiklere göre termal çevrim sayısı arttırıldıkça deformasyon miktarı hızlanmaktadır sonuç olarak eğim artmaktadır.

Termal yaşlandırılmış numunelerin deformasyon grafiklerinde normal numuneninkinde F_{maks} grafiklerinde olduğu gibi yine 3 ayrı bölge gözümüze çarpmıştır. Birinci bölge için fiberlerde basma nedenli burkulma ve kayma hasarları olduğu bölge olarak açıklanmıştı. Normal numunelerle için yapılan deneylerde deformasyonlar yavaş olurken termal numuneler ile yapılan deneylerde hızlı (az tekrar sayısında) olduğu görülmüştür. İkinci bölge ise "plato" olarak nitelendirilmişti. Bu bölgede ağırlıklı olarak matris çatlaklarının ilerlediği ve tabakalar arası ayrılmaların arttığı söylenmişti. Fiber kırılmalarının olmadığı bu bölgede deformasyonlarda düşük olmaktadır. Üçüncü bölgede ise fiberler darbelere daha fazla dayanamayıp hasara uğradıkları belirtilmişti. Normal numunenin son deformasyon miktarı 9.5 mm civarındayken termal numunelerde bu miktar yaşlandırma etkisiyle yaklaşık 10.5–11.5 mm. seviyelerine çıkmıştır.

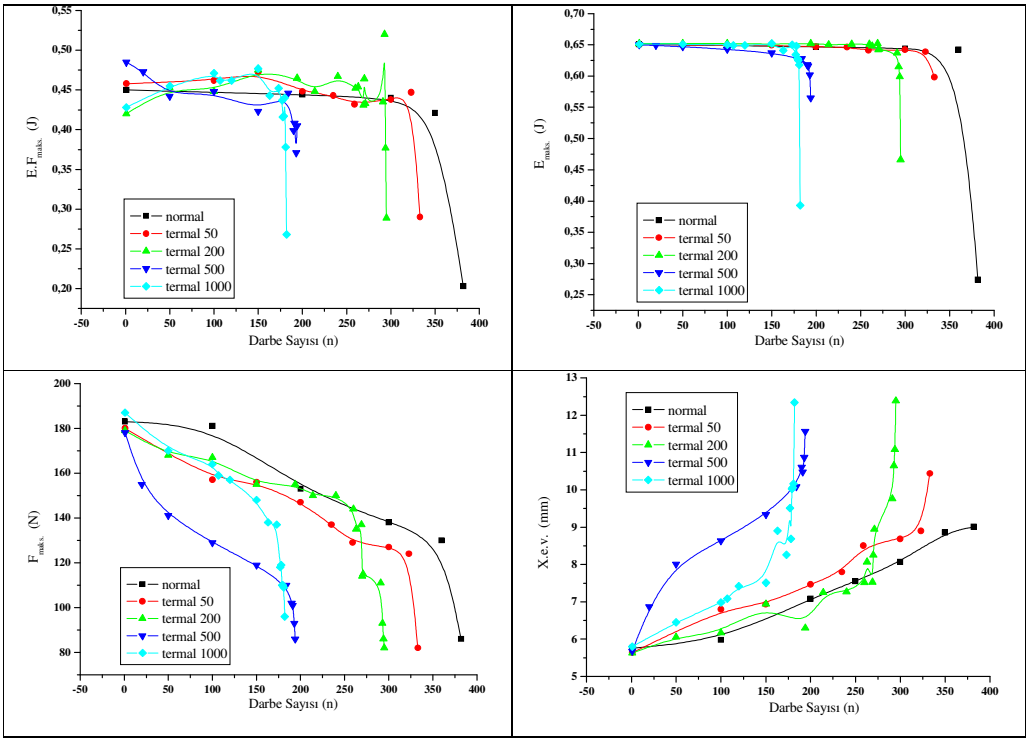
0.65 J darbe enerjisi için $E.F_{maks}$, E_{maks}, F_{maks}, X.e.v. grafiklerinin normal numuneler ile termal yaşlandırılmış numuneler için karşılaştırılması Şekil 4.28'de gösterilmiştir.

F_{maks} grafikleri karşılaştırmalı olarak incelendiğinde ilk vuruşlarda alınan verilere göre ulaşılan en yüksek kuvvet değerleri normal numuneye kıyasla termal yaşlandırılmış numunelerde bir miktar daha düşük çıktığı görülmektedir. Termal çevrim sayısı arttırıldıkça eğrilerin ilk verilerine göre ilk vuruşlarda elde edilen en yüksek kuvvet değerleri giderek düşmektedir.

Normal numuneye kıyasla termal numunelerin kuvvet-darbe tekrar sayısı eğrilerinin eğimlerinin arttığı görülmektedir. Bu sonuç ayrıca termal çevrim sayısının artması sonucu darbe-yorulma deneylerinde numuneye uygulanan darbe tekrar sayısının düşmesiyle desteklenmektedir.

Şekil 4.28'deki E_{maks} grafikleri incelendiğinde termal çevrim sayısının artmasıyla birlikte darbe-yorulma deneylerinde hasar için gerekli darbe tekrar sayısının düştüğü görülmektedir. Bu sebeple eğriler sıfıra doğru kaymıştır. Ayrıca eğrilerin son düşüş kısımları karşılaştırılacak olursa normal numunede hafif eğimli bir geçiş ile düşüş gerçekleşirken termal çevrim sayısı arttıkça bu düşüş çok ani bir şekilde gerçekleştiği görülmektedir.

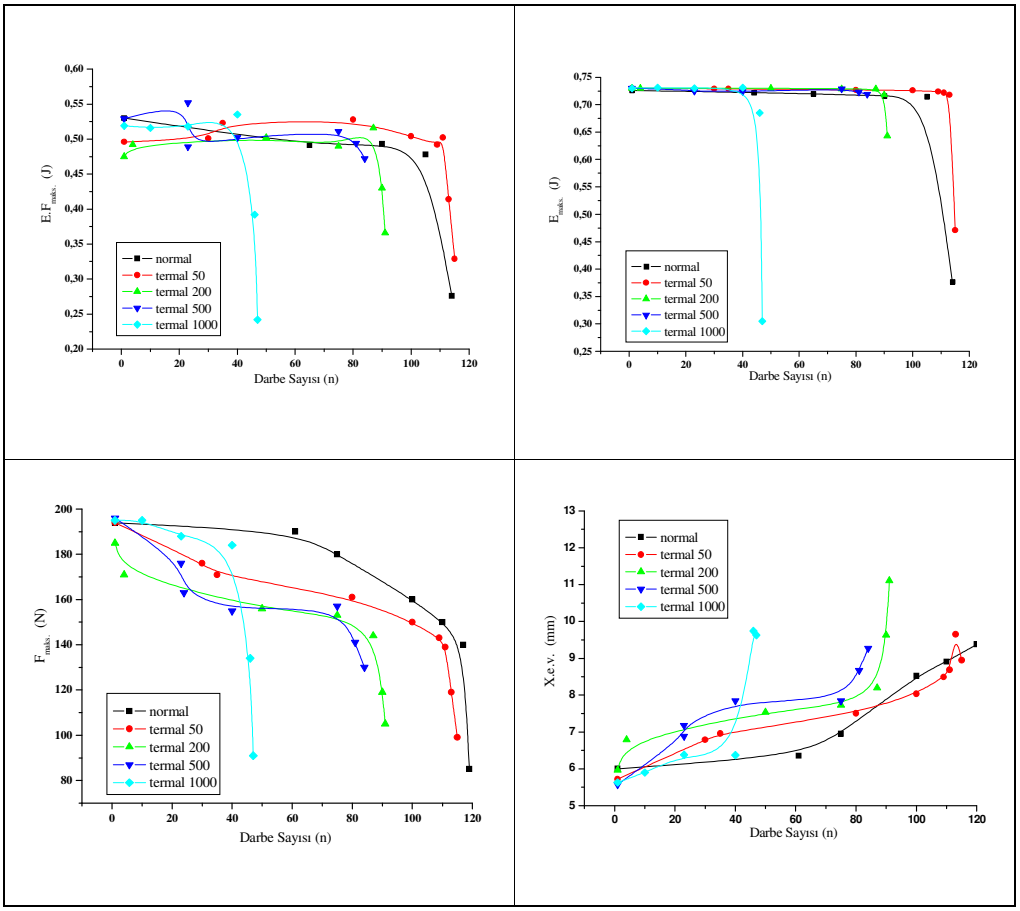
Şekil 4.28'deki $E.F_{maks}$ grafikleri incelendiğinde çok karmaşık bir durum görülmektedir. Genel itibariyle E_{maks} grafiklerine benzeyen bu grafiklerde yine aynı şekilde hasar için gerekli darbe tekrar sayısının azalmasıyla birlikte eğrilerin sola yani sıfıra kaydığı görülmektedir. Son düşüş kısımlarını karşılaştıracak olursak normal numuneye kıyasla termal yaşlandırılmış numunelerin daha ani düşüşle hasara uğradıkları görülmüştür.



Şekil 4.28. 0.65 J Darbe enerjisi için $E.F_{maks}$, E_{maks}, F_{maks}, X.e.v. grafiklerinin normal numuneler ile termal numuneler için karşılaştırılması

Şekil 4.28'deki X.e.v. grafikleri incelendiğinde ilk bakışta normal numunenin eğrisine göre termal çevrim sayısının arttırılmasıyla eğrilerin eğimlerinin arttığı görülmektedir. Aynı zamanda termal çevrim sayısı arttıkça deney sonunda ulaşılan en yüksek deformasyon miktarlarının da 9 mm civarından 12.5 mm civarlarına çıktığı görülmektedir.

Şekil 4.29'da 0.73 J darbe enerjisi için $E.F_{maks}$, E_{maks}, F_{maks}, X.e.v. grafiklerinin normal numuneler ile termal yaşlandırılmış numuneler için karşılaştırılması gösterilmiştir.

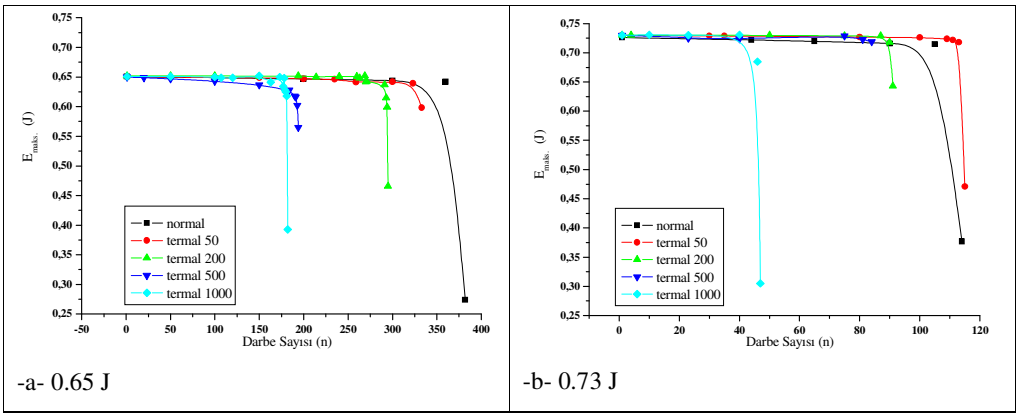


Şekil 4.29. 0.73 J Darbe enerjisi için E.F$_{maks}$, E$_{maks}$, F$_{maks}$, X.e.v. grafiklerinin normal numuneler ile termal numuneler için karşılaştırılması

Darbe-yorulma deneylerinde artan darbe enerji seviyesiyle hasar için gerekli darbe tekrar sayıları hem normal numune için hem de termal numuneler için azalmıştır. İlk vuruşlarda ulaşılan en yüksek kuvvet değerleri yaklaşık aynı seviyededir. Termal çevrim sayısı arttıkça F$_{maks}$ eğrileri darbe tekrar sayısı azaldığı için sola kaymıştır. Son darbelerde elde edilen kuvvet değerleri termal çevrim sayısı arttıkça normal numuneye kıyasla artmıştır. E$_{maks}$ grafikleri incelendiğinde ilk bakışta ilk vuruşlardaki E$_{maks}$ değerlerinin yaklaşık aynı olduğu ve termal çevrim sayısının artmasıyla son vuruşlardaki E$_{maks}$ değerlerinin de normal numuneye göre arttığı görülmektedir. Eğrilerin eğimleri normal numuneye kıyasla termal çevrim sayısı arttıkça artmaktadır. E$_{maks}$ grafiklerine benzeyen E.F$_{maks}$ grafiklerinde hasar için gerekli darbe tekrar sayısının azalmasıyla birlikte eğrilerin sola yani sıfıra kaydığı görülmektedir. Son düşüş kısımlarını karşılaştıracak olursak normal numuneye kıyasla termal yaşlandırılmış numunelerin daha ani düşüşle hasara uğradıkları

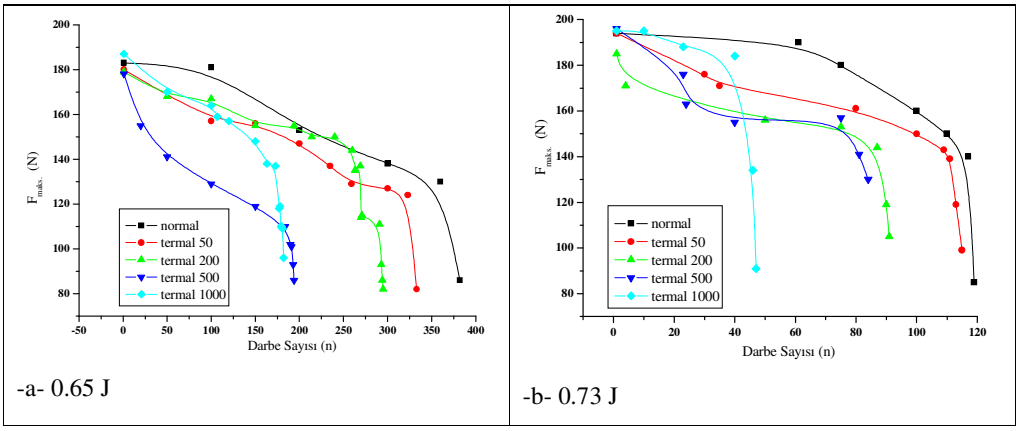
görülmüştür. Normal numuneye kıyasla termal aşlandırılmış numunelerin deformasyon miktarları daha fazladır. X.e.v. grafikleri incelendiğinde termal çevrim sayısının artmasıyla eğrilerin eğimlerinin arttığı ve hasar oluşumunun hızlandığı görülmektedir. İlk vuruşlarda yaklaşık aynı seviyede (7–8 mm.) deformasyon miktarları görülürken termal çevrim sayısının artmasıyla bu değerlerin daha yüksek seviyelere (10–12 mm.) çıktığı görülmektedir.

Normal numulelerle farklı sayılardaki termal çevrimlerle yaşlandırılan numunelerin 0.54–0.94 J arasındaki darbe enerji seviyelerindeki tekrarlı darbelerle yapılan darbe-yorulma deneyleri sonuçlarından sadece "3" darbe enerji seviyesi için E.F_{maks}, E_{maks}, F_{maks}, X.e.v.grafikleri gösterilmiştir. Bunun nedeni grafik gruplarının birbirleriyle yaklaşık aynı olması ve yorumlarının birbirine çok benzemesidir. Bu sebeple diğerlerinin gösterilmesine gerek duyulmamış olup sadece kayıt altında tutulmuştur.



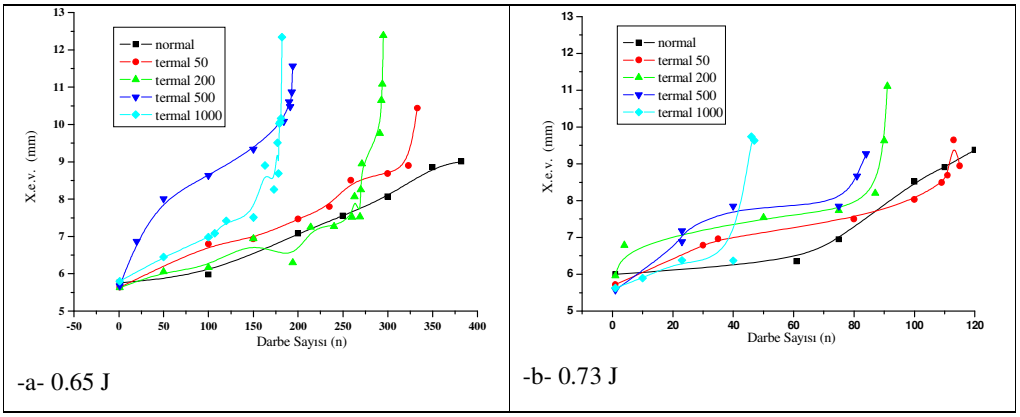
Şekil 4.30. 0.65 J ve 0.73 J darbe enerjileri için normal ve termal yaşlandırılmış numunelerin E_{maks} grafiklerinin karşılaştırılması

Şekil 4.30'daki "a" ve "b" şekilleri karşılaştırıldığında darbe enerji seviyesinin artmasıyla E_{maks} değerlerinin önemli derecede arttığı görülmektedir. İlk vuruşlarda ulaşılan E_{maks} değerleri 0.65 J değerindeki tekrarlı darbelerle yapılan darbe-yorulma deneyi için 0.65 J seviyesindeyken 0.73 J değerindeki tekrarlı darbelerle yapılan darbe-yorulma deneyinde 0.72 J değerlerine yükselmiştir.



Şekil 4.31. 0.65 J ve 0.73 J darbe enerjileri için normal ve termal yaşlandırılmış numunelerin F_{maks} grafiklerinin karşılaştırılması

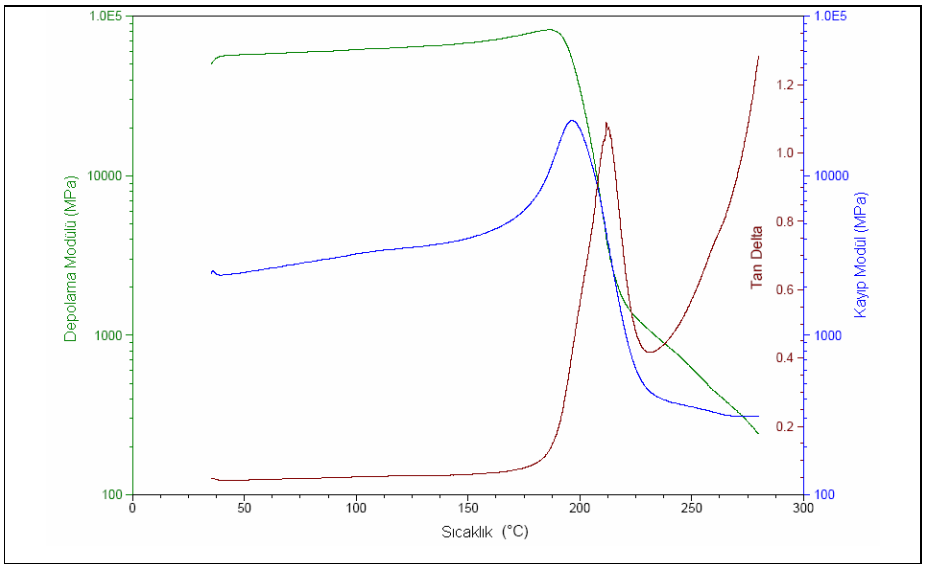
Şekil 4.31'deki "a" ve "b" şekilleri karşılaştırıldığında darbe enerji seviyesinin artmasıyla F_{maks} değerlerinin önemli derecede arttığı görülmektedir. İlk vuruşlarda ulaşılan F_{maks} değerleri 0.65 J değerindeki tekrarlı darbelerle yapılan darbe-yorulma deneyi için 180–190 N seviyesindeyken 0.73 J değerindeki tekrarlı darbelerle yapılan darbe-yorulma deneyinde yaklaşık 195 N değerlerine yükselmiştir. Şekil 4.32'deki "a" ve "b" şekilleri karşılaştırıldığında düşük darbe enerji seviyesiyle yapılan deneylerde daha hızlı deformasyon oluşumu ve daha yüksek deformasyon miktarları görülmektedir. 0.73 J değerindeki tekrarlı darbelerle yapılan deneylerde eğrilerin eğimi 0.65 J değerindeki tekrarlı darbelerle yapılan deneylerdeki eğrilerin eğiminden daha fazladır.



Şekil 4.32. 0.65 J ve 0.73 J darbe enerjileri için normal ve termal yaşlandırılmış numunelerin F_{maks} grafiklerinin karşılaştırılması

4.6.2. Termal şok ile yaşlandırılmış numunelerin dinamik, mekanik ve termal özelliklerinin incelenmesi

Termal etki ile yaşlandırılan numunelerin dinamik termal özelliklerindeki değişimler dinamik mekanik termal analiz (DMTA) yöntemiyle incelenmiştir. Cihazdan alınan veriler yardımıyla sürekli fiber takviyeli polimer matrisli kompozit malzemenin depolama modülü, kayıp modülü, tanδ grafikleri bilgisayar ortamında çizdirilip sonuçlar irdelenmiştir. Şekil 4.33'de normal numunenin dinamik mekanik termal analiz sonucu elde edilen depolama modülü, kayıp modül, tanδ verilerinin grafikleri gösterilmektedir.



Şekil 4.33. Normal numunenin dinamik mekanik termal analiz sonucu eğrileri

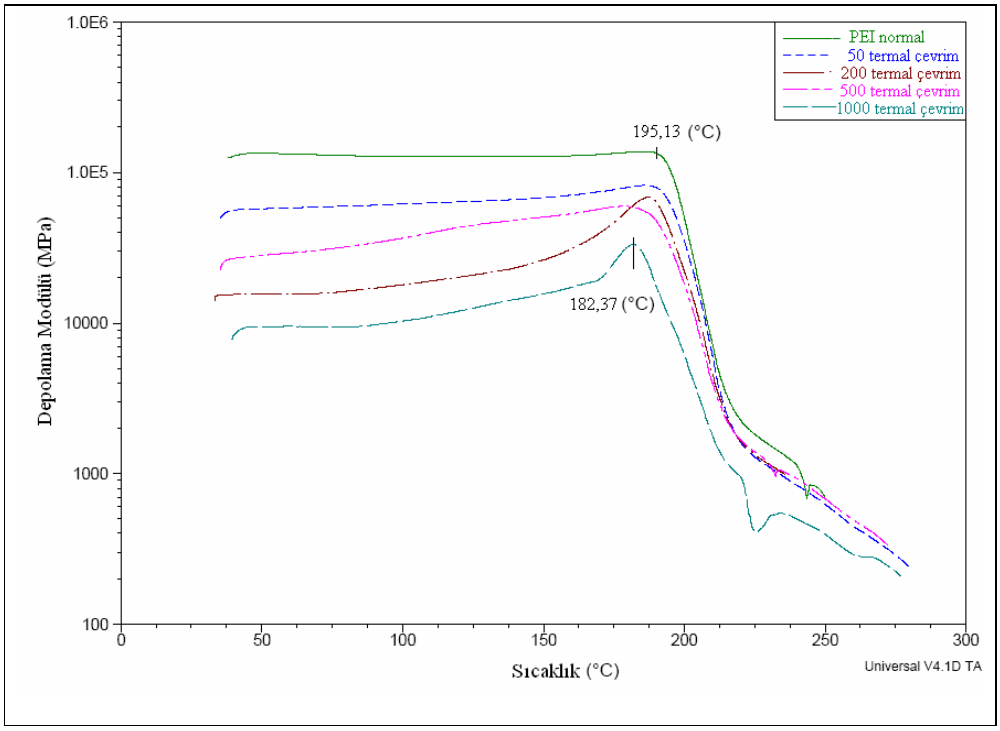
Yeşil renkli eğri depolama modülünü ifade etmektedir. Depolama modülü şekilden de görüldüğü üzere 45000 MPa civarında başlayıp 175 ºC civarına kadar sabit ilerlemiştir. Bu sıcaklık değerinden sonra malzeme yumuşamaya başlamıştır ve eğri hafifçe yükselerek 75000 MPa civarında tepe yapmıştır. Bu tepe noktasına karşılık gelen 196.13ºC kimi araştırmacılara göre camsı geçiş sıcaklığı olarak kabul edilebilir. Bu sıcaklık değeri malzememizin en yüksek kullanım değeridir. Bu sıcaklıktan sonra eğri ani bir düşüşe geçmiştir.

"Kayıp modül" değerleri deformasyonlar esnasında geri dönüşü olmayan ısıl ve mekanik kayıpları temsil etmektedir. Kayıp modül eğrisi mavi renkle gösterilmiştir. Kayıp modül eğrisi yaklaşık 1500 MPa değerinde başlamış çok küçük bir eğimle 165ºC civarına kadar yükselmiştir ve 2000 MPa değerine ulaşmıştır. Bu sıcaklık değerinden sonra eğri ani bir yükseliş yaparak 25000 MPa'a yakın bir kayıp modüle çıkmıştır. Ulaşılan en yüksek kayıp modül değerine karşılık gelen sıcaklık (199.65ºC) da kimi araştırmacılara göre camsı geçiş sıcaklığı olarak kabul edilebilir. Bu sıcaklık değerine kadar malzeme kararlı davranmıştır ancak bu sıcaklık değerinden sonra malzeme hızla yumuşamaya başlamıştır ve kayıp modül eğrisi de hızla düşüşe geçmiştir.

Tanδ eğrisi yaklaşık 0.05 değerinden başlamıştır ve sabit bir şekilde yine 160ºC civarına kadar sabit ilerlemiştir. Bu sıcaklık değerinden sonra eğri ani bir yükseliş göstermiştir. Bu artış yaklaşık 1 değerine kadar artış göstermiştir ve bu değerde tepe noktası oluşmuştur. Bu tepe noktasına karşılık gelen sıcaklık değeri yaklaşık 212.44ºC'dir. Bu tepe sıcaklığın ilerlemesiyle aşılmıştır ve tanδ hızla düşüşe geçmiştir.

Termal yaşlandırma işlemi dört farklı çevrim sayısına göre yapılmıştır. Bu dört farklı çevrim sayısına göre yaşlandırılan malzemeler dinamik mekanik termal analize tabi tutulduktan sonra sonuçlar yine depolama modülü, kayıp modül, tanδ parametrelerine göre çizdirilmiştir. Her farklı çevrim sayısı için bu sonuçları normal numunelerinkiyle karşılaştırarak inceledik.

Şekil 4.34; farklı sayılarda termal çevrimle yaşlandırılmış numunelerin ve normal numunenin dinamik mekanik termal analiz sonuçlarından depolama modülü eğrilerinin karşılaştırılması göstermektedir.

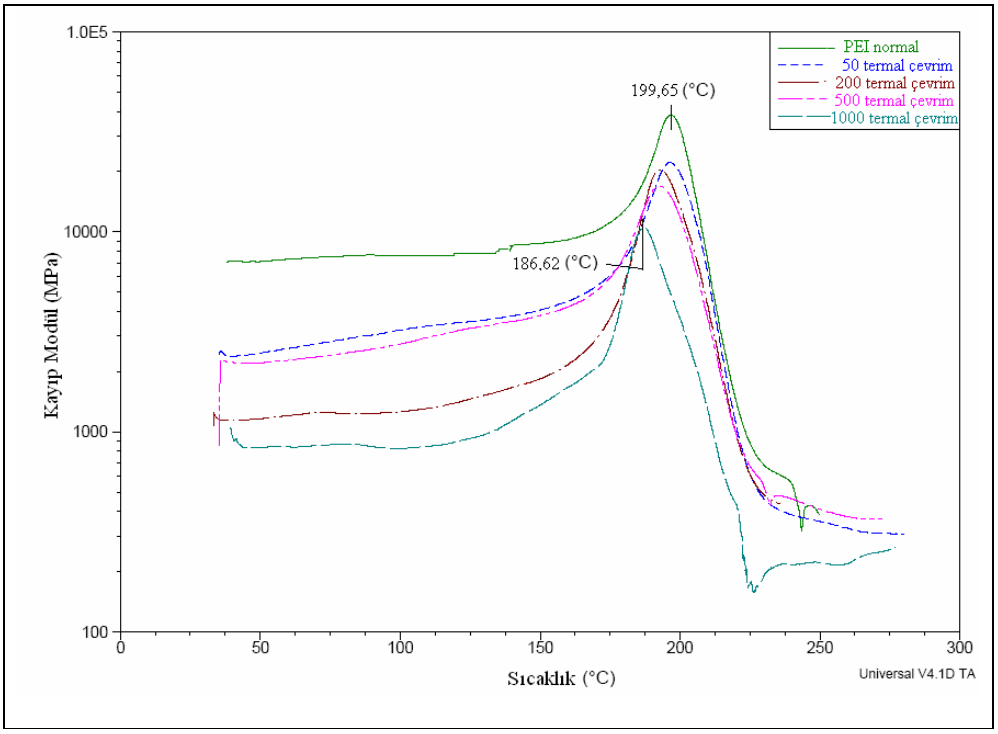


Şekil 4.34. Farklı sayılardaki termal çevrimlerle yaşlandırılan numunelerin ve normal numunenin dinamik mekanik termal analiz sonuçlarından depolama modülü eğrilerinin karşılaştırılması

Şekil 4.34 incelendiğinde normal numunenin depolama modülü termal yaşlandırılmış numunenin depolama modülünden daha yüksek bir değer göstermiştir. Termal çevrim sayısı arttırıldıkça bu değer normal numuneye kıyasla giderek düşmektedir. Normal numunenin depolama modülü yaklaşık 195 ºC seviyesine kadar sabit ilerlemiştir (100000 MPa). Bu değerden sonra modül düşüş göstermiştir. Depolama modülüne göre normal numunenin camsı geçiş sıcaklığı (Tg) yaklaşık 195.13 ºC çıkmıştır. 1000 adet termal çevrime tabi tutulan numunenin depolama modülü normal numuneninkine kıyasla yaklaşık 1/10 oranına (10000 MPa), ayrıca depolama modülüne göre camsı geçiş sıcaklığı da normal numuneninkine kıyasla 182.37 ºC değerine düşmüştür.

Sonuç olarak termal çevrim sayısı arttırıldıkça hem depolama modülünün hem de camsı geçiş sıcaklığının düştüğü görülmektedir. Bu nedenle malzemenin termal yaşlandırma sonucu mekanik ve termal özelliklerini kaybettiği sonucuna varılmıştır.

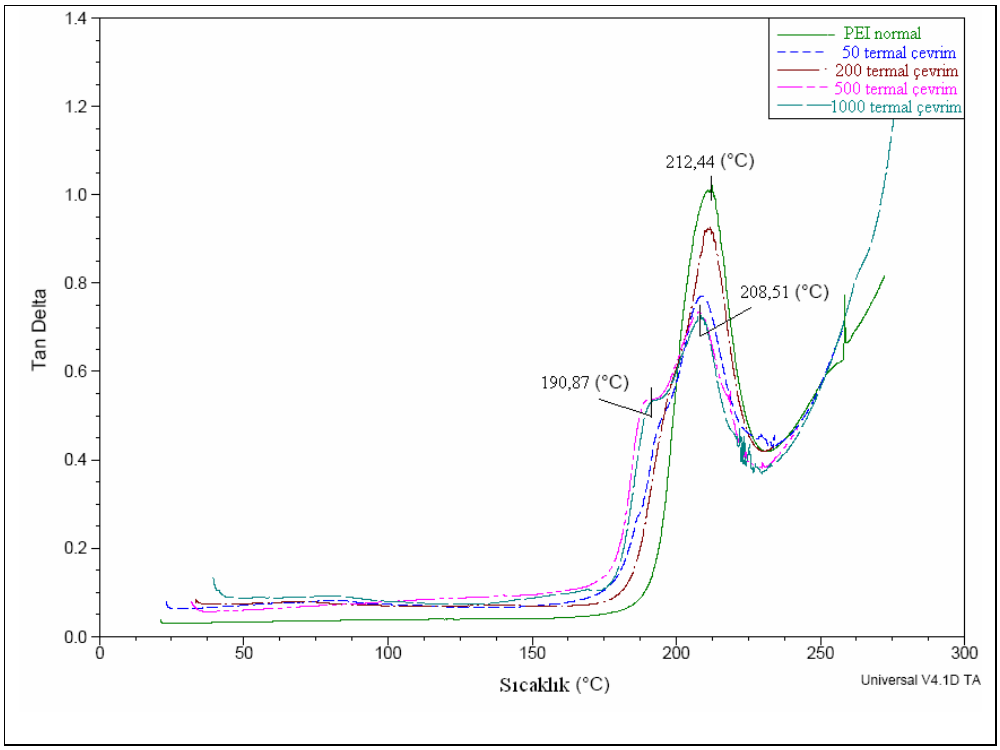
Şekil 4.35; farklı sayılarda termal çevrimle yaşlandırılmış numunelerin ve normal numunenin dinamik mekanik termal analiz sonuçlarından kayıp modül eğrilerinin karşılaştırılması göstermektedir.



Şekil 4.35. Farklı sayılardaki termal çevrimlerle yaşlandırılan numunelerin ve normal numunenin dinamik mekanik termal analiz sonuçlarından kayıp modül eğrilerinin karşılaştırılması

Şekil 4.35 incelendiğinde normal numunenin kayıp modül eğrisi yaklaşık 7000 MPa civarında başlamıştır ve 150 ºC seviyesine kadar sabit ilerlemiştir. Buna karşılık termal çevrimle yaşlandırılmış numunelerin kayıp modül eğrileri çevrim sayısı arttıkça giderek düşmüştür. 1000 adet termal çevrime tabi tutulan numunenin kayıp modül eğrisi yaklaşık 900 MPa civarındadır ve 110 ºC seviyesine kadar sabit ilerlemiştir. Normal numunenin modülü 150 ºC'den sonra hızlı artış göstermiştir ve 199.65 ºC sıcaklığında tepe yapmıştır. Bu sıcaklık değeri kayıp modül eğrisine göre normal numunenin camsı geçiş sıcaklığı değeridir. Termal numunenin modülü de 110 ºC seviyesinden sonra hızlı artış göstermiştir ve 186.62 ºC sıcaklığında tepe yapmıştır. Bu sıcaklık değeri kayıp modül eğrisine göre 1000 adet termal çevrime tabi tutulan numunenin camsı geçiş sıcaklığı değeridir.

Şekil 4.36; farklı sayılarda termal çevrimle yaşlandırılmış numunelerin ve normal numunenin dinamik mekanik termal analiz sonuçlarından kayıp modül eğrilerinin karşılaştırılması göstermektedir.



Şekil 4.36. Farklı sayılardaki termal çevrimlerle yaşlandırılan numunelerin ve normal numunenin dinamik mekanik termal analiz sonuçlarından tanδ eğrilerinin karşılaştırılması

Normal numunenin tanδ eğrisi yaklaşık 0.5 değerinde başlıyor ve 160 ºC seviyesine kadar sabit ilerlemiştir. Termal yaşlandırılmış numunelerin tanδ değerleri termal çevrim sayısı arttırıldıkça normal numuneye kıyasla giderek düşmüştür. 1000 adet termal çevrim sonrası numunenin tanδ eğrisi yaklaşık 0.2 değerinde başlamıştır ve 175 ºC seviyesine kadar sabit ilerlemiştir. Normal numunenin eğrisi 160 ºC'den sonra hızlı artış göstermiştir ve 212.44 ºC'de bir tepe oluşturmuştur. Bu sıcaklık değeri tanδ eğrisine göre camsı geçiş sıcaklığı değeridir. 1000 adet termal çevrime tabi tutulan numunenin tanδ eğrisi 175 ºC'den sonra hızla artış göstermiştir ve 190.87 ºC'de ufak bir tepe yapmıştır. Ancak sıcaklık artışının devam etmesiyle bu

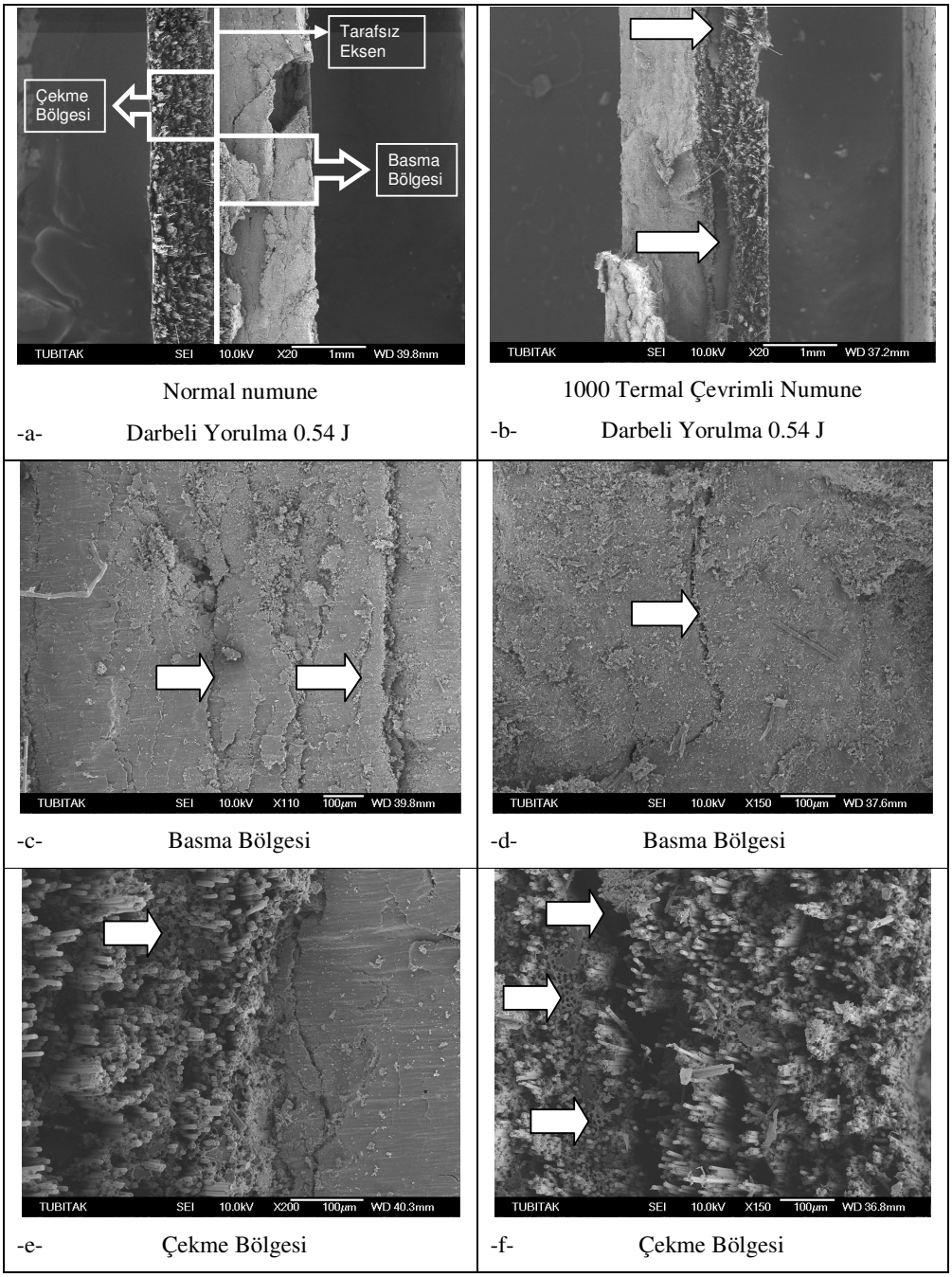
tepe aşılmıştır tanδ değeri yine hızlı bir artış göstererek 208.51 ºC'de bir tepe daha yapmıştır. Bu sıcaklık değeri termal numune için tanδ eğrisine göre camsı geçiş sıcaklığı değeridir.

4.6.3. Termal şok ile yaşlandırılmış PEI matrisli kompozit malzemenin kırılma morfolojisinin incelenmesi

Bundan sonraki aşamada hem termal yaşlandırma hem de darbe etkilerini araştırmak üzere malzemelerin taramalı elektron mikroskobu ile mikro yapı fotoğrafları çekilmiştir. Fotoğrafları çekilen yaşlandırılmış ve normal numunelerin darbe ve termal etki sonucu kırılma kesitleri ve deformasyon durumları mikroskobik olarak incelenmiştir.

Şekil 4.37 taramalı elektron mikroskobu yardımıyla çekilen fotoğrafları göstermektedir. Normal numunelerle termal etkiye tabi tutulmuş numunelerin mikro yapı fotoğrafları karşılaştırılarak gösterilmiştir.

Şekil 4.37'in birinci sütunu normal numunenin 0.54 J ile yapılan darbe-yorulma sonucu kırılan yüzeyinin kesit fotoğraflarını mikro fotoğraflarını, ikinci sütun ise 1000 termal çevrime maruz kalan numunenin 0.54 J ile darbe-yorulma sonucu kırılan yüzeyinin kesit fotoğraflarını göstermektedir. Şekil 4.37-a'ya bakıldığında normal numunenin darbe-yorulma sonucu basma bölgesi (sağ taraf) çekme bölgesinden (sol taraf) daha büyük alana sahip olmuştur. Çekme bölgesi ile basma bölgesi arasında kalan şeride tarafsız eksen denilmektedir.



Normal numune

-a- Darbeli Yorulma 0.54 J

1000 Termal Çevrimli Numune

-b- Darbeli Yorulma 0.54 J

-c- Basma Bölgesi

-d- Basma Bölgesi

-e- Çekme Bölgesi

-f- Çekme Bölgesi

Şekil 4.37. Normal ve 1000 termal çevrime maruz kalmış numunenin 0.54 J darbe enerjisiyle darbe-yorulma sonucu kırılan kesitlerinin taramalı elektron mikroskobu yardımıyla çekilen fotoğrafları

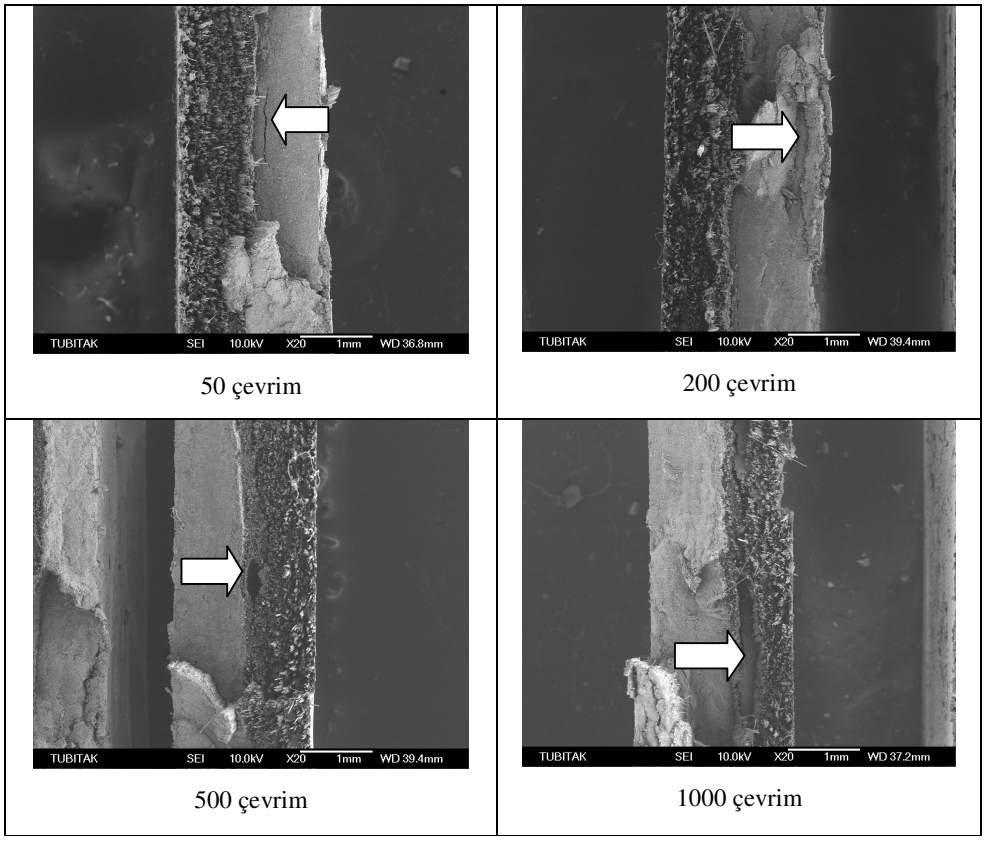
Normal numunelerin tek darbelik kırılma kesitleri incelendiğinde tarafsız eksenin çekme ve basma bölgelerini yaklaşık eşit miktarda böldüğünü görmekteyiz. Ancak darbeli yorulma sonucu görüyoruz ki tarafsız eksen biraz daha çekme bölgesine doğru kaymış olmaktadır. Ayrıca normal numunenin tek darbelik kırılma sonucu

kesiti darbeli yorulma sonucu kırılan kesiti ile karşılaştırıldığında daha az tabaka ayrılmalarına rastlanmaktadır.

Şekil 4.37-b'de 1000 termal çevrime maruz kalmış numunenin darbe-yorulma sonucu kırılan kesitinin fotoğrafı gösterilmiştir. Darbeli yorulma sonucu kırılan normal numunenin kesiti ile karşılaştırıldığında çekme bölgesinin daha da küçüldüğü fark edilmektedir. Termal çevrimler süresince artan kalıntı gerilmeler ve tabakalar arası ayrılmaların etkisi büyüktür. Darbeli yorulma sonucu normal ve termal yaşlandırılmış numunelerin kırılan kesitlerinin basma bölgeleri Şekil 4.37-c ve Şekil 4.37-d'de gösterilmiştir. Şekiller incelendiğinde normal numunenin termal yaşlandırılmış numuneye göre daha fazla darbe sonrası kırıldığı görülmektedir. Bu sonuç normal numunenin basma bölgesinin matrisi kırılan fiberler üzerinde daha fazla sıvanmış olduğu görülerek çıkarılmıştır. Termal yaşlandırılmış numunenin kırılan kesitinin basma bölgesindeki matris kırılan fiberler üzerinde fazla sıvanmadan malzeme hasara uğramıştır. Normal numunenin darbe yorulma sonucu kırılan kesitinin basma bölgesinde kılcal seviyede tabaka ayrımları vardır ancak termal yaşlandırılmış numunenin darbe yorulma sonucu kırılan kesitinin basma bölgesinde daha büyük boyutlarda tabaka ayrımları görülmektedir. Şekil 4.37-e ve şekil 4.37-f' de normal numune ile termal yaşlandırılmış numunenin darbe yorulma sonucu kırılan kesitlerinin çekme bölgelerinin mikro fotoğrafları gösterilmiştir. Normal numunenin darbe yorulma sonucu kırılan kesitinin çekme bölgesi incelendiğinde ve termal numunenin darbe yorulma sonucu kırılan kesitinin çekme bölgesi ile karşılaştırıldığında daha az sayıda fiber soyulması yani daha az fiber boşluğu görülmektedir.

Termal yaşlandırılmış numunenin darbe yorulma sonucu kırılan kesitinin çekme bölgesinde fiberler termal yaşlandırma etkisi sonucu iç gerilme nedeniyle demet demet soyulma ve kırılma göstermişlerdir. Termal yaşlandırılmış numunenin basma bölgesinde olduğu gibi çekme bölgesinde de daha büyük boyutta tabaka ayrılması görülmektedir.

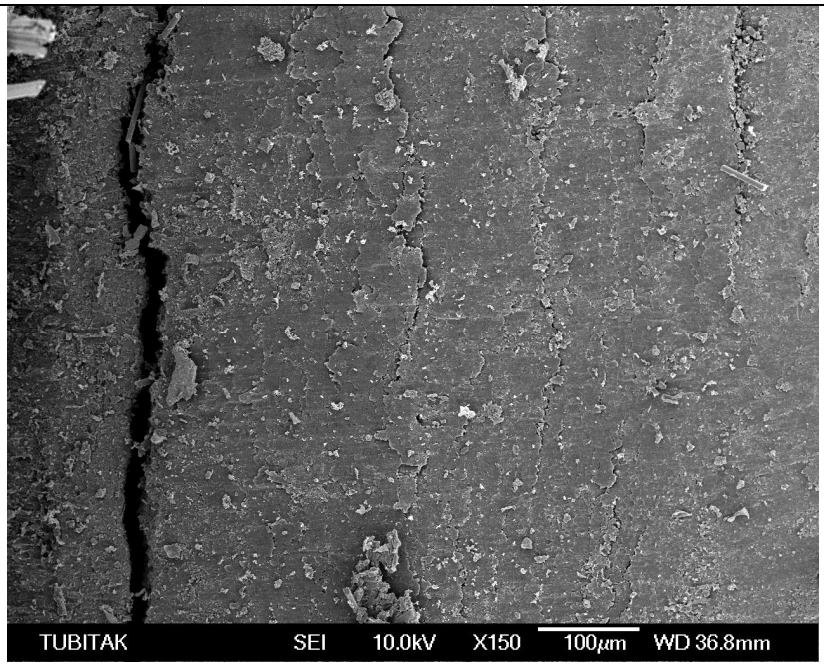
Şekil 4.38'de farklı sayılarla termal çevrime maruz kalıp darbe-yorulma deneyine tabi tutulan malzemelerin kırılan kesitlerinin mikro fotoğrafları gösterilmiştir. Bu gösterim farklı termal çevrim sayılarının darbe-yorulma esnasında deformasyona uğrayan kesitlerde oluşturdukları değişimleri karşılaştırmak için düşünülmüştür.



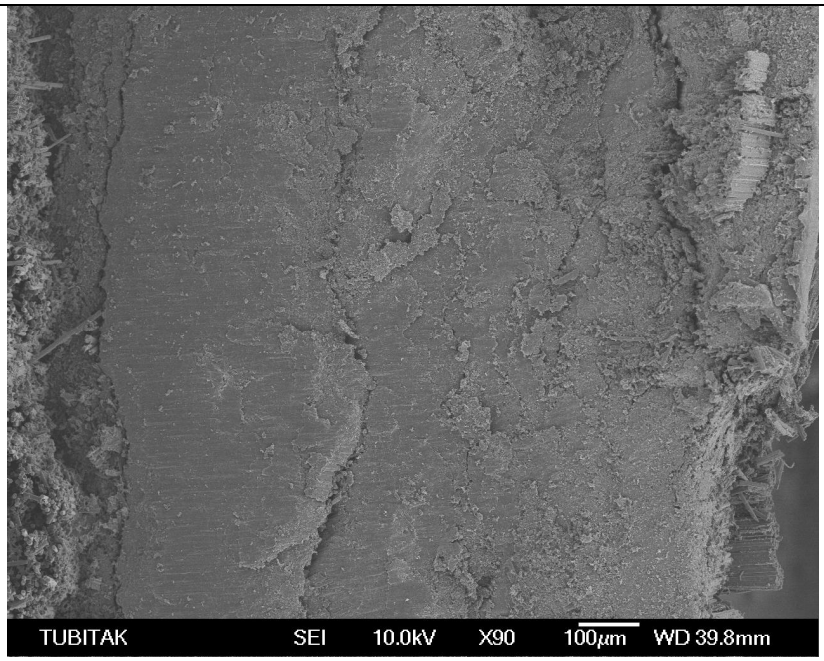
Şekil 4.38. Farklı sayılarla termal çevrime maruz kalıp darbe-yorulma deneyine tabi tutulan malzemelerin kırılan kesitlerinin genel görünümlü mikro fotoğrafları.

Yukarıdaki fotoğraflar incelendiğinde termal çevrim sayısının artmasıyla orantılı olarak, kompozit malzemeyi oluşturan bileşenlerin genleşme katsayıları arasındaki farklılıktan dolayı iç gerilmenin artmasıyla kırılan kesitlerdeki tabaka ayrılması boyutunun arttığı görülmüştür ve bunlar oklar yardımıyla gösterilmiştir.

Şekil 4.39 farklı sayılarla termal çevrime maruz kalıp darbe-yorulma deneyine tabi tutulan malzemelerin kırılan kesitlerinin basma bölgelerinin mikro fotoğraflarını göstermektedir. Çevrim sayısının artmasıyla birlikte termal yaşlandırma etkisi dolayısıyla malzemenin darbe-yorulma sonucu hasara uğraması için gerekli darbe tekrar sayısı azaldığı gösterilmişti.

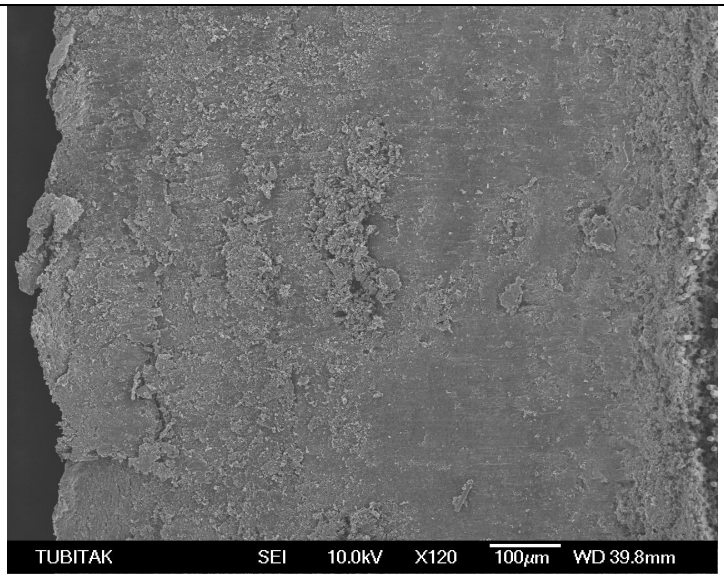


50 çevrim

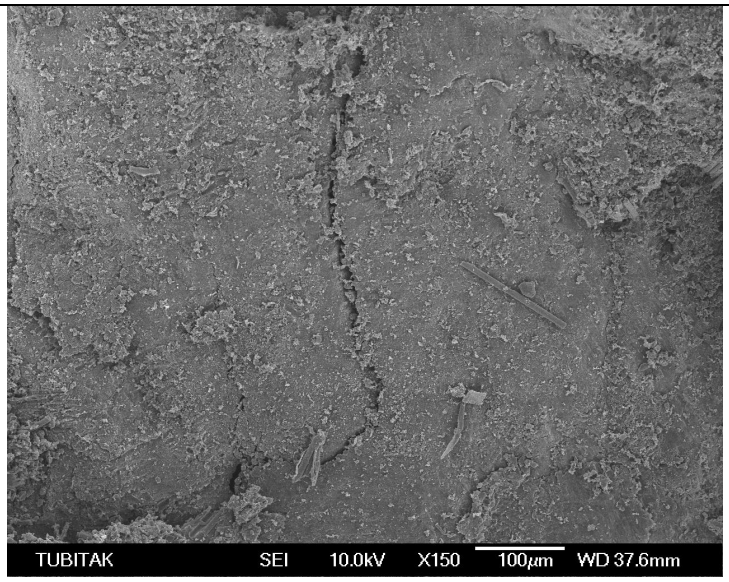


200 çevrim

Şekil 4.39. Farklı sayılarla termal çevrime maruz kalıp darbe-yorulma deneyine tabi tutulan malzemelerin kırılan kesitlerinin basma bölgelerinin mikro fotoğrafları.



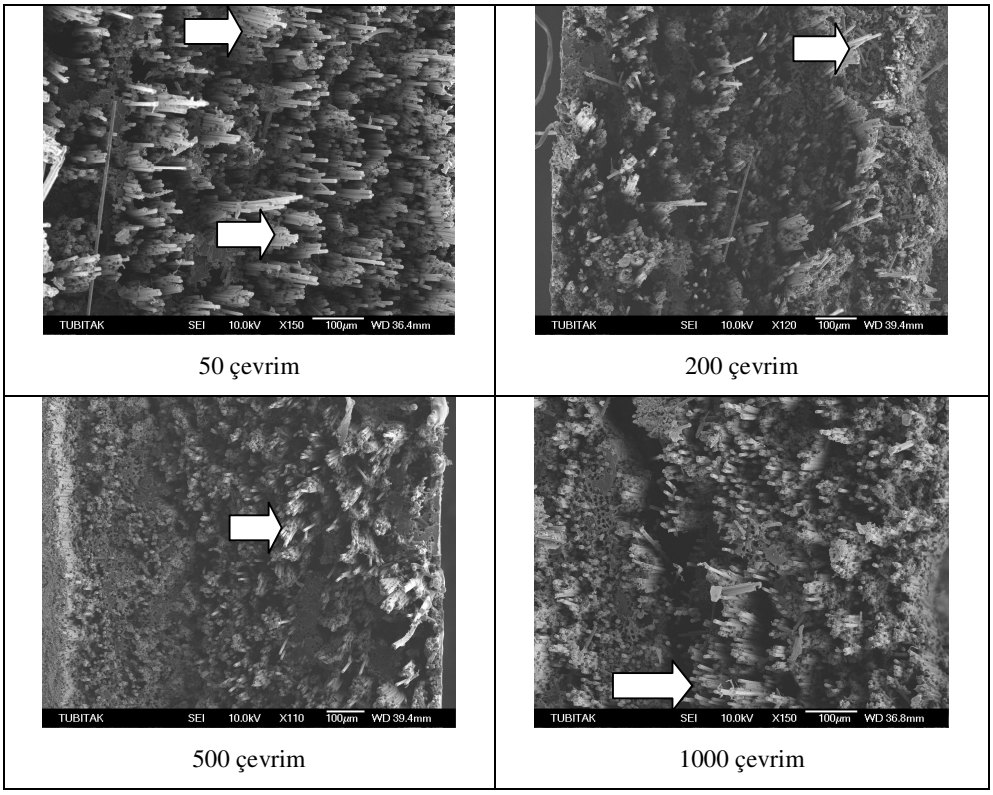
500 çevrim



1000 çevrim

Şekil 4.39.(Devamı) Farklı sayılarla termal çevrime maruz kalıp darbe-yorulma deneyine tabi tutulan malzemelerin kırılan kesitlerinin basma bölgelerinin mikro fotoğrafları.

Fotoğraflar incelendiğinde bu termal çevrim sayılarının artmasıyla birlikte darbe tekrar sayılarının azalmasına bağlı olarak kırılan kesitlerin basma bölgelerindeki matris sıvanma oranının azaldığı görülmektedir. Bu gözlem de bize malzemelerin artan çevrim sayılarıyla birlikte malzemelerin daha az darbe tekrar sayısı sonrası kırıldıklarını göstermektedir. 1000 termal çevrime doğru daha pürüzlü yüzeyler görülmektedir ve bunlar şekilde oklarla gösterilmiştir.

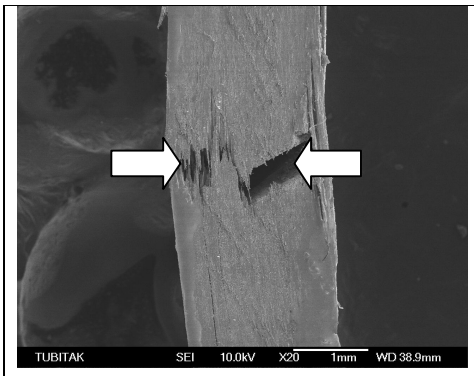


Şekil 4.40. Farklı sayılarla termal çevrime maruz kalıp darbe-yorulma deneyine tabi tutulan malzemelerin kırılan kesitlerinin çekme bölgelerinin mikro fotoğrafları.

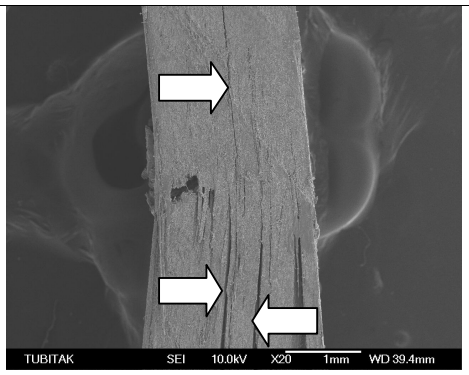
Farklı sayılarla termal çevrime maruz kalıp darbe-yorulma deneyine tabi tutulan malzemelerin kırılan kesitlerinin çekme bölgelerinin mikro fotoğrafları da Şekil 4.40'da gösterilmiştir. Artan çevrim sayısıyla birlikte soyularak kopan fiberlerin demet halinden tekli halde kırılma eğilimleri gözlemlenmiştir. Yani termal yaşlandırma etkisi arttırıldığında fiber ve matris genleşme katsayıları farklı olduğundan meydana gelen iç gerilmeler her bir fiberi ayrı ayrı soyulmaya zorlamıştır. Her fiber gerilme sonucu matrise bağlı olduğu ara yüzeyden kendini sıyırıp hasara uğramıştır. Tabi bu geçiş birden olmamıştır. Düşük sayıdaki termal çevrimle yapılan yaşlandırmanın etkisiyle darbe yorulma sonucu kırılan fiberlerin demet demet oldukları oklarla gösterilmiştir. Çevrim sayısı arttıkça bu demetteki fiber sayısının azaldığı ve git gide tek fiberli soyulma eğilimlerinin varlığı gözlemlenmektedir ve bunlar da oklar ile şekilde gösterilmiştir.

4.6.4. Deneyler sonrası kırılan numunelerin yan kenarlarının görüntülenmesi ve incelenmesi

Yüksek enerji seviyeli tek darbeye maruz kalarak kırılan normal bir numunenin kırılan kesitleri bir önceki kısımda incelenmiştir. Bu kısımda ise hem yüksek enerjili tek darbe sonucu kırılan numunenin hem de 1000 çevrimlik termal yaşlandırma sonrası 0.69 J değerindeki darbe enerjisi ile darbe-yorulma deneyi sonucunda kırılan numunenin yan kenarının fotoğrafları çekilmiştir. Bu fotoğraflar yardımıyla numunelerin darbe sonucu tabakalar arasındaki hasar oluşumları incelenmiştir (Şekil 4.41). Şekil 4.41-a incelendiğinde yüksek enerji seviyeli (1.44 J) tek darbeyle numunenin hızlı ve kötü bir şekilde hasara uğradığı görülmüştür. Şekil 4.41-b incelendiğinde ise 1000 çevrimlik termal yaşlandırma sonrası 0.69 J değerindeki darbe enerjisi ile darbe-yorulma deneyi esnasında numunenin yavaş ve düzenli bir şekilde hasara uğradığı görülmüştür.



-a- Normal numunenin 1.44 J enerjili tek darbeye maruz kalması sonucu yandan genel görüntüsü

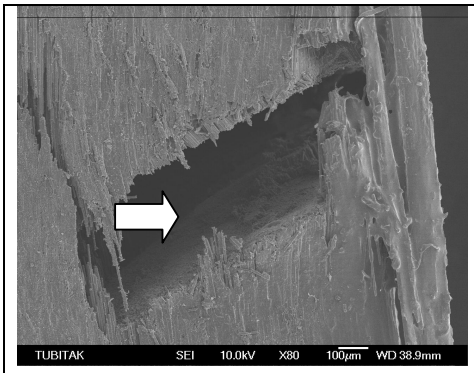


-b- 1000 çevrimlik termal yaşlandırma sonrası 0.69 J darbe enerjisiyle darbe-yorulma sonrası kırılan numunenin yandan genel görüntüsü

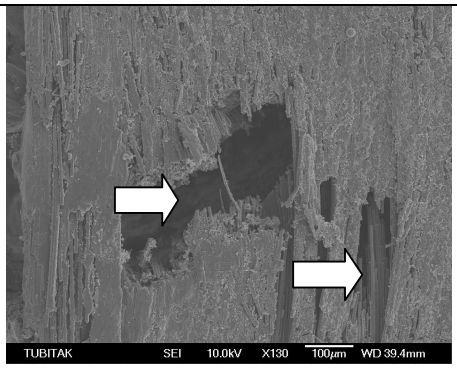
Şekil 4.41. Deneyler sonrası kırılan numunelerin yan profilden genel görünümleri

Şekil 4.41-a incelendiğinde numunede neredeyse hiç tabakalar arası ayrılma görülmemektedir. Şekil 4.41-b'ye bakıldığında numunede çok sayıda tabakalar arası ayrılma görülmektedir ve bunlar oklarla şekil üzerinde gösterilmiştir. En üstteki ok tabaka ayrılmasıyla tarafsız eksenin çakıştığını göstermektedir. Tabakalar arası

ayrılmaların nedeni olarak termal yaşlandırma sonucu tabakalar arası bağın normal numuneye göre zayıflamış olması gösterilebilir.



-a- Normal numunenin 1.44 J enerjili tek darbeye maruz kalması sonucu yandan basma bölgesi görüntüsü



-b- 1000 çevrimlik termal yaşlandırma sonrası 0.69 J darbe enerjisiyle darbe-yorulma sonrası yandan basma bölgesi görüntüsü

Şekil 4.42. Deneyler sonrası kırılan numunelerin yan profillerinin ayrıntılı görünümleri

Şekil 4.42'de bu kırılan numunelerin yan profillerinin ayrıntılı görünümleri gösterilmiştir. Özellikle basma bölgelerinde deformasyon büyütülmüştür.

BÖLÜM 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçların Tartışılması

1. İlk çalışmada Sürekli Karbon Fiber Takviyeli Polieterimid (PEI) kompozit malzemelerin enstrumente edilmiş Ceast sarkaç tipli (Resil 25) test cihazı yardımıyla 0.54–0.94 J arasında değişen düşük enerjili darbe-yorulma davranışları incelenmiştir. Kompozit malzemelerin performanslarının uygulanan darbe enerjisine ve darbe tekrar sayısına bağlı olduğu tespit edilmiştir.

Darbe enerjisi-darbe tekrar sayısı grafiği çizilerek sürekli karbon fiber takviyeli PEI kompozit malzemelerin yorulma ömrü belirlenmiştir. Uygulanan darbe enerjisinin artmasıyla numunenin darbe-yorulma ömrünün azaldığı görülmüştür.

F_{maks} değerlerinin artan darbe tekrar sayısıyla giderek azaldığı ve artan enerji seviyesiyle her bir deney için ilk vuruşlarda elde edilen F_{maks} değerlerinin arttığı F_{maks}-darbe sayısı grafiklerinden tespit edilmiştir.

E_{maks} değerlerinin artan darbe tekrar sayısıyla giderek azaldığı görülmüştür. Artan enerji seviyesiyle her bir deney için ilk vuruşlarda elde edilen E_{maks} değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir.

Tekrarlı yük sayısındaki artışla birlikte numunelerin F_{maks} değerlerinin azalması nedeniyle $E.F_{maks}$ değerlerinde düşüş meydana gelmiştir. $E_{maks.}$-tekrar sayısı grafiklerindeki maksimum E_{maks} değerlerine göre $E.F_{maks}$– tekrar sayısı grafiklerindeki maksimum $E.F_{maks}$ değerleri yaklaşık olarak yarıya düştüğü gözlemlenmiştir.

Her bir darbe enerjisi için X.e.v.–tekrar darbe sayısı grafikleri çizilmiş ve artan darbe enerjisi ve tekrarlı darbe sayısının azalmasıyla X.e.v. değerlerinin eğrisinin eğiminin arttığı tespit edilmiştir.

Fraktografik incelemeler ile şu sonuçlar elde edilmiştir. Yüksek enerjili tek darbe ile kırılan numune kesiti incelendiğinde çekme bölgesi genişliğinin ve basma bölgesi genişliğine oranı yaklaşık 1.4 çıkmıştır. Darbe enerjisinin düşmesiyle ve yorulma sonucu hasar için gerekli darbe tekrar sayısının artmasıyla tarafsız eksen çekme bölgesine doğru kayma yapmıştır. 0.54 J değerindeki tekrarlı darbelerle yapılan darbe-yorulma deneyi sonucunda kırılan yüzey incelendiğinde çekme bölgesinin genişliğinin basma bölgesine oranı 0.6'ya düşmüştür. Darbeli yorulmada darbe enerji değeri düştükçe darbe tekrar sayısı artmaktadır ve basma bölgesindeki matris sıvanma miktarı artmıştır.

Tek darbede kırılan kesitinin çekme bölgesi incelendiğinde fiberlerin kırık boylarının kısa olduğu gözlemlenmiştir. Matristen kırılma esnasında yerinden çıkan fiber uzunluğunun az olması gevrek bir kırılmanın işaretidir. Ayrıca kesit içindeki kırılan fiber boylarının hemen hepsi yaklaşık aynı boyda olduğu görülmüştür. Buna rağmen 0.94 J ve 0.54 J darbe enerjileri ile gerçekleştirilen darbe-yorulma deneyi sonucu kırılan kesit incelendiğinde yorulma sonucu soyulan fiber boylarının daha uzun olduğu görülmektedir. Yine bu kesite göre darbe-yorulma zorlanması boyunca kırılan kesitteki fiber boylarının dağınık bir görünümü mevcuttur. Yani kimileri uzun kimileri kısa kalmıştır.

2. Havacılık endüstrisinde uçak gövde malzemesi olarak kullanılan PEI matrisli sürekli karbon fiber takviyeli kompozit malzemesi uçuşlar esnasında havadaki atmosfer şartlarına (nem, sıcaklık, ültraviyole ışınlar, radyasyon) maruz kalmaktadırlar. Bu hava şartlarına ek olarak bir de bu yapı malzemesi servis ve bakım durumlarında düşük enerjili de olsa uzun süreli tekrarlarında etkili olabilecek darbelere maruz kalmaktadırlar.

Bu iki olayın etkisi hem ayrı ayrı hem de birlikte incelenmiştir. Uçuş atmosfer şartları bir program yardımıyla klimatik yaşlandırma kabinine yazdırılmıştır. Üretici

firmadan getirtilen karbon fiber takviyeli PEI matrisli kompozit malzeme her biri 108 dakika süren toplam 532 klimatik çevrime maruz bırakılmıştır. Klimatik ortamda yaşlandırma işlemine maruz bırakılan bu numunelerin darbe-yorulma davranışları enstrümente edilmiş Ceast Sarkaç Tipli (Resil 25) test cihazı yardımıyla 0.54–0.94 J arasında değişen düşük hızlı darbe enerjilerindeki tekrarlı darbelerle incelenmiştir. Ayrıca klimatik etki sonucu malzemedeki termomekanik özelliklerin değişimleri de TA Instruments firmasına ait dinamik mekanik termal analiz (DMTA Q800 tipi) cihazı ile incelenmiştir.

F_{maks} değerlerinin artan darbe tekrar sayısıyla giderek azaldığı ve artan enerji seviyesiyle her bir deney için ilk vuruşlarda elde edilen F_{maks} değerlerinin arttığı $F_{maks.}$-darbe sayısı grafiklerinden tespit edilmiştir.

E_{maks} değerlerinin artan darbe tekrar sayısıyla giderek azaldığı görülmüştür. Artan enerji seviyesiyle her bir deney için ilk vuruşlarda elde edilen E_{maks} değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir.

Tekrarlı yük sayısındaki artışla birlikte numunelerin F_{maks} değerlerinin azalması nedeniyle $E.F_{maks}$ değerlerinde düşüş meydana gelmiştir. E_{maks}-tekrar sayısı grafiklerindeki maksimum E_{maks} değerlerine göre $E.F_{maks}$–tekrar sayısı grafiklerindeki maksimum $E.F_{maks}$ değerleri yaklaşık olarak yarıya düştüğü gözlemlenmiştir.

Her bir darbe enerjisi için X.e.v.–tekrar darbe sayısı grafikleri çizilmiş ve artan darbe enerjisi ve tekrarlı darbe sayısının azalmasıyla X.e.v. değerlerinin eğrisinin eğiminin arttığı tespit edilmiştir.

Klimatik yaşlandırma sonucu polimer kompozit malzemenin ömrünün normal numunenin ömrüne kıyasla düşük enerjili tekrarlı darbelerle yapılan deneylerde azaldığı buna rağmen yüksek enerjili tekrarlı darbelerle yapılan yorulma deneylerinde ise bu ömrün arttığı sonucuna varılmıştır.

Klimatik yaşlandırma sonucu çevrim sayısının düşük olması sebebiyle malzeme içine sızan sıvının polimer yapı içine girememesiyle birlikte burada şişme etkisiyle kalıntı gerilmeler meydana getirmiştir. Bu da malzemenin depolama modülünün artışına sebep olmuştur. Bunun yanında malzemenin kayıp modül değerleri de normal numuneye göre düşüş göstermiştir. Klimatik yaşlandırma etkisi sonucu tanδ değerleri de bir miktar düşüş göstermiştir. Tanδ eğrisine göre alınan camsı geçiş sıcaklıklarına göre klimatik etki sonucu numunenin camsı geçiş sıcaklığı normal numuneye kıyasla 2ºC düşüş göstermiştir.

3. Bir diğer uygulamada ise numuneye 0.77 J enerjili "25" adet darbe ardından 0.61 J enerjili "100" adet darbe tatbik ettirilmiştir. Son olarak da 0.54 J enerjili "2285" adet darbe numune kırılıncaya kadar tatbik ettirilmiştir. Uygulamanın devamı olarak bu iki farklı darbe enerjisi yer değiştirilerek darbeler başka bir numuneye uygulanmıştır. Yine son olarak bu numuneye de kırılıncaya kadar 0.54 J enerjili "323" adet darbe uygulanmıştır.

TEM cihazı yardımıyla çekilen fotoğraflar yardımıyla farklı enerji seviyelerindeki darbelerin farklı sıralarla numuneye uygulanması sonucu numunede oluşan deformasyon farklılıkları incelenmiştir.

Belirli bir aşamaya kadar çekme ve basma bölgesi olarak şekillenen bölgeler diğer bir darbe bölgesinde yeni çekme-basma bölgeleri halinde şekillenmektedir. Örneğin ilk grup darbe sonrası kırılmayan çekme bölgesi yeni darbelerde ikiye bölünerek ve yeni bir tarafsız bölge etrafında yeni çekme ve basma bölgeleri oluşturmuş ve karmaşık yapıda bir kesit ortaya çıkmıştır.

4. Polimer kompozit malzemeler endüstriyel uygulamalarda yaygın bir şekilde kullanılmaktadırlar. Havacılık endüstrisinde uçak gövde malzemesi olarak kullanılan sürekli karbon fiber takviyeli polieterimid kompozit malzemeler vardır. Uçağın uçuşu sırasında farklı yüksekliklerde gövde sıcaklığı yaklaşık +100 ºC'ye kadar yükselmektedir. Bununla birlikte havanın sıcaklığı da aniden 0ºC civarına düşebilmektedir. Bu ani hava sıcaklık değişimleri uçak gövde malzemesi polimer

kompozitlerin sıcaklıklarını da etkilemektedir. Kompozit malzemedeki bu ani sıcaklık değişimi ise malzemenin darbe davranışlarında değişimlere neden olacaktır.

Malzeme 0ºC - 100 ºC arasında termal şoka tabi tutuldu. Malzeme önce 0ºC'deki buzlu su içine daldırılıp bir dakika bekletildikten sonra aniden 100 ºC'deki kaynar su içine daldırılıp bir dakikada burada bekletildikten sonra bir çevrim tamamlanmış oldu. Malzemeler 10'arlı gruplar halinde 50 – 200 – 500 – 1000 termal şok çevrimlerine tabi tutuldu.

Bu yaşlandırılmış malzemelerin darbe davranışlarındaki değişimler darbe test cihazında darbe yorulma testlerine tabi tutularak araştırıldı. Termal şoka tabi tutulan numuneler hem normal numunelerle hem de farklı termal çevrim sayılarına maruz kalan numunelerle karşılaştırılarak incelenmiştir. Termal şoka tabi tutulan numuneler normal numunelerdeki parametreler ile aynı darbe yorulma deneylerine tabi tutuldu.

Termal yaşlandırılmış numunelerin F_{maks} grafikleri normal numuneninkilere göre daha eğimlidir. Eğimin fazla olması artan darbe tekrar sayısıyla her darbede 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.

Artan tekrar yük sayısıyla birlikte $E.F_{maks}$ değerleri giderek azalmıştır. Normal numunenin $E.F_{maks}$ eğrisinin eğimine kıyasla termal yaşlandırılmış numunelerin $E.F_{maks}$ eğrilerinin eğimi termal çevrim sayısı arttırıldıkça artmıştır. Tekrarlı yük sayısındaki artışla birlikte numunelerin F_{maks} değerlerinin azalması nedeniyle $E.F_{maks}$ değerlerinde düşüş meydana gelmiştir.

Termal yaşlandırılmış numunelerin E_{maks} grafikleri normal numunelerin E_{maks} grafiklerinden daha eğimlidir. Termal çevrim sayıları artırıldıkça grafiğin eğiminin daha da arttığı gözlemlenmiştir.

Normal numunelere karşın termal yaşlandırılmış numunelerin daha hızlı hasara uğramıştır. Deformasyon miktarlarındaki değişim (X.e.v.) grafiklerine göre termal

çevrim sayısı arttırıldıkça deformasyon miktarı hızlanmaktadır sonuç olarak eğim artmaktadır. Normal numunenin son deformasyon miktarı 9.5 mm civarındayken termal numunelerde bu miktar yaşlandırma etkisiyle yaklaşık 10.5–11.5 mm. seviyelerine çıkmıştır.

Ayrıca termal yaşlandırılmış numunelerin darbe-yorulma deneyleri yapılırken farklı darbe enerji seviyelerinin etkileri de incelenmiştir. Darbe enerji değeri arttıkça ilk vuruşlarda ulaşılan E_{maks}, F_{maks}, $E.F_{maks}$ değerleri artmıştır. Aynı zamanda son darbelerde ulaşılan E_{maks}, F_{maks}, $E.F_{maks}$ değerleri de artmıştır. Buna karşın deformasyon miktarı düşük enerjili darbelerle yapılan yorulma deneylerinde daha yüksek çıkmıştır.

Dinamik mekanik termal analiz sonuçlarına göre depolama modülü, kayıp modül ve tanδ değerleri artan termal çevrim sayısıyla giderek düşmüştür. Depolama modülüne göre normal numunenin camsı geçiş sıcaklığı (Tg) yaklaşık 195.13 ºC çıkmıştır. Yine depolama modülüne göre 1000 adet termal çevrime tabi tutulan numunenin camsı geçiş sıcaklığı da normal numuneninkine kıyasla 182.37 ºC değerine düşmüştür.

Kayıp modül eğrisine gore normal numunenin camsı geçiş sıcaklığı 199.65ºC değerindeyken 1000 adet termal çevrime maruz kalan numunenin camsı geçiş sıcaklığı 186.62 ºC değerine düşmüştür.

Sonuç olarak termal çevrim sayısı arttırıldıkça hem depolama modülü, kayıp modülü ve tanδ değerlerinin hem de camsı geçiş sıcaklığının düştüğü görülmektedir. Bu nedenle malzemenin termal yaşlandırma sonucu mekanik ve termal özelliklerini kaybettiği sonucuna varılmıştır.

Fraktografik incelemelerle göre darbeli yorulma sonucu kırılan normal numunenin kesiti ile termal numunenin kesiti karşılaştırıldığında çekme bölgesinin daha da küçüldüğü fark edilmektedir. Termal çevrimler süresince artan kalıntı gerilmeler ve tabakalar arası ayrılmaların etkisi büyüktür. Kırılan kesitler incelendiğinde normal numunenin termal yaşlandırılmış numuneye göre daha fazla darbe sonrası kırıldığı anlaşılmıştır.

Termal yaşlandırılmış numunenin darbe yorulma sonucu kırılan kesitinin çekme bölgesinde fiberler termal yaşlandırma etkisi sonucu iç gerilme nedeniyle demet demet soyulma ve kırılma göstermişlerdir. Termal yaşlandırılmış numunenin basma bölgesinde olduğu gibi çekme bölgesinde de daha büyük boyutta tabaka ayrılması görülmüştür.

Termal çevrim sayısının artmasıyla orantılı olarak, kompozit malzemeyi oluşturan bileşenlerin genleşme katsayıları arasındaki farklılıktan dolayı iç gerilmenin artmasıyla kırılan kesitlerdeki tabaka ayrılması boyutunun arttığı görülmüştür.

Termal çevrim sayılarının artmasıyla birlikte darbe tekrar sayılarının azalmasına bağlı olarak kırılan kesitlerin basma bölgelerindeki matris sıvanma oranının azaldığı sonucuna varılmıştır. 1000 termal çevrime doğru daha pürüzlü yüzeyler görülmektedir.

Artan çevrim sayısıyla birlikte soyularak kopan fiberlerin demet halinden tekli halde kırılma eğilimleri gözlemlenmiştir. Yani termal yaşlandırma etkisi arttırıldığında fiber ve matris genleşme katsayıları farklı olduğundan meydana gelen iç gerilmeler her bir fiberi ayrı ayrı soyulmaya zorlamıştır. Her fiber gerilme sonucu matrise bağlı olduğu ara yüzeyden kendini sıyırıp hasara uğramıştır.

5.2. Öneriler

Bu çalışmada atmosferik şartların polieterimid (PEI) matrisli sürekli karbon fiber takviyeli kompozit malzeme üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Araştırma özellikle malzemenin darbe davranışı, dinamik, mekanik, termal özellikleri ve fraktografik özellikleri üzerinde yoğunlaştırılmıştır.

Gerçekleştirilen çalışmalardan klimatik çevrim sayısının az olduğu anlaşılmıştır ve bu nedenle çevrim sayısı artırılarak başka bir çalışma daha yapılabilir. Malzeme cinsi

değiştirilerek uçak yapısında kullanılan diğer malzemeler için bu çalışmalar tekrarlanabilir.

Atmosferik şartların termal etkisinin polimer kompozitler için büyük bir sorun olduğu anlaşılmıştır. Bu nedenle özellikle uçak gövde malzemesi olarak kullanılan polimer kompozitlerin termal etkiler altındaki davranışları test edilmelidir.

Uçak gövde malzemesi olarak kullanılan malzemenin düşük enerjili tekrarlı darbeler esnasında bazen de farklı yüklemelere örneğin basma yüklemesine maruz kaldığı bir gerçektir ve bu iki yükleme türünün beraber etkidiği durum farklı kompozit malzeme türleri için incelenebilir.

KAYNAKLAR

Abedian, A., Szyszkowski, W., "Influence of the free surface on the thermal stresses in unidirectional composites", ***Composites Part A***, 28A, 573-579, (1997).

ASTM Standard D 4065-01. Standard practice for plastics: dynamic mechanical properties: determination and report of procedures. West Conshohocken, PA, USA: ***American Society for Testing and Materials***, (2004).

ASTM Standard D 4812-06. Standard test method for Un notched Cantilever Beam Impact Resistance of Plastics. West Conshohocken, PA, USA: ***American Society for Testing and Materials***, (2004).

Ateş, B. H., "Çevresel Etkilerin PPS (Polifenilensülfid) Kompozitlerin mekanik özelliklerine etkileri", Yüksek Lisans Tezi, **Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Kocaeli, 17-51, (2002).

Azouaoui, K., Rechak, S., Azari, Z., Benmedakhene, S., Laksimi, A., Pluvinage, G., "Modelling of damage and failure of glass/epoxy composite plates subject to impact fatigue", **International Journal of Fatigue 23**, 877–885, (2001).

Ch. Ray, B., "Effect of Thermal Shock on Interlaminar Strength of Thermally Aged Glass Fiber Reinforced Epoxy Composites", Department of Metallurgical and Materials Engineering, National Institute of Technology, ***Journal of Applied Polymer Science***, (2005).

Chung, K., Seferis, J.C., "Evaluation of thermal degradation on carbon fiber/cyanate ester composites", ***Polymer Degradation and Stability***, (2000).

Dash, P.K., Chatterjee, A.K., "Effects of environment on fracture toughness of woven carbon/epoxy composite", **IE (I) Journal-AS**, Vol 85, (2004).

De Morais, W.A., Monteiro , S.N., D_Almeida, J.R.M., "Effect of the laminate thickness on the composite strength to repeated low energy impacts, **Composite Structures 70** ,223–228, (2005).

Earl, J.S., Shenoi R.A., "Hygrothermal ageing effects on FRP laminate and structural foam materials", ***Composites Part A***, (2004).

Fried, J.R., "Polymer science and technology", (2003).

Go´mez-del Rı´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).

Gürdal, Z., Haftka, R.T., Hajela, P., "Design and optimization of laminated composite materials", (1999).

Haines, P. J., "Thermal methods of analysis; principles, applications and problems", (1995).

Jones, F.R., "Handbook of polymer-fiber composites", **Longman Scientific and** Technical, Polymer science and technology series, ISBN: 0-582-06554-2, England, (1994)

Joseph, P.V., Rabello, S.M., Mattoso, L.H.C., Joseph, K., Thomas S., "Environmental effects on the degradation behaviour of sisal fibre reinforced polypropylene composites", (2002).

Jungkuist, D.A., "Simulation of Enviro-mechanical Durability for Life Prediction of E-Glass/Vinyl Ester Composites using a Bridge Service Environment", ***Blacksburg, Virginia Tech,*** (2000).

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).

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).

M. HUSSAIN and K. NIIHARA, ***Mater. Sci. Engng***. A 272 (1999) .

Mula, S., Bera, T., Ray P. K., and Ray. B. C., "Effects of Hydrothermal Aging on Mechanical Behavior of Sub-zero Weathered GFRP Composites", ***Journal of Reinforced Plastics and Composites (***Accepted 2006).

Pantelakis, Sp., Labeas, G., "Constant and variable amplitude fatigue damage of laminated fibrous composites", ***Applied Composite Materials***, (2001).

Pethrick AR, Hollins EA, McEwani J, Hayward D, Cannon LA.Dielectric, M"echanical and structural and water absorption properties of a thermoplastics modified epoxy resin: poly(ether sulphone) amine cured epoxy resin macromolecules (1996).

Rakow, J. F., Pettinger, A.M., "Failure Analysis of Composite Structures in Aircraft Accidents", **ISASI 2006 Annual Air Safety Seminar**, 1-27, Cancun, Mexico, (2006).

Roy, R., Sarkar, B.K., Bose, N.R., "Impact fatigue of glass fiber-vinylester resin composites", **Composites: Part A 32**, 871-876, (2001).

Saito, H., Kimpara, I., "Evaluation of impact damage mechanism of multi-axial stitched CFRP laminate", (2006).

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).

Scheirs, J., "Compositional and failure analysis of polymers", ***Willey***, ISBN: 0-471-62534-5, (2000).

Selzer, R., Friedrich, K., "Mechanical properties and failure behavior of carbon fibre-reinforced polymer composites under the influence of moisture", ***Composites Part A***, 28A, 595-604, (1996).

Sınmazçelik, T., Arıcı, A., Günay, V., "Impact-fatigue behaviour of unidirectional carbon fibre reinforced polyetheremide (PEI) composites", **J Mater Sci 41:6237–6244**, (2006).

Sınmazçelik, T., Arıcı, A., Günay, V., "Influence of various fluids on the interlaminar shear strength (ILSS) and impact behaviour of carbon/pei composites", **J Mater Sci 41:6237–6244**, (2006).

Tai, N.H., Yip, M.C., Lin, J.L., "Effects of low-energy impact on the fatigue behavior of carbon/epoxy composites", **PII S 0266-3538**, 00075-4, (1997).

Tai, N.H., Yip, M.C., Tseng, C.M., "Influences of thermal cycling and low-energy impact on the fatigue behaviour of carbon/PEEK laminates", **Composites Part B 30**, 849-865, (1999).

www.tencate.com, (2007)

Yılmaz, T., "Polimer Matrisli Kompozitlerin Pim İle Yük Taşıma Özelliklerinin İncelenmesi", Doktora Tezi, **Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Kocaeli, 1-52, (2006).

KİŞİSEL YAYINLAR

1. Onur ÇOBAN, Tamer SINMAZÇELİK, Evren BAYRAMOĞLU, Volkan GÜNAY, "PEI Kompozitlerde Atmosferik Şartların Mekanik, Termal Ve Morfolojik Özelliklere Etkisi", ***13.ULUSLARARASI METALURJİ&MALZEME KONGRESİ, İSTANBUL, Kasım,* 2006.**

2. Onur ÇOBAN, Mustafa Özgür BORA, Tamer SINMAZÇELİK, Volkan GÜNAY, "Fracture Morphology And Deformation Characteristics Of Repeatedly Impacted Thermoplastic Matrix Composites", ***THEPLAC INTERNATIONAL WORKSHOP ON THERMOPLASTIC MATRIX COMPOSITES, OSTUNİ/İTALYA, Haziran, 2007.***

3. Onur ÇOBAN, Mustafa Özgür BORA, Tamer SINMAZÇELİK, İsmail CÜRGÜL, Volkan GÜNAY, "Tekrarlı Darbelere Maruz Kalan Polimer Kompozitin Kırılma Morfolojisinin Elektron Mikroskobu İle İncelenmesi", ***18. ULUSAL ELEKTRON MİKROSKOBU KONGRESİ, ESKİŞEHİR ANADOLU ÜNİVERSİTESİ, ESKİŞEHİR, Ağustos 2007 (sunuma kabul edildi).***

4. Onur ÇOBAN, Mustafa Özgür BORA, Tamer SINMAZÇELİK, İsmail CÜRGÜL, "Termal Çevrimlere Maruz Bırakılmış Polimer Kompozitlerin Düşük Enerjili Tekrarlı Darbeler Altındaki Davranışlarının İncelenmesi", ***8.ULUSLARARASI KIRILMA KONFERANSI, YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ, İSTANBUL, Kasım, 2007 (sunuma kabul edildi).***

5. Mustafa Özgür BORA, Onur ÇOBAN, Tamer SINMAZÇELİK, Volkan GÜNAY, "On The Life Time Prediction Of Repeatedly Impacted Thermoplastic Matrix Composites**",** ***THEPLAC INTERNATIONAL WORKSHOP ON THERMOPLASTIC MATRIX COMPOSITES, OSTUNİ/İTALYA, Haziran, 2007.***

6. Mustafa Özgür BORA, Onur ÇOBAN, Tamer SINMAZÇELİK, İsmail CÜRGÜL, "Farklı Enerjilerde Ardışık Tekrarlı Darbelere Maruz Kalan Polimer Kompozitlerin Darbe Davranışlarının İncelenmesi", ***8.ULUSLARARASI KIRILMA KONFERANSI*, YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ, İSTANBUL, *Kasım, 2007 (sunuma kabul edildi).***

ÖZGEÇMİŞ

İzmir'de doğdu. İlköğrenimini Aliağa Atatürk İlköğretim Okulu'nda orta ve lise öğrenimini Bergama Anadolu Lisesi'nde tamamladı.

2001 yılında girdiği Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nden 2005 yılında mezun oldu.

Aralık 2005 tarihinden itibaren Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaktadır.