

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ \* FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**POLİMER KOMPOZİTLERİN TEKRARLI DARBE  
YÜKLEMELERİ ALTINDAKİ DAVRANIŞI**

**YÜKSEK LİSANS**

**Makina Müh. Mustafa Özgür BORA**

**Anabilim Dalı: Makina Mühendisliği**

**Danışman: Prof. Dr. İsmail CÜRGÜL**

**KOCAELİ, 2007**

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ \* FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**POLİMER KOMPOZİTLERİN TEKRARLI DARBE  
YÜKLEMELERİ ALTINDAKİ DAVRANIŞI**

**YÜKSEK LİSANS**

**Makina Müh. Mustafa Özgür BORA**

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

**Tez Danışmanı**

**Prof.Dr.İsmail CÜRGÜL**

(.....)

**Üye**

**Doç.Dr.Tamer SINMAZÇELİK**

(.....)

**Üye**

**Prof.Dr.Fehim FINDIK**

(.....)

**KOCAELİ, 2007**

## ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR

Günümüzde polimer kompozit malzemelerin kullanım alanları ev aletlerinden inşaat sektörüne, otomotiv sanayinden uzay sanayine kadar çok geniş bir alanı kapsamaktadır. Polimer kompozitlerin bu kadar geniş bir kullanım yelpazesine sahip olmalarının en önemli nedenlerinden birisi yüksek özgül mukavemete (mukavemet/yoğunluk) sahip olmalarıdır. Günümüzde, özellikle havacılıkta böyle malzemelere büyük ihtiyaç duyulmaktadır.

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 gereken önemli bir konudur.

Bu çalışmada polimer kompozitlerin başta havacılık uygulamaları olmak üzere kullanıldıkları şartlara yakın zorlanma koşulları altında düşük enerjili tekrarlı darbelere karşı tepkileri incelenmiş ve darbe-yorulma ömrü belirlenmiştir.

Sahip olduğu bilgi birikimi ve tecrübesiyle çalışmalarımda desteğini eksik etmeyen, meslek hayatıma kazandırdığı iş disiplini ile bana örnek olan değerli hocam Doç.Dr.Tamer SINMAZÇELİK'e teşekkür ederim. Makine Mühendisliği Bölüm Başkanı Prof. İbrahim UZMAN'a Malzeme Laboratuvar imkanlarını kullanmama olanak sağladığı için teşekkür ederim. Arş.Gör.Dr.Müh.Taner YILMAZ, Arş.Gör.Mak.Müh.Onur ÇOBAN. ve başta Doç.Dr.Volkan GÜNAY olmak üzere TÜBİTAK-MAM, Malzeme Enstitüsüne çalışmalarım sırasında vermiş oldukları destek nedeniyle teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca maddi ve manevi her konuda destek ve yardımlarını esirgemeyen, beni cesaretlendiren aileme, yakınlarıma ve Bircan BAYRAM'a teşekkür ederim.

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

Bu çalışmanın ortaya çıkmasında büyük emeği olan, bana kılavuzluk eden ve sürekli cesaretlendiren danışmanım Prof.Dr.İsmail CÜRGÜL'e sonsuz şükran ve teşekkürlerimi sunarım.

## İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER.....	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	iv
TABLolar DİZİNİ.....	viii
SEMBOLLER .....	ix
ÖZET .....	x
İNGİLİZCE ÖZET .....	xi
1. GİRİŞ .....	1
1.1. Kompozit Malzeme Nedir? .....	1
1.2. Tarihçe.....	2
1.3. Kompozit Malzemelerin Genel Özellikleri .....	3
1.4. Polimer Kompozit Üretiminde Kullanılan Malzemeler .....	4
1.4.1. Matris malzemeleri.....	4
1.4.2. Fiberler .....	5
1.4.2.1. Karbon fiberler.....	6
1.5. Fiber Takviyeli Kompozitler .....	7
1.5.1. Tabakalı kompozitler.....	7
1.5.2. Polimer matrisli kompozitler .....	8
1.6. Kompozit Malzemelerin Kullanım Alanları.....	9
1.6.1. Uçak yapılarında polimer kompozit malzeme kullanımı .....	9
1.6.2 Diğer kullanım alanları.....	13
1.7. Tez Konusunun Önemi ve İçeriği .....	14
2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI .....	16
2.1. Polimer Kompozitlerin Hasar Mekanizmaları.....	16
2.1.1. Soyulma (Debonding) .....	17
2.1.2. Tabakalar arası hasar .....	18
2.1.3. Fiber burkulması (Buckling).....	19
2.1.4. Fiberlerin yerinden çıkması (Pull-out) .....	20
2.1.5. Fiber kırılması.....	21
2.1.6. Kompozitlerde çatlak oluşumu .....	21
2.1.7. Kompozitlerde mikro-çatlama .....	21
2.2. Kompozit Malzemelere Uygulanan Yükleme Çeşitleri ve Malzemedeki Oluşturdukları Hasarlar.....	22
2.2.1. Çekme yüklemesi.....	22
2.2.2. Basma yüklemesi .....	23
2.2.3. Eğilme yüklemesi.....	24
2.2.4. Darbe yüklemesi .....	25
2.2.5. Yorulma yüklemesi .....	27
2.3. Tabakalı Kompozit Malzemelerde Yorulma Hasar Mekanizması .....	28
2.4. Kompozit Tabakaların Hasar Karakteristiği ve Darbe Direnci .....	32
2.5. Fiber Takviyeli Kompozitlerde Darbe Yorulması Özellikleri.....	33
3. MALZEME VE YÖNTEM.....	41
3.1. Kullanılan Malzeme .....	41

3.1.1. Malzeme hakkında genel bilgiler.....	41
3.1.2. PEI malzemesinin özellikleri .....	41
3.1.3. Deneyde kullanılan kompozit malzeme hakkında bilgiler .....	42
3.2. Uygulanan Deneysel Yöntem ve Standartları .....	43
3.2.1. Darbe testi.....	43
3.2.1.1. Genel açıklamalar.....	43
3.2.1.2. İzod darbe deneyi (Çentiksiz izod)- ASTM D4812 VE ISO 180 .....	44
4. DENEY SONUÇLARI .....	47
4.1. Sabit Enerjilerle Tekrarlı Darbelere Maruz Kalan Kompozitlerin Darbe Davranışlarının İncelenmesi.....	47
4.2. Farklı Enerji Seviyelerinde Tekrarlı Darbelere Maruz Kalan Numunelerin Darbe Davranışlarının İncelenmesi.....	61
4.2.1. Düşük Enerjili Tekrarlı Darbeleri Takip Eden Yüksek Enerjili Darbeler İle Yapılan Deneyler.....	61
4.2.1.1 [100÷500].0,57 J + n.0,94 J kodlu darbe-yorulma deney sonuçları.....	61
4.2.1.2. [100÷500].0,57 J + n.0,85 J kodlu darbe-yorulma deney sonuçları.....	67
4.2.1.3. [100÷500].0,57 J + n.0,77 J kodlu darbe-yorulma deney sonuçları.....	73
4.2.2. Yüksek Enerjili Tekrarlı Darbeleri Takip Eden Düşük Enerjili Darbeler İle Yapılan Deneyler.....	79
4.2.2.1. [1÷5].0,94 J + n.0,57 J kodlu darbe-yorulma deney sonuçları .....	79
4.3. Karma Darbelere Maruz Kalan Normal Numunelerin Darbe Davranışlarının İncelenmesi.....	85
4.3.1. (250*0,54 J + 10*0,73 J + 2*0,94 J) Karma Darbe Grubu Sonuçları.....	85
4.3.2. (10*0,73 J + 250*0,54 J + 2*0,94 J) Karma Darbe Grubu Sonuçları.....	89
4.3.3. (2*0,94 J + 250*0,54 J + 10*0,73 J) Karma Darbe Grubu Sonuçları.....	94
4.4. Birbirinden Farklı Darbe Enerji Çiftleriyle Yapılan Darbelere Maruz Kalan Numunelerin Darbe Davranışlarının İncelenmesi .....	99
4.4.1. (50*0,69 J + 75*0,61 J + n*0,54 J) ve (75*0,61 J + 50*0,69 J + n*0,54 J) Tekrarlı Darbelere Maruz Kalan Numunelerin Darbe Davranışlarının İncelenmesi .....	99
4.4.2. (25*0,77 J +100*0,61 J + n*0,54 J) ve (100*0,61 J +25*0,77 J + n*0,54 J) Tekrarlı Darbelere Maruz Kalan Numunelerin Darbe Davranışlarının İncelenmesi ....	103
4.4.3. (85*0,73 J + 189*0,61 J + n*0,54 J) ve (189*0,61 J + 85*0,73 J + n*0,54 J) Tekrarlı Darbelere Maruz Kalan Numunelerin Darbe Davranışlarının İncelenmesi ....	106
5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER .....	110
5.1. Sonuçların Tartışılması .....	110
5.2. Öneriler.....	115
KAYNAKLAR.....	116
KİŞİSEL YAYINLAR.....	118
ÖZGEÇMİŞ.....	119

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1: (a) Partikül, (b) Kısa fiber, (c) Sürekli fiber takviyeli kompozitler.....	1
Şekil 1.2: Malzemelerin dayanım / yoğunluk oranlarının tarihsel gelişimi.....	3
Şekil 1.3: F/14 uçaklarında, yatay dengeleyiciler.....	10
Şekil 1.4: F/A-18 uçaklarında kanat yüzeyleri, yatay ve dikey dengeleyiciler, hız frenleri ve kontrol yüzeyleri .....	11
Şekil 1.5: Mirage 2000 uçağında kompozit malzemelerin kullanıldığı yerler.....	11
Şekil 1.6: Airbus A320 model uçağında fiber takviyeli polimer kompozitlerin kullanıldığı yerler.....	13
Şekil 2.1: Basit, tek yönlü fiber takviyeli kompozitin yükleme modlarının şematik gösterimi .....	16, 17
Şekil 2.2: Fiber/matris ara yüzeyinde soyulma mekanizması .....	18
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.....	18
Şekil 2.4: Basma yüklemesi altında fiberlerin burkulması (buckling) .....	19
Şekil 2.5: Cam fiber takviyeli polimerde fiber soyulmasının SEM resmi.....	20
Şekil 2.6: Fiberlerin yerinden çıkma mekanizması .....	20
Şekil 2.7: (a)Cam fiber takviyeli polimerde fiberlerin kesme kırılmasının TEM resmi, (b) Fiberde oluşan kırılma .....	21
Şekil 2.8: Kompozit tabakada oluşan mikro çatlaklar .....	22
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.....	23
Şekil 2.10: Basma yüklemesi nedeniyle oluşan burkulma bantları.....	24
Şekil 2.11: Eğilme yüklemesi nedeniyle hasara uğrayan kompozit malzemenin enine kesiti.....	24
Şekil 2.12: Delaminasyon hasarı .....	25
Şekil 2.13: Kompozit plakada delaminasyon hatası .....	26
Şekil 2.14: Fiber ve matris ara yüzeyindeki şeritlenme.....	27
Şekil 2.15: Fiber kırılması/ara yüzey ayrılması, matris çatlağı, ve kesme hatasını içeren tek yönlü kompozitlerdeki basit yorulma hasar mekanizmaları.....	29
Şekil 2.16: Fiberlere paralel yönde etkiyen yük altında tek yönlü kompozitler için tipik yorulma ömrü grafiği .....	30
Şekil 2.17: Malzeme eksenine göre “ $\theta$ ” açısı ile yüklenen tek yönlü kompozitin yorulma ömrü grafiği .....	31
Şekil 2.18: Cam fiber takviyeli polimer kompozitin yorulma darbe eğrisi .....	35
Şekil 2.19: Cam/Epoksi kompozitinin farklı darbe enerjilerindeki hasar eğrileri.....	36
Şekil 3.1: PEI malzemesinin kimyasal yapısı .....	42
Şekil 3.2: Deneylerde belirtilen büyüklüklerin F-x grafiğinde sembolik olarak gösterimi.....	43
Şekil 3.3: İzod darbe test cihazı.....	44
Şekil 3.4: Çentiksiz izod numunesinin sarkaç tipi Ceast Resil 25 test cihazında tekrarlı yüklemeye maruz bırakılması.....	46

Şekil 4.1: Numunelerin tamamen elastik deformasyona uğradığı küçük enerjili darbeler (0,14, 0,24, 0,38, 0,54 J) .....	48
Şekil 4.2: Darbe-Yorulma çalışması için gerçekleştirilen ön çalışma sonuçları (0,94, 1,44, 2,01, 2,65 J).....	49
Şekil 4.3: Normal numunemizin darbe-yorulma ömür grafiği.....	50
Şekil 4.4: Her bir darbe enerjisi için $F_{maks}$ -tekrar darbe sayısı grafikleri.....	51, 52
Şekil 4.5: Her bir darbe enerjisi için $E_{maks}$ -tekrar darbe sayısı grafikleri .....	53, 54
Şekil 4.6: Her bir darbe enerjisi için $E.F_{maks}$ -tekrar darbe sayısı grafikleri .....	55, 56
Şekil 4.7: Her bir darbe enerjisi için X.e.v.-tekrar darbe sayısı grafikleri.....	56, 57
Şekil 4.8: Her bir darbe enerjisi için çizilen üst üste eğriler .....	58, 59
Şekil 4.9: Yorulma deneylerindeki ilk vuruşlarda alınan verilerin toplu olarak gösterimi .....	60
Şekil 4.10: [100÷500].0,57 J + n.0,94 J darbe enerjileri arasında yapılan darbeli-yorulma için $F_{maks}$ -tekrar vuruş sayısı grafikleri.....	62
Şekil 4.11: [100÷500].0,57 J + n.0,94 J darbe enerjileri arasında yapılan darbeli-yorulma için $E_{maks}$ -tekrar vuruş sayısı grafikleri .....	63
Şekil 4.12: [100÷500].0,57 J + n.0,94 J darbe enerjileri arasında yapılan darbeli-yorulma için $E.F_{maks}$ -tekrar vuruş sayısı grafikleri .....	64, 65
Şekil 4.13: [100÷500].0,57 J + n.0,94 J darbe enerjileri arasında yapılan darbeli-yorulma için X.e.v.-tekrar vuruş sayısı grafikleri.....	66
Şekil 4.14: [100÷500].0,57 J + n.0,94 J darbe enerjisiyle yapılan darbeli-yorulma için çizilen üst üste eğriler .....	67
Şekil 4.15: [100÷500].0,57 J + n.0,85 J darbe enerjileri arasında yapılan darbeli-yorulma için $F_{maks}$ -tekrar vuruş sayısı grafikleri.....	68
Şekil 4.16: [100÷500].0,57 J + n.0,85 J darbe enerjileri arasında yapılan darbeli-yorulma için $E_{maks}$ -tekrar vuruş sayısı grafikleri .....	69
Şekil 4.17: [100÷500].0,57 J + n.0,85 J darbe enerjileri arasında yapılan darbeli-yorulma için $E.F_{maks}$ -tekrar vuruş sayısı grafikleri .....	70
Şekil 4.18: [100÷500].0,57 J + n.0,85 J darbe enerjileri arasında yapılan darbeli-yorulma için X.e.v.-tekrar vuruş sayısı grafikleri.....	71
Şekil 4.19: [100÷500].0,57 J + n.0,85 J darbe enerjileri arasında yapılan darbeli-yorulma için çizilen üst üste eğriler .....	72
Şekil 4.20: [100÷500].0,57 J + n.0,77 J darbe enerjileri arasında yapılan darbeli-yorulma için $F_{maks}$ -tekrar vuruş sayısı grafikleri.....	74
Şekil 4.21: [100÷500].0,57 J + n.0,77 J darbe enerjileri arasında yapılan darbeli-yorulma için $E_{maks}$ -tekrar vuruş sayısı grafikleri .....	75
Şekil 4.22: [100÷500].0,57 J + n.0,77 J darbe enerjileri arasında yapılan darbeli-yorulma için $E.F_{maks}$ -tekrar vuruş sayısı grafikleri .....	76, 77
Şekil 4.23: [100÷500].0,57 J + n.0,77 J darbe enerjileri arasında yapılan darbeli-yorulma için X.e.v.-tekrar vuruş sayısı grafikleri.....	78
Şekil 4.24: [100÷500].0,57 J + n.0,77 J darbe enerjileri arasında yapılan darbeli-yorulma için çizilen üst üste eğriler .....	79
Şekil 4.25: [1÷5].0,94 J + n.0,57 J darbe enerjileri arasında yapılan darbeli-yorulma için $F_{maks}$ -tekrar vuruş sayısı grafikleri .....	80
Şekil 4.26: [1÷5].0,94 J + n.0,57 J darbe enerjileri arasında yapılan darbeli-yorulma için $E_{maks}$ -tekrar vuruş sayısı grafikleri .....	81
Şekil 4.27: [1÷5].0,94 J + n.0,57 J darbe enerjileri arasında yapılan darbeli-yorulma için $E.F_{maks}$ -tekrar vuruş sayısı grafikleri .....	82

Şekil 4.28: $[1÷5].0,94 J + n.0,57 J$ darbe enerjileri arasında yapılan darbeleri-yorulma için X.e.v.-tekrar vuruş sayısı grafikleri.....	83
Şekil 4.29: $[1÷5].0,94 J + n.0,57 J$ darbe enerjileri arasında yapılan darbeleri-yorulma için çizilen üst üste eğriler.....	84
Şekil 4.30: $(250*0,54 J + 10*0,73 J + 2*0,94 J)$ karma darbe grubunun etkidiği numunenin $F_{maks}$ -darbe sayısı grafiği.....	86
Şekil 4.31: $(250*0,54 J + 10*0,73 J + 2*0,94 J)$ karma darbe grubunun etkidiği numunenin $E_{maks}$ -darbe sayısı grafiği.....	87
Şekil 4.32: $(250*0,54 J + 10*0,73 J + 2*0,94 J)$ karma darbe grubunun etkidiği numunenin $E.F_{maks}$ -darbe sayısı grafiği.....	88
Şekil 4.33: $(250*0,54 J + 10*0,73 J + 2*0,94 J)$ karma darbe grubunun etkidiği numunenin X.e.v.-darbe sayısı grafiği.....	88
Şekil 4.34: $(250*0,54 J + 10*0,73 J + 2*0,94 J)$ karma darbe grubunun etkidiği numunenin üst üste grafikleri.....	89
Şekil 4.35: $(10*0,73 J + 250*0,54 J + 2*0,94 J)$ karma darbe grubunun etkidiği numunenin $F_{maks}$ -darbe sayısı grafiği.....	90
Şekil 4.36: $(10*0,73 J + 250*0,54 J + 2*0,94 J)$ karma darbe grubunun etkidiği numunenin $E_{maks}$ -darbe sayısı grafiği.....	91
Şekil 4.37: $(10*0,73 J + 250*0,54 J + 2*0,94 J)$ karma darbe grubunun etkidiği numunenin $E.F_{maks}$ -darbe sayısı grafiği.....	91
Şekil 4.38: $(10*0,73 J + 250*0,54 J + 2*0,94 J)$ karma darbe grubunun etkidiği numunenin X.e.v.-darbe sayısı grafiği.....	92
Şekil 4.39: $(10*0,73 J + 250*0,54 J + 2*0,94 J)$ karma darbe grubunun etkidiği numunenin üst üste grafikleri.....	93
Şekil 4.40: $(2*0,94 J + 250*0,54 J + 10*0,73 J)$ karma darbe grubunun etkidiği numunenin $F_{maks}$ -darbe sayısı grafiği.....	95
Şekil 4.41: $(2*0,94 J + 250*0,54 J + 10*0,73 J)$ karma darbe grubunun etkidiği Numunenin $E_{maks}$ -darbe sayısı grafiği.....	95
Şekil 4.42: $(2*0,94 J + 250*0,54 J + 10*0,73 J)$ karma darbe grubunun etkidiği numunenin $E.F_{maks}$ -darbe sayısı grafiği.....	96
Şekil 4.43: $(2*0,94 J + 250*0,54 J + 10*0,73 J)$ karma darbe grubunun etkidiği numunenin X.e.v.-darbe sayısı grafiği.....	97
Şekil 4.44: $(2*0,94 J + 250*0,54 J + 10*0,73 J)$ karma darbe grubunun etkidiği numunenin üst üste grafikleri.....	97
Şekil 4.45: Karma darbe gruplarının son vuruşlarının üst üste grafiği.....	98
Şekil 4.46: $(50*0,69 J + 75*0,61 J + n*0,54 J)$ ve $(75*0,61 J + 50*0,69 J + n*0,54 J)$ darbe grubunun etkidiği numunelerin $F_{maks}$ -darbe sayısı grafikleri.....	100
Şekil 4.47: $(50*0,69 J + 75*0,61 J + n*0,54 J)$ ve $(75*0,61 J + 50*0,69 J + n*0,54 J)$ darbe grubunun etkidiği numunelerin $E_{maks}$ -darbe sayısı grafikleri.....	101
Şekil 4.48: $(50*0,69 J + 75*0,61 J + n*0,54 J)$ ve $(75*0,61 J + 50*0,69 J + n*0,54 J)$ darbe grubunun etkidiği numunelerin $E.F_{maks}$ -darbe sayısı grafikleri.....	101
Şekil 4.49: $(50*0,69 J + 75*0,61 J + n*0,54 J)$ ve $(75*0,61 J + 50*0,69 J + n*0,54 J)$ Darbe Grubunun Etkidiği Normal Numunelerin X.e.v.-darbe sayısı grafikleri....	102
Şekil 4.50: $(50*0,69 J + 75*0,61 J + n*0,54 J)$ ve $(75*0,61 J + 50*0,69 J + n*0,54 J)$ darbe grubunun etkidiği numuneler için çizilen üst üste eğriler.....	102
Şekil 4.51: $(25*0,77 J + 100*0,61 J + n*0,54 J)$ ve $(100*0,61 J + 25*0,77 J + n*0,54 J)$ darbe grubunun etkidiği numunelerin $F_{maks}$ -darbe sayısı grafikleri.....	103
Şekil 4.52: $(25*0,77 J + 100*0,61 J + n*0,54 J)$ ve $(100*0,61 J + 25*0,77 J + n*0,54 J)$ darbe grubunun etkidiği numunelerin $E_{maks}$ -darbe sayısı grafikleri.....	104



Şekil 4.53: $(25*0,77 J + 100*0,61 J + n*0,54 J)$ ve $(100*0,61 J + 25*0,77 J + n*0,54 J)$ darbe grubunun etkidiği numunelerin $E.F_{maks}$ -darbe sayısı grafikleri.....	104
Şekil 4.54: $(25*0,77 J + 100*0,61 J + n*0,54 J)$ ve $(100*0,61 J + 25*0,77 J + n*0,54 J)$ darbe grubunun etkidiği numunelerin X.e.v.-darbe sayısı grafikleri .....	105
Şekil 4.55: $(25*0,77 J + 100*0,61 J + n*0,54 J)$ ve $(100*0,61 J + 25*0,77 J + n*0,54 J)$ darbe grubunun etkidiği numuneler için çizilen üst üste eğriler.....	106
Şekil 4.56: $(85*0,73 J + 189*0,61 J + n*0,54 J)$ ve $(189*0,61 J + 85*0,73 J + n*0,54 J)$ darbe grubunun etkidiği numunelerin $F_{maks}$ -darbe sayısı grafikleri.....	106
Şekil 4.57: $(85*0,73 J + 189*0,61 J + n*0,54 J)$ ve $(189*0,61 J + 85*0,73 J + n*0,54 J)$ darbe grubunun etkidiği numunelerin $E_{maks}$ -darbe sayısı grafikleri.....	107
Şekil 4.58: $(85*0,73 J + 189*0,61 J + n*0,54 J)$ ve $(189*0,61 J + 85*0,73 J + n*0,54 J)$ darbe grubunun etkidiği numunelerin $E.F_{maks}$ -darbe sayısı grafikleri ...	108
Şekil 4.59: $(85*0,73 J + 189*0,61 J + n*0,54 J)$ ve $(189*0,61 J + 85*0,73 J + n*0,54 J)$ darbe grubunun etkidiği numunelerin $E.F_{maks}$ -darbe sayısı grafikleri ...	108
Şekil 4.60: $(85*0,73 J + 189*0,61 J + n*0,54 J)$ ve $(189*0,61 J + 85*0,73 J + n*0,54 J)$ darbe grubunun etkidiği numuneler için çizilen üst üste eğriler .....	109

## TABLolar DİZİNİ

Tablo 1.1: Karbon ve Grafit Elyafının Karşılaştırılması .....	6
Tablo 3.1: PEI malzemesinin özellikleri.....	41
Tablo 3.2: Tek yönlü karbon fiber takviyeli PEI kompozit malzemesinin mekanik özellikleri.....	42
Tablo 3.3: ASTM ve ISO standartlarında belirlenmiş çentiksiz izod darbe testinde kullanılan test numunelerinin boyutu.....	45
Tablo 4.1: Numuneler için darbe enerjisine bağlı olarak değişen kırılma için gerekli darbe tekrar sayılarının karşılaştırılması .....	50

## SEMBOLLER

- $F_{maks}$  : Her bir darbe de ulaşılan maksimum kuvvet değeri (N)  
 $E_{maks}$  : Absorbe edilen toplam enerji (J)  
 $E.F_{maks}$ : Numunenin absorbe edebileceği maksimum elastik enerji (J)  
 $X.e.v.$  : Her bir darbede oluşan maksimum deformasyon miktarı (mm)  
 $E$  : Elastisite modülü (MPa)  
 $L$  : Fiber boyu (mm)  
 $T$  : Sıcaklık ( $^{\circ}C$ )  
 $T_g$  : Camsı geçiş sıcaklığı ( $^{\circ}C$ )  
 $\epsilon$  : genleme  
 $\epsilon_m$  : Minimum genleme sınırı  
 $\epsilon_c$  : Maksimum genleme sınırı  
 $d$  : Fiber apı (mm)

## Kısaltmalar

- CTP : Cam Takviyeli Plastik  
PAN : Poliakrilonitril  
KF-PEI: Sürekli karbon fiber takviyeli Polieterimid  
PITCH: Zift  
PEI : Poly (Etherimide)  
PEEK : Polyetheretherketon  
GF-PPE: Kısa fiber takviyeli polyphenylenether  
GF-PPS: Polyphenylenesulfide  
ASTM : American Society of Testing Materials  
ISO : International Organization for Standardization  
TEM : Taramalı Elektron Mikroskobu

# POLİMER KOMPOZİTLERİN TEKRARLI DARBE YÜKLEMELERİ ALTINDAKİ DAVRANIŞI

**Mustafa Özgür BORA**

**Anahtar Kelimeler:** Darbe-yorulma, Polimer Kompozitler, Termoplastik matris, Karbon fiber.

**Özet:** Bu çalışmada Tek Yönlü Karbon Fiber Takviyeli Polieterimid (PEI) kompozit malzemelerin enstrumante edilmiş Ceast sarkaç tipli (Resil 25) test cihazı yardımıyla 0,54-0,94 J arasında değişen düşük enerjili darbe-yorulma davranışları incelenmiştir. Malzemeler kırılıncaya kadar düşük hızlı tekrarlı darbelere maruz bırakılmıştır.

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 maksimum deformasyon miktarı (X.e.v.) ve darbe sayısı terimleriyle ifade edilmiştir.

Belirli sayıda düşük enerjili darbeler uygulandıktan sonra daha yüksek darbe enerjisiyle numuneyi kırana kadar deneyler yapılmış ve polimer kompozitin darbe-yorulma ömrü incelenmiştir. Ayrıca yüksek enerjili darbeler uygulandıktan sonra numuneyi kırana kadar düşük enerjili darbeler uygulanmıştır. Bulunan sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Karma darbelere maruz kalan polimer kompozitlerin darbe davranışları incelenmiştir. Üç farklı darbe enerjisine maruz bırakılan malzemeleri incelemek için üç farklı deney grubu oluşturulmuştur. Birbirleri arasındaki ilişkiyi açıklayabilmek amacıyla deneylerde üç farklı darbe enerjisi ve vuruş sayıları değiştirilmeden sadece uygulama sıraları değiştirilerek uygulanmıştır.

Birbirinden farklı darbe enerji çiftleriyle yapılan darbelere maruz kalan polimer kompozitlerin darbe davranışları incelenmiştir. Deney grupları kendi içinde “n” tekrarlı darbe sayısının karşılaştırılmasıyla yorumlanmıştır.

## ON THE LIFE TIME PREDICTION OF REPEATEDLY IMPACTED POLYMER COMPOSITES

**Mustafa Özgür BORA**

**Keywords:** Impact-fatigue, Polymer Composites, Thermoplastic Matrix, Carbon Fiber.

**Abstract:** In this study, impact fatigue properties of unidirectional carbon fiber-reinforced polyetherimide (PEI) composites were investigated by subjecting standard izod impact samples to low velocity repeated impact loading at energy levels ranging 0,54–0,94 J by using Ceast Model Resil 25, a pendulum type instrumented impact test system. Materials were subjected to repeated low velocity impact tests up to fracture.

Results of repeated impact study are reported in terms of peak load ( $F_{max}$ ), absorbed energy ( $E_{max}$ ), absorbed energy up to maximum load ( $E.F_{max}$ ), maximum deformation value of each impact (X.e.v.) and number of repeated impacts.

After applying a certain number of low energy impacts, experiments were performed with the higher impact energy until the specimen fractured and the impact-fatigue life time prediction of polymer composite were investigated. Otherwise after applying the high energy impacts, low energy impacts were performed until the specimen fractured. The results of these experiments were compared with each other.

Impact properties of polymer composites were investigated by subjecting combined impacts. For investigating of materials which were subjected three different impact energy, three different group of experiment were performed. Purpose of express the relation between the groups, three different impact energy and impact numbers were not changed expect application turns.

Impact properties of polymer composites were investigated by subjecting pairs of impact energy which were different from each other. The experiment groups were commentated by comparing the repeated impact number “n”.

# 1. GİRİŞ

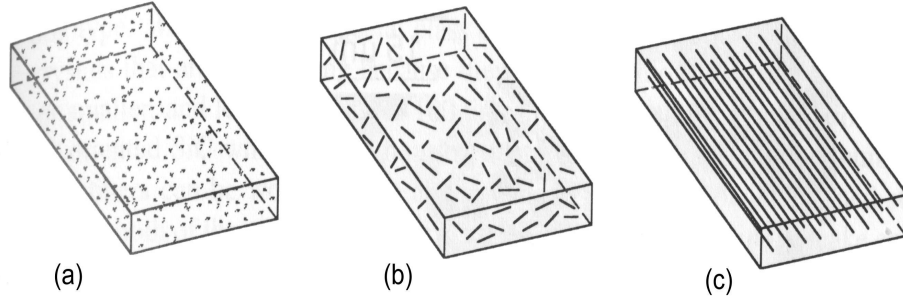
## 1.1 Kompozit Malzeme Nedir?

Kompozitler, belirli bir amaca yönelik olarak, en az iki farklı malzemenin bir araya getirilmesiyle meydana getirilen malzeme gurubudur. Kompozit malzemelerde, bileşenlerin hiç birinde tek başına tatmin edici olmayan özelliklerin amaçlanan doğrultuda özelliklere sahip yeni bir malzeme üretilmesi sağlanır.

Kompozit malzemedede 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

Buna göre malzeme, mikroskobik açıdan heterojen bir malzeme özelliği göstermekte, ancak makroskobik açıdan homojen bir malzeme gibi davranmaktadır. 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

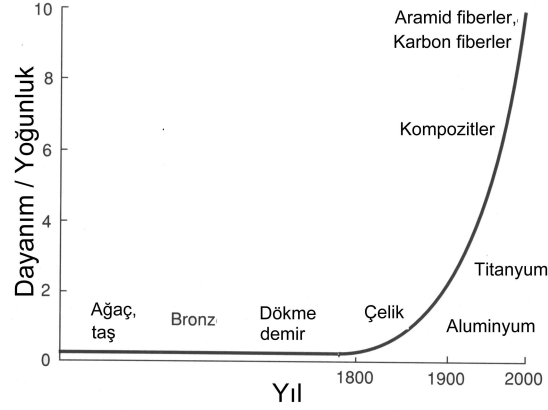
Günümüzde gemi yapımından bina yapımına, ev aletleri üretiminden uzay teknolojisine kadar hemen hemen her alanda çok yaygın bir kullanımı bulunan kompozit malzemelerin üretimi ve kullanımı son birkaç yüzyıla maledilmiş gibi görülse de ilk örnekleri çok eskilere dayanmaktadır. Kompozit malzeme kavramının 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 kırılğan malzemelerin içine bitkisel veya hayvansal lifler koyarak bu kırılğanlığın 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. Günümüzde kompozit malzemenin takviye edilmesinde yaygın olarak kullanılan fiberlerle ilgili uygulamanın da çok yeni olmadığı eldeki bulgulardan anlaşılmaktadır. Örneğin cam fiberlerin üretimi, eski Mısır'a kadar tarihlendirilmektedir. Daha M.Ö 1600 yıllarında Mısır'da ince cam fiberlerin yapımının bilindiği, XVIII. Hanedan devrinden kalan, çeşitli renk ve tonlardaki cam lifleriyle bezenmiş amforaların mevcudiyetinden anlaşılmaktadır.

Fiberlerle takviye edilen sentetik reçineler 1950'li yılların ortalarından itibaren endüstride kullanılmaya başlanmıştır. Bu malzemenin en tanınmış grubunu "cam fiber takviyeli polyester matrisli kompoziti" oluşturmaktadır. 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 malzemedен 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).



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

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

### 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 ısı direnci,
- Elektrik iletkenliği veya elektriksel direnci,
- 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 bazı dezavantajları söz konusudur. Bunlar,

-Hammaddenin pahalı olması; Uçaklarda kullanılacak kalitede karbon fiberden üretilen bir metre karelik 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 bağlıdır.

-Malzemelerin sınırlı raf ömürleri vardır. Bazı tür kompozitlerin veya hammaddelerinin soğutularak saklanması 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. Kompozit malzemelerde yükü taşıyan fiberlerin fonksiyonlarını yerine getirmeleri açısından matrisin mekanik özelliklerinin rolü çok büyüktür. Örneğin matris malzemesi olmaksızın bir fiber demeti düşünüldüğünde yük bir yada birkaç fiber tarafından taşınacaktır. Matrisin varlığı ise yükün tüm fiberlere eşit

dağılımını sağlayacaktır. Kayma yükü altındaki bir gerilmeye dayanım için, fiberlerle matris arasında iyi bir yapışma ve matrisin yüksek kayma dayanımı özelliklerine sahip olması gerekir.

Fiber yönlenmelerine dik doğrultudaki zorlanmalarda, matrisin mekanik özellikleri ve fiber ile matris arasındaki ara yüzey özellikleri, kompozit malzemenin mukavemetini belirleyici önemli hususlardır. Matris fibere göre daha zayıf ve esnektir. Bu özellik kompozit malzemenin tasarımında dikkat edilmesi gereken bir husustur.

Matrisin kayma mukavemeti ve matris ile fiber arası bağ kuvvetleri çok yüksek ise fiber yada matriste oluşacak bir çatlağın yön değiştirmeksizin ilerlemesi mümkündür. Bu durumda kompozit gevrek bir malzeme gibi davrandığından kopma yüzeyi temiz ve parlak bir yapı gösterir. Eğer bağ mukavemeti çok düşükse, fiberler boşluktaki bir elyaf demeti gibi davranır ve kompozit zayıflar. Orta seviyede bir bağ mukavemetinde ise, fiber veya matristen başlayan enlemesine doğru bir çatlak fiber/matris ara yüzeyine dönüp fiber doğrultusunda ilerleyebilir. Bu durumda kompozit sünek malzemelerin kopması gibi lifli bir yüzey sergiler.

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  $2,268 \text{ gr/cm}^3$  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. Bu malzemeler hammadde olarak bilinirler. Karbon fiberlerin üretiminde üç farklı hammadde mevcuttur. Bunlardan ilki rayondur (suni ipek). Bu hammadde inert bir atmosferde  $1000-3000 \text{ }^\circ\text{C}$  civarına ısıtılır ve aynı zamanda çekme kuvveti uygulanır. Bu işlem fibere dayanım ve tokluk sağlar. Ancak yüksek maliyet nedeniyle rayon fiberler çok tercih edilmezler. Fiber imalatında genellikle rayonun yerine 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 Elyafının Karşılaştırılması (Yılmaz, 2006)

Özellik	Grafit	Karbon
Safılık (%)	99	93-95
İşlem Sıcaklığı ( $^\circ\text{C}$ )	> 1700	< 1700
Elastite Modülü (GPa)	>345	<345

Karbon fiberlerin en önemli özellikleri düşük yoğunluğun yanı sıra 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 alüminyum, magnezyum gibi metal matrislerle de kullanılırlar.

### **1.5. Fiber Takviyeli Kompozitler**

Bu kompozit tipi ince fiberlerin matris içinde yer almasıyla meydana gelmiştir. Fiberlerin kompozit kesitindeki yerleşimi kompozit malzemenin dayanımını etkileyen önemli bir unsurdur. Sürekli fiberlerin matris içinde birbirlerine paralel şekilde yerleştirilmeleri ile fiberler doğrultusunda yüksek dayanım sağlanırken, fiberlere dik doğrultuda düşük dayanım elde edilir. İki boyutlu yerleştirilmiş (çapraz katlı) fiber takviyelerle her iki yönde de eşit dayanım sağlanırken, matris içerisinde rasgele dağılmış kısa fiberlerle ise izotrop bir yapı oluşturmak mümkündür.

Fiberlerin dayanımı kompozit malzemenin dayanımı açısından çok önemlidir. Ayrıca, fiberlerin uzunluk/çap oranları arttıkça matris tarafından fiberlere iletilen yük miktarı artmaktadır. Fiberlerin yapısal kusurlarının olmaması da dayanım açısından çok önemlidir.

Kompozit malzemenin dayanımında önemli olan diğer bir unsur ise fiber ile matris arasındaki bağın özellikleridir. Matris içinde boşluklar söz konusu ise fiberlerle temas azalacaktır. Nem absorpsiyonu da fiber ile matris arasındaki azaltan olumsuz bir özelliktir.

#### **1.5.1. Tabakalı kompozitler**

Tabakalı kompozit malzeme, en eski ve en yaygın kullanım alanına sahip olan tiptir. Farklı fiber yönlenmelerine sahip tabakaların bileşimi ile farklı yükleme yönlerinde yeterince yüksek dayanım değerleri elde edilir. Isıya ve neme dayanıklı malzemelerdir. Metallere göre hafif ve aynı zamanda dayanımlı olmaları nedeniyle

tercih edilen malzemelerdir. Pek çok tabakalı kompozit, yüksek dayanım ve hafifliğinin yanında, yüksek aşınma direnci, iyi ısıl genleşme özelliklerine sahiptirler. Korozyon ve aşınma direnci gibi önemli özelliklerin pek çoğu öncelikle kompoziti oluşturan elemanların bireysel özelliklerine bağlıdır. Elektrik şarjını depolamak için kullanılan kondansatörler esas itibariyle dönüşümlü olarak bir iletken ve bir yalıtkan katmanların üst üste gelerek meydana getirdiği tabakalı kompozitlere bir örnektir.

### **1.5.2. Polimer matrisli kompozitler**

Polimerler yapıları gereği metal ve seramik esaslı konvansiyonel malzemelerden farklıdırlar. Diğer malzemelerden avantajlı yanları ön plana çıkartılarak kullanım alanları giderek genişlemektedir. Polimer ve polimer kompozitlerin başlıca hedefleri en az çelik kadar sağlam, olabildiğince hafif, yüksek kullanım sıcaklıklarına dayanıklı ve ekonomik malzeme üretimidir. Günümüzde ileri mühendislik malzemelerinin kullanımında hiç şüphesiz otomotiv sektörü en büyük payı almaktadır. Otomobillerde çeşitli polimer malzemelerin kullanımı % 10 civarında ise de tamponlar gibi bazı özel uygulamalarda polimer kompozitler rakipsizdir.

Bunun yanı sıra örneğin bakırdan daha iyi derecede elektrik iletkenliği bulunan özel bazı polimer sistemlerin yapılması ile polimerik ileri malzeme spektrumu alabildiğince genişlemiştir (Yılmaz, 2006). Çeşitli mühendislik uygulamalarında metallerin yerine tercihen kullanılan polimer kompozitler sadece hafiflik, mekanik dayanım gibi özellikler değil, insan dokuları ile uyum sağlayan ve sertlik değerleri ayarlanabilen yapay doku ve organlar gibi uygulamaların dışında "optik fiberler" ve basınç ile elektrik üretebilen" piezoelektrik özellikli ve istenildiği gibi işlenebilen özel sistemlerin yapımında da metal ve seramik malzemelerin yerlerine kullanılmaktadır.

Polimer kompozitleri iki ana kategoride incelemek mümkündür. Bunlar parçacık (partikül) dolgulu ve sürekli fiber takviyeli kompozitlerdir. Özellikle sürekli fiber içeren kompozitler yüksek performans istenen alanlarda giderek daha çok kullanılmaktadır.

Polimer kompozitlere neden gereksinim vardır? Bu soruyu cevaplamak için kullanılan malzemede ne gibi özellikler istediğimizi bilmemiz gerekir. Malzemede yerine göre sağlamlık, esneklik, hafiflik, çevre şartlarına (nem, güneş ışınları vb.) dayanıklılık, darbe dayanımı, sertlik gibi günlük yaşamda kullanılan terimlerle ifade edilen özellikler yanında daha bilimsel bir dille ısı genleşme katsayıları, yorulma, kırılma, çekme, eğme dayanımları ve benzeri özelliklerin uygunluğu aranır. Bütün istenen özellikleri tek bir metal, seramik veya polimer malzemede bulmak son derece ender rastlanan bir olaydır. 1950'lerden beri polimer kompozitler çok önemli bir boşluğu doldurmuştur. Bugün yaygın olarak uçak, roket, füze gövdeleri, yüksek kalitede spor malzemeleri, yapay kemik gibi maliyetin yüksekliğinin pek önemli olmadığı alanlarda kullanıldığı gibi otomobil lastiği, otomotiv sanayi, beyaz eşya, basınç dayanımlı boru ve deniz araç gövdeleri gibi geniş bir spektrumda işlev görmektedirler.

Önümüzdeki yıllarda uzay ve havacılık başta olmak üzere, robotik ve tıp alanında ve gelişen diğer teknolojilerde polimer kompozitlere daha da çok ağırlık verilecektir. Bu amaçla hem daha güçlü ve sağlam fiberler, hem de daha yüksek ısı dayanımlı, çatlak oluşturmayan, darbe dayanımı yüksek ve sert polimer matrisler üzerinde çalışmalar dünyada ve ülkemizde devam etmektedir.

## **1.6. Kompozit Malzemelerin Kullanım Alanları**

Kompozit malzemeler artık 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.

### **1.6.1. Uçak yapılarında polimer kompozit malzeme kullanımı**

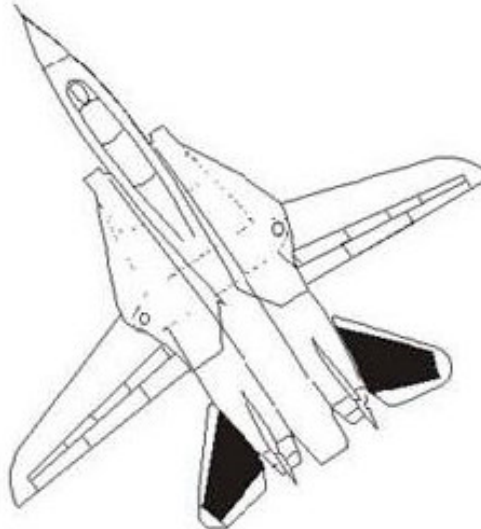
Kompozitlerin havacılık endüstrisindeki kullanım alanları giderek artmaktadır. Fiber takviyeli polimer kompozitlerde olan gelişmeler uçak iskeleti yapılarının evrimleşmesindeki en önemli adımlardan biri olmuştur. Özellikle uçak konstrüksiyonlarında kompozit malzemeler oldukça geniş kullanım alanına sahiptir.

Kompozit malzemelerinin hafifliklerine oranla üstün mekanik özellikleri uçaklarda ve helikopterlerde sadece iç mekan değil yapısal parçalarının da 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, iklimik etkilere, termal zorlanmalara vb. pek çok alanda avantajları vardır. (Yılmaz, 2006).

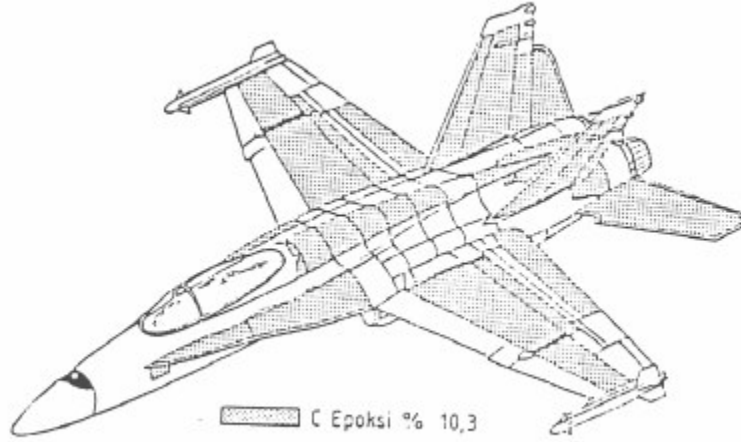
Polimer matrisli malzemelerin en fazla tercih edildiği sektör havacılık sektörüdür. Günümüzde, askeri ve sivil uçak endüstrisinde kompozitleri, uçakların gövde ve motorlarında etkin bir şekilde kullanılan birçok üretici vardır.

- B2 bombardıman uçağı gövde panelleri; karbon fiber/epoksi
- F/14 uçaklarında, yatay dengeleyiciler, F-15'lerde ise yatay ve dikey dengeleyiciler, bor/epoksi kompozit malzemesinden yapılmıştır (Şekil 1.3).



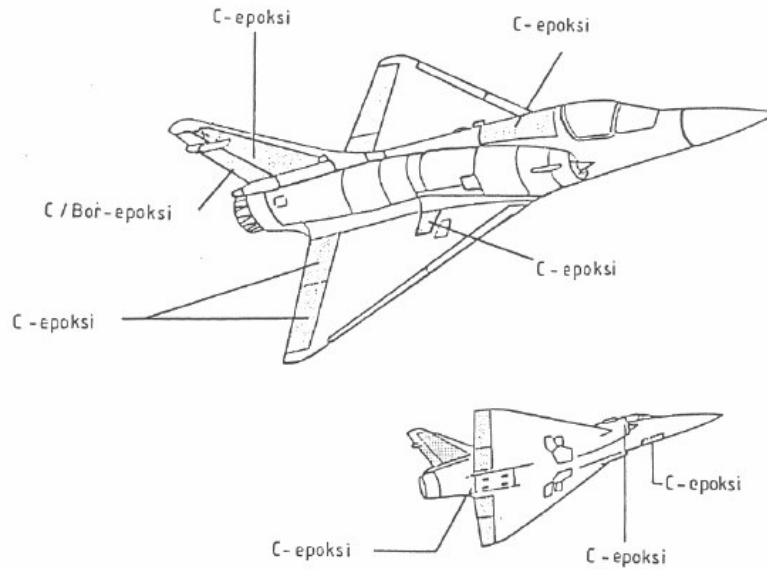
Şekil 1.3: F/14 uçaklarında, yatay dengeleyiciler

- F/A-18 uçaklarında kanat yüzeyleri, yatay ve dikey dengeleyiciler, hız frenleri ve kontrol yüzeyleri,(Şekil 1.4)



Şekil 1.4: F/A-18 uçaklarında kanat yüzeyleri, yatay ve dikey dengeleyiciler, hız frenleri ve kontrol yüzeyleri

- Mirage 2000 uçağında kompozit malzemelerin kullanıldığı yerler (Şekil 1.5)
- AV-8B uçaklarında; kanatlar, yatay dengeleyiciler, ön gövde ve kontrol yüzeyleri karbon/epoksi olarak yapılmıştır.
- F-29 uçağının kanat yüzeylerinde grafit/epoksi kullanılmıştır.
- Stealth Bombardıman Uçağı (Hayalet uçak)



Şekil 1.5: Mirage 2000 uçağında kompozit malzemelerin kullanıldığı yerler



Amerikan yapımı bu uçaklar polimer kompozit malzemeden yapılmışlardır. Gerek malzemenin (Radara dalgalarını yutan özel doku) gerekse uçak gövde dizaynının sonucu olarak uçak radarlara yakalanmamaktadır. Körfez savaşında bu uçaklar görünmeden uzun mesafeli uçuşlar yaparak bombardıman yapmışlardır.

- F-16, F-22 vb. Avcı Uçakları

Karbon fiber takviyeli polimer kompozit yapıya sahip bu 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, yada % 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.

Malzemenin özelliği gereği oluşan pek çok mikro çatlak gelen kurşunun darbe enerjisini pek çok mikro çatlak oluşturarak sönmümler. Uçak yere indiğinde isabet eden panel değiştirilerek göreve devam edilir. F-16'larda, yatay ve dikey dengeleyicilerin yanı sıra dış yüzeylerinin büyük bir bölümü de karbon/epoksi'dir.

- A380 yolcu uçağı kanat panelleri ve flaplar; karbon fiber/epoksi

- A380 yolcu uçağı burun bölümü (radome); CTP

- A380 yolcu uçağı dikey stabilizer; Aramid fiber/epoksi

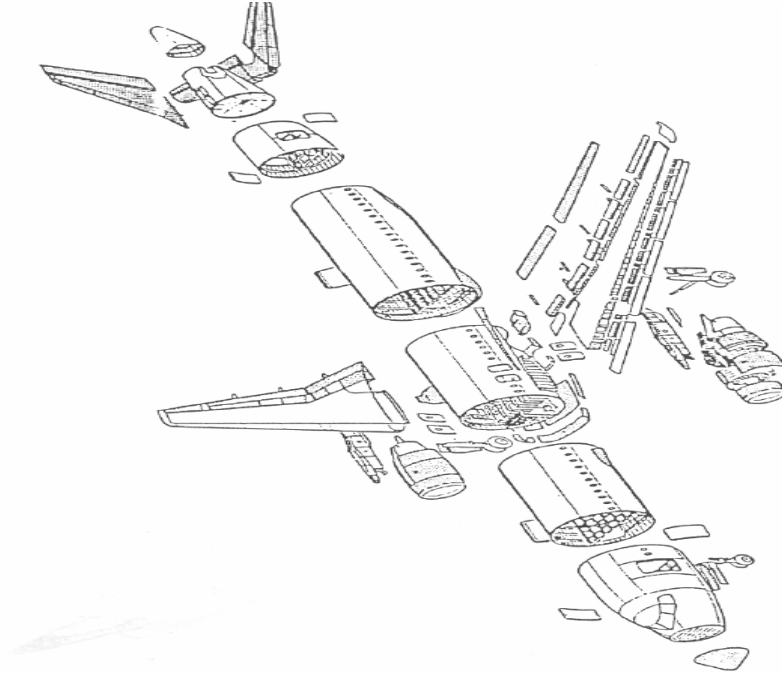
- Boeing 757 ve 767'lerde; dış yüzeyler karbon/epoksi motor kaportaları karbon/aramid-epoksidir. Boeing 767 de % 3 fiber takviyeli polimer kompozit kullanılmıştır.

- Askeri C-17 kargo uçağında % 6 fiber takviyeli polimer kompozit kullanılmıştır ve ağırlığı 7000 daN 'dur.

- Airbus A320 uçaklarında, spoylerlerde, eleronlarda, kuyruk takımlarında, silindirik motor kılıflarında, karbon takviyeli kompozitler kullanılmıştır. Airbus A320 model uçağında % 15 Fiber takviyeli polimer kompozit kullanılmıştır (Şekil 1.6).

- Uçak Frenleri

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 ısı genleşmeye sahip, iyi ısı 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.



Şekil 1.6: Airbus A320 model uçağında fiber takviyeli polimer kompozitlerin kullanıldığı yerler

### 1.6.2. Diğer kullanım alanları

- Motorlar
- Spor malzemelerinin üretimi (kayak, tenis raketleri)
- Dişli çarklar
- Özel takımlar
- Kamyon yaprak yayları
- Karoseri elemanları
- Boru tesisatları
- Yapı işleri

- Deniz araçları yapımında
- Elektrik malzemeleri
- Nükleer reaktörler
- Batarya ızgaraları
- Elektrik elemanları, ısıtıcılar

### **1.7. Tez Konusunun Önemi ve İçeriği**

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 konvansiyonel 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 düşünülmeyp stratejik performanslarda dikkate alınmıştır. Özellikle titreşim, yorulma ve ısı dayanımı gibi nitelikler uzay ve havacılık sanayinde kompozit malzemelerin önde gelen avantajlarıdır. Uçak ve havacılık uygulamalarında kullanılan sürekli fiber takviyeli polimer kompozitlerden yapılan gövde ve parçalar kullanım veya bakım esnasında küçük darbelerle maruz kalmaktadır. Bu darbeler malzemelerin kırılmasını sağlayacak büyüklükte olmasa bile kalıcı küçük deformasyonlara neden olan ve ileride parçanın hasarlanmasına neden olan öncü deformasyonların oluşmasına neden olmaktadır.

Bu çalışmada amaç, düşük hızlı ve enerjili tekrarlı darbelerin kompozit malzemenin darbe özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmak ve malzemenin darbeli yorulma (impact-fatigue) ömrünü tespit etmektir. 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 maksimum deformasyon miktarı (X.e.v.) ve darbe sayısı terimleriyle ifade edilmiştir. Yorulma-darbe yüklemesi esnasında fraktografik incelemeler yapılarak çatlakların başlangıcı, ilerlemesi ve hasar mekanizmaları analiz edilmiştir. Bu çalışmada kapsamında;

a) Tek Yönlü Karbon Fiber Takviyeli Polieterimid (PEI) kompozit malzemelerin enstrumante edilmiş Ceast sarkaç tipli (Resil 25) test cihazı yardımıyla 0,54-0,94 J arasında değişen düşük enerjili darbe-yorulma davranışları incelenmiştir.

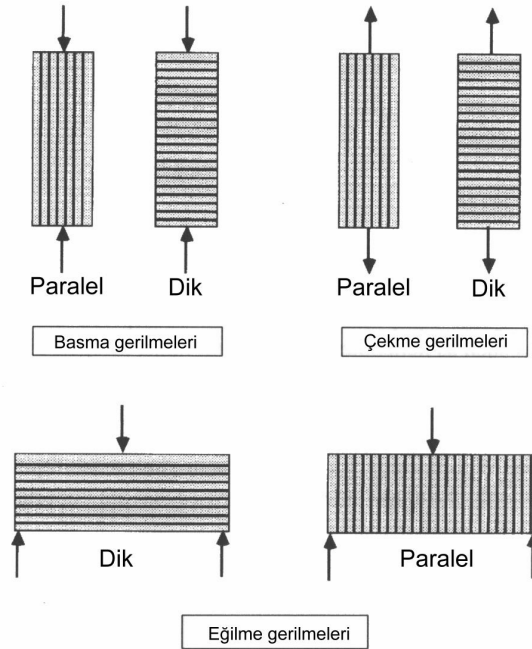
- b) Sayıları 100÷500 arasında değişen 0,54 J değerindeki darbeler uygulanmıştır. Hemen ardından kırılıncaya kadar 0,94 J, 0,85 J, 0,77 J değerindeki darbeler altında darbe-yorulma davranışları incelenmiştir.
- c) 0,54÷0,94 J arasında değişen düşük enerjili darbelerle darbe-yorulma davranışları incelenmiştir. Deneyler 3 farklı darbe enerjisi (0,54 J, 0,73 J, 0,94 J), 3 farklı darbe sayıları (250,10,2) gerçekleştirilmiştir. Her grup için toplam vuruş sayısı aynı olup, darbe enerjilerinin sıraları değiştirilmiştir. Üç farklı gruptaki darbeler uygulandıktan sonra hasarlanan malzemeler 2,65 J değerinde son bir darbeye kırılmıştır.
- d) İki farklı darbe enerjisi seçilip, numuneye birinci darbeden “x” adet ardından ikinci darbeden “y” adet uygulanmıştır. Son olarak da 0,54 J değerindeki darbelerden “n” adet kırılıncaya kadar uygulanmıştır. Uygulamanın devamında bu iki farklı darbe enerjisi yer değiştirilerek numuneye uygulanmıştır. Yine ardından 0,54 J değerindeki darbelerden “n” adet kırılıncaya kadar uygulanmıştır.
- e) İlk önce sayıları 1÷5 arasında değişen 0,94 J değerindeki darbeler uygulanmıştır, hemen ardından hasara uğrayıncaya kadar 0,54 J değerindeki darbeler ile darbe-yorulma davranışları incelenmiştir.

## 2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI

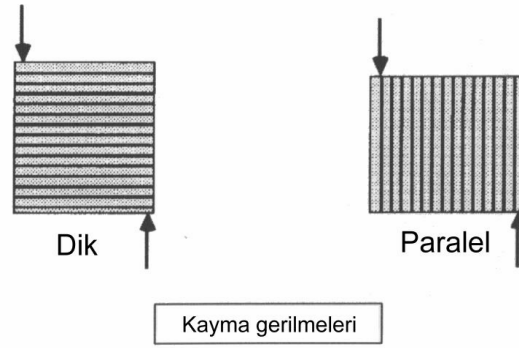
### 2.1. Polimer Kompozitlerin Hasar Mekanizmaları

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.

Kompozitleri 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).

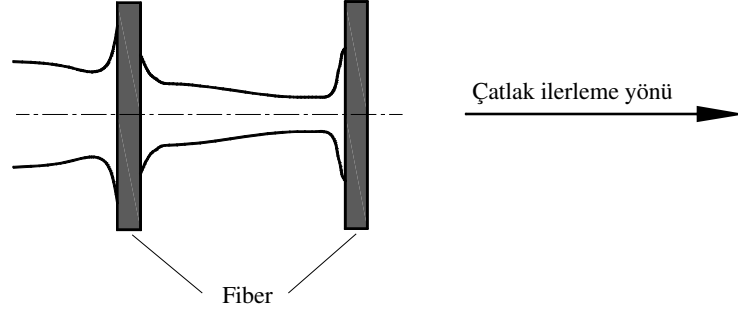
Yüklemeler esnasında kompozitlerin mekanik tepkileri genellikle ya fiber yada matris bazlıdır. Çoğu durumda, hasar davranışı ikisinden biri tarafından belirlenmektedir. Örneğin, fiber dizilimi ile aynı yönde tek eksenli çekme altındaki bir sürekli fiber takviyeli kompozitte fiberler hasar durumunu tayin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

### 2.1.1. 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 büyük olur. Kırılma yüzeyi üzerinde, çok az ya da hiç matris bulunmaksızın dışarı çıkmış

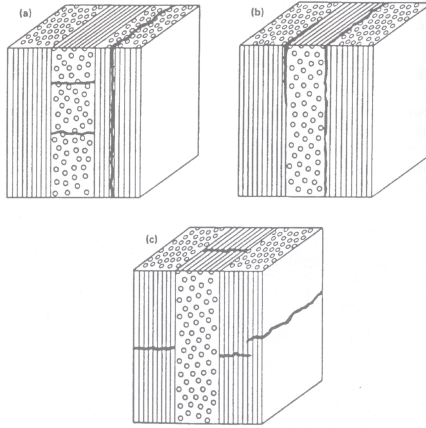
fiberlerle ve pürüzsüz bir matris yüzeyinin varlığıyla açıklanmaktadır (Scheris, 2000).



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

### 2.1.2. 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 kırılğan davranışıyla açıklanmıştır. Kompozitlerin ara yüzey ayrılması, boşluk miktarı arttıkça olduğunda daha fazla olur. Bir çekicinin kompozit malzeme üzerine düşmesi gibi önemsiz görülen bazı darbeler, basma yüklemesiyle yüklenen plakada burkulma (buckling) hasarı oluşması, belirlenemeyen bir hasara yol açabilir (Scheris, 2000).



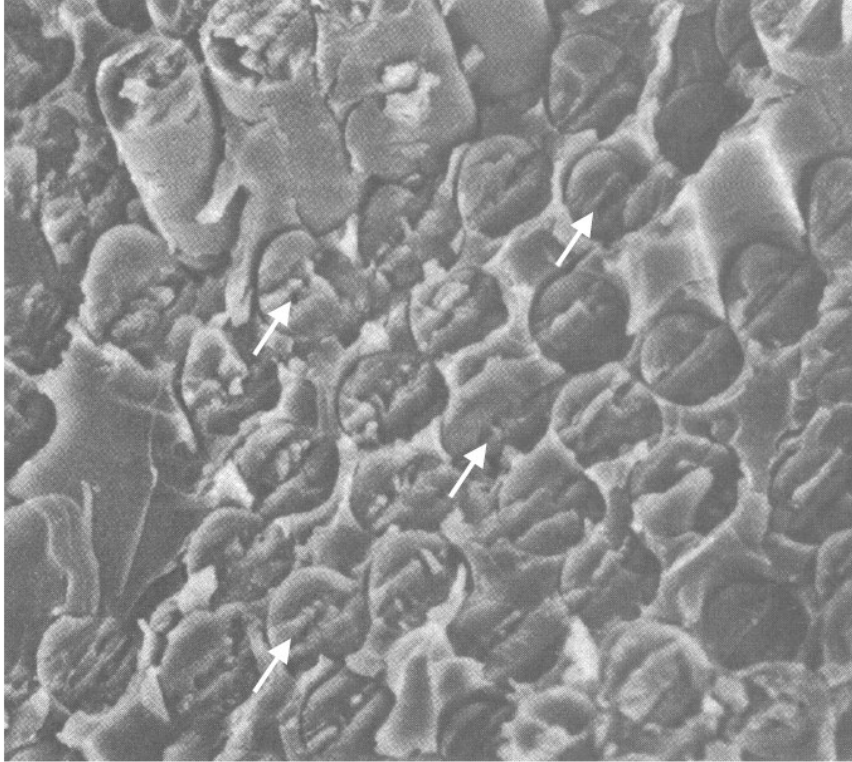
Şekil 2.3: İki boyutlu çapraz katlı kompozitlerde hasar tipleri: (a) tabaka içi hasarı (b) tabakalar arası hasar (c) fiber yönüne dik tabaka içi hasar (Scheris, 2000)

### 2.1.3. Fiber burkulması (Buckling)

Matris yeterli dayanımına sahip olamadığında, matris tarafından yeterince desteklenmeyen fiberlerde basma yüklemesinin etkisiyle fiber burkulması oluşur. Yüksek sıcaklıklarda basma zorlanmasına maruz kalacak kompozitler için camı geçiş sıcaklığı değerleri yüksek matris malzemesine ihtiyaç duyulur. Böylece kompozit yüksek sıcaklıkta iyi bir basma özelliğine sahip olacaktır (Scheris, 2000).

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 yüklemesi altında fiberlerin burkulması (buckling) (Rakow ve Pettinger, 2006)

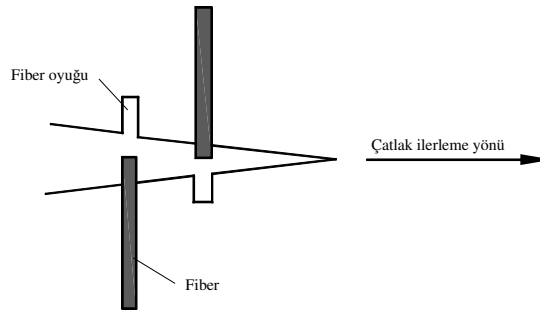


#### 2.1.4. Fiberin yerinden çıkması (Pull-out)

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 Mikroskopuyla (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).



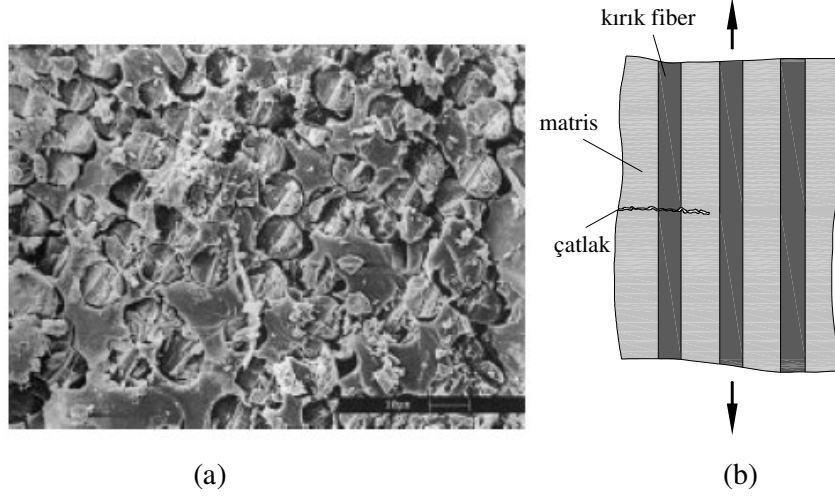
Şekil 2.5: Cam fiber takviyeli polimerde fiber soyulmasının SEM resmi (Roy ve diğ., 2001)



Şekil 2.6: Fiberlerin yerinden çıkma mekanizması (Scheirs, 2000)

### 2.1.5. Fiber kırılması

Fiber kırılması bazı kompozitlerde belirli ölçülerde enerji-emilme mekanizmasıyla ilişkilidir. Maalesef, cam fiberin yüksek modülü ve kırılkan bir yapısı vardır, bu yüzden enerji emilimi sınırlıdır (Scheris, 2000).



Şekil 2.7: (a)Cam fiber takviyeli polimerde fiberlerin kesme kırılmasının TEM resmi (Roy ve diğ., 2001), (b) Fiberde oluşan kırılma (Yılmaz, 2006)

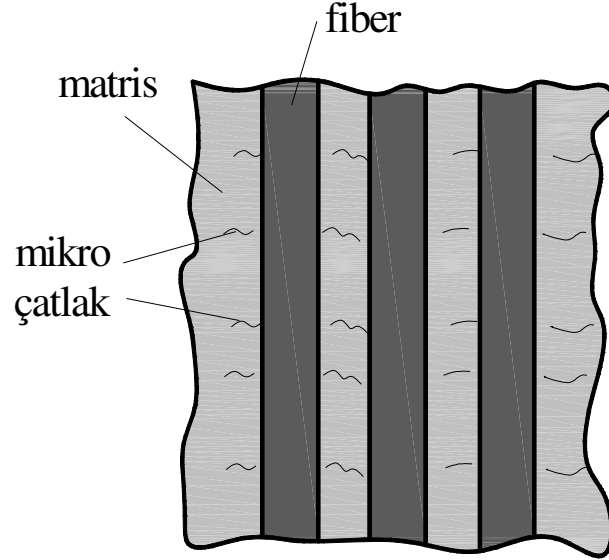
### 2.1.6. Kompozitlerde çatlak oluşumu

Bir çatlakın 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 yansınmasıyla beyaz gözüktür (Scheris, 2000).

### 2.1.7. Kompozitlerde mikro-çatlama

Sürekli fiber takviyeli kompozitlerin mikro-çatlama genel bir problem olup, fiber ve matris arasında termal genişleme farklılığından dolayı oluşmaktadır. Bu olay

kompozitin üretimi yada tavlama sonrası soğuması esnasında oluşmakta ve yüksek sıcaklık kompozitlerinde özellikle önemlidir. Matris ve fiber arasındaki termal genişleme farklılığı çeşitli gerilmelere neden olabilir ve matrisin tamamen hasarına veya mikro-çatlama sebepleri 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 genişlemede katmanların anizotropik olmasıdır. Mikro-çatlama, epoksi/grafit ve poliamid/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)

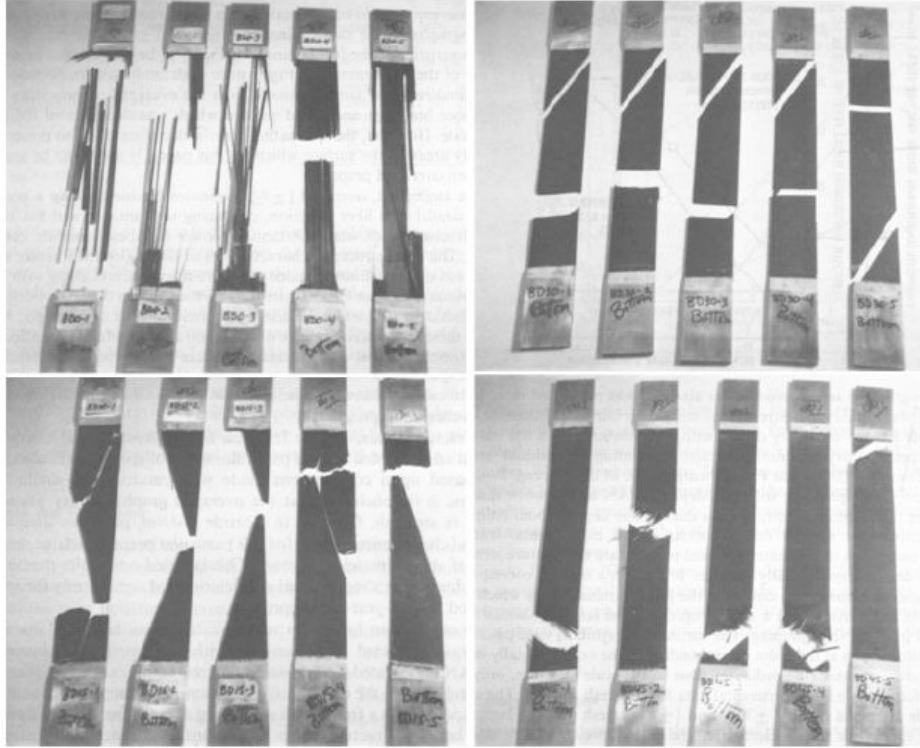
## 2.2 Kompozit Malzemelere Uygulanan Yükleme Çeşitleri ve Malzemede Oluşturdukları Hasarlar

### 2.2.1. 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)

### 2.2.2. Basma yüklemesi

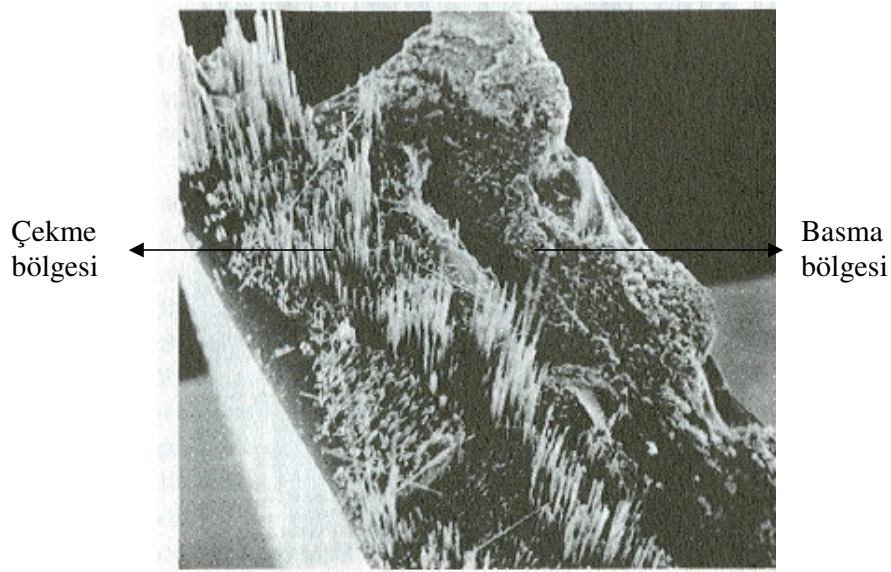
Basma yüklemesinde, fiberler daha az verimlidirler. Fiber takviyeli kompozitlerin basma hasarının en genel karakteristiği burkulmuş fiber gruplarının oluşturduğu (kink) batlarıdır (Şekil 2.10).



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

### 2.2.3. 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)

Eğilme esnasında tarafsız eksen ile kompozit malzemeyi ikiye ayırırsak, kırılan yüzeylerin bir parçasında fiberlerin yerinden çıkmış olduğu, diğer parçada ise düz bir

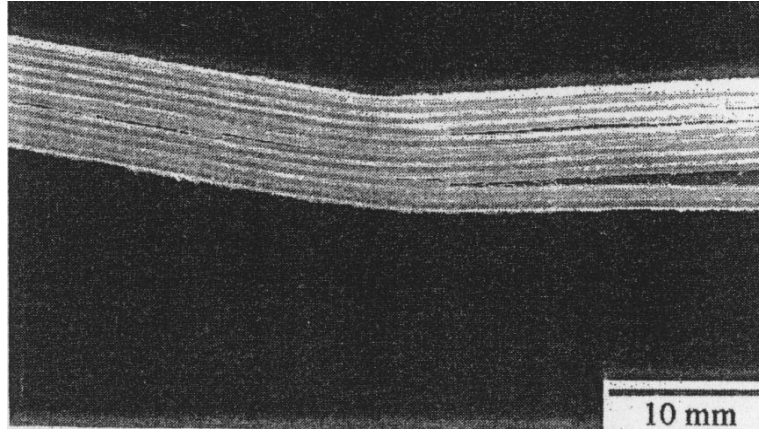
yüzeyle sahip olduğu görülmektedir. Sonuçta eğilmede, enine kesitin bir parçası çekmeye diğer parçası da basmaya maruz kalır. Bu karakteristik özellik mikroskobik incelemeler kolaylıkla ayırt edilebilir (Rakow ve Pettinger, 2006).

#### 2.2.4. Darbe yüklemesi

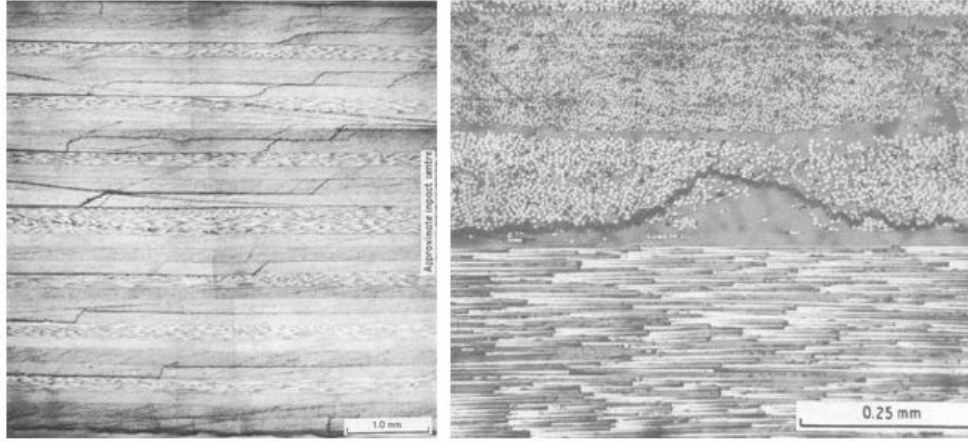
Havacılık sanayisinde kullanılan kompozit malzemeler genellikle gevreklerdir. Bu nedenle, darbe yüklemeleri yüzeyde herhangi bir görünür hasar vermeden kompozit malzemeyi hasara uğratabilir.

Yapının darbe performansı darbe etkisi yapan nesne, yada 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 delaminasyondur (Şekil 2.12). Delaminasyon kompozit malzemede katmanlar arası kayma neticesi oluşur. Kayma hareketi, üretim esasında birleştirilmiş katmanların ya da fiber-matris ara yüzeyi boyunca oluşabilir. Darbeden sonra kompozit plakanın enine kesiti şekilde gösterilmiştir (Şekil 2.13) (Rakow ve Pettinger, 2006).



Şekil 2.12: Delaminasyon hasarı



Şekil 2.13: Kompozit plakada delaminasyon hatası (Rakow ve Pettinger, 2006)

Yüzeyde görülebilir bir hasar olmaksızın, delaminasyonlar ya kompozitin enine kesitinden yada ultrasonik veya X-ışınları muayenesi gibi tahribatsız deneyler yardımıyla tespit edilebilir (Rakow ve Pettinger, 2006).

Grafit-fiber takviyeli kompozitlerin düşük darbe dirençleri vardır. Fiber ve matris arasında güçlü ara yüzey bağı nedeniyle, darbe fiberlere dik yönde çatlaklara sebep olur, ve bu çatlakların durdurulması çok zordur. Grafit-fiber takviyeli kompozitlerin bu yüzden fiber eksenine dik yönde darbe dirençleri zayıftır. Buna zıt olarak kevlar takviyeli kompozitlerde darbe yüklemesi nedenli çatlaklar fiber eksenine paraleldir, bu yüzden mükemmel bir darbe direncine sahiptirler (Scheris, 2000).

Tipik karbon fiber takviyeli polimer kompozitlerde fiberlere paralel yöndeki kırılma enerjisi  $1 \text{ kJ/m}^2$  iken, fiberlere dik yöndeki kırılma enerjisi  $50-100 \text{ kJ/m}^2$ 'dir. Kompozit malzemeler bu yüzden fiberlere dik yönde kırılmalıdır (Jones, 1994).

PEEK/karbon fiber takviyeli kompozitler epoksi-karbon fiber takviyeli kompozitlere göre daha fazla delaminasyon direnci gösterirler. PEEK kompozitleri, matrisi termoplastik olması nedeniyle daha fazla enerji absorbe eder ve karbon fiber takviyeli diğer kompozitlere göre delaminasyon hasarını azaltır. Fiber takviyeli kompozitlerin darbe dayanımının, kritik uzunluktan (minimum uzunluğuyla

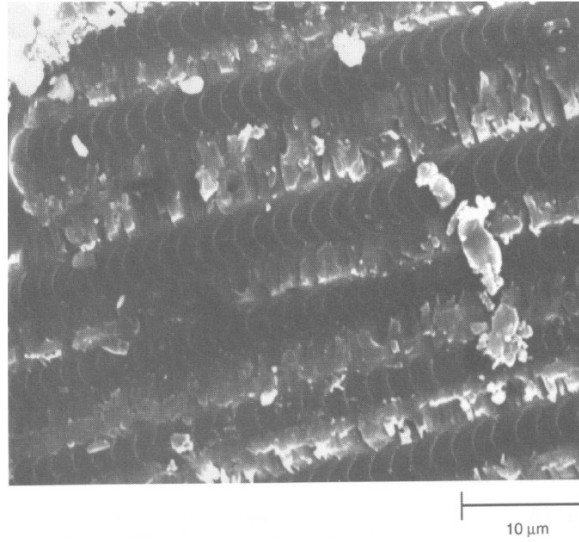
maksimum kırılma dayanımına ulaşılan değer) daha fazla fiber uzunlukları için artacağı bulunmuştur (Scheris, 2000).

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

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 yüklemeye, ilerleyen kırılma yüzeyleri bir diğerine sürtünür ve kırılan fiberler sonunda matriste abrazyon izleri bırakır (Rakow ve Pettinger, 2006).



Şekil 2.14: Fiber ve matris ara yüzeyindeki şeritlenme (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).

Tek yönlü fiber takviyeli kompozitler fiber yönüne etki eden yorulma yüklemesine karşı büyük bir direnç sergilerler. Bazı kompozitlerde yüksek anizotropi bulunmaktadır; helikopterlerin pervanelerindeki gibi bazı uygulamalarda enine yöndeki dayanımları düşüktür (Scheris, 2000).

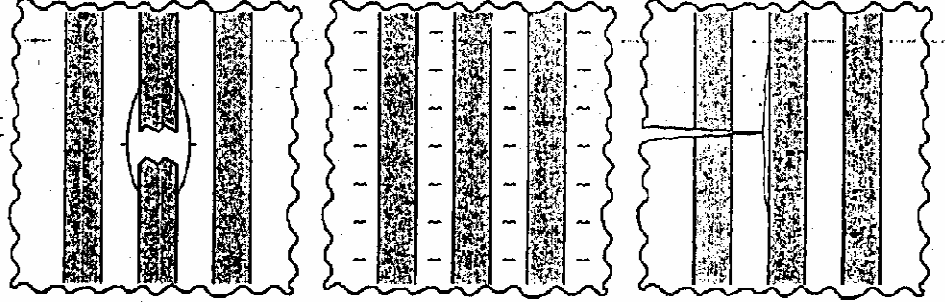
### **2.3. Tabakalı Kompozit Malzemelerde Yorulma Hasar Mekanizması**

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. Kompozitlerde  $0^0$  yönlenme düzenine sahip katmanlar, farklı açılarda yönlenmiş katmanlara kıyasla yorulmaya karşı daha büyük dirence sahiptir. Bununla birlikte hasarın gerçekleştiği uzama miktarı diğer oryantasyonlara göre daha fazladır (Yılmaz,2006).

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).

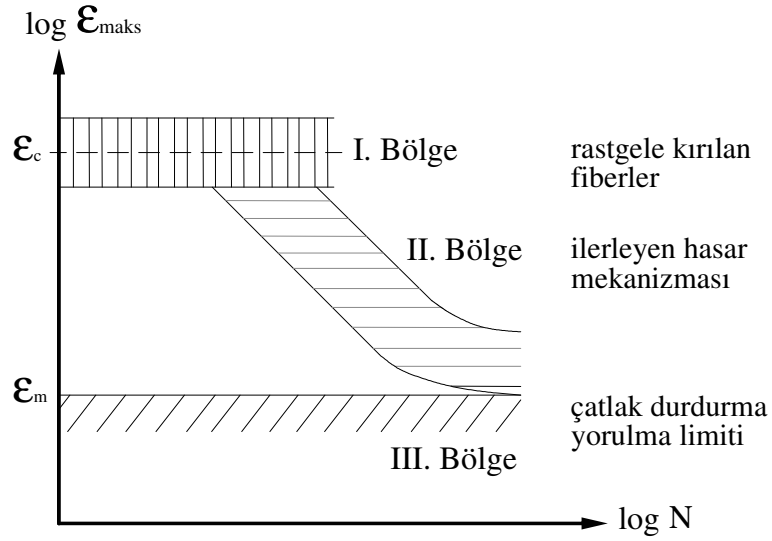


Şekil 2.15: Fiber kırılması/ara yüzey ayrılması, matris çatlakları, ve kesme hatasını içeren tek yönlü kompozitlerdeki basit yorulma hasar mekanizmaları (Pantelakis ve Labeas, 2001)

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 geliştiği 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  $\epsilon_m$  ile gösterilmiştir. Bu eşik değerinin altında matris çatlakları fiberler tarafından durdurulmaktadır. Bu genleme değeri takviyesiz matris malzemesinin yorulma genleme sınırıdır. Malzemeyi hasara uğratabilecek üst genleme sınırı grafikte  $\epsilon_c$  ile gösterilmiştir. Bu değer fiber takviyelerinin hasarlanacağı genleme değeridir.

I. bölgedeki uzama seviyesi genellikle statik yüklemeye 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.



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

Bölgede gelişen hasar mekanizmaları düzensiz olduğundan ilk yükleme çevrimi sonrasında oluşan hasar dağılımındaki değişimi tespit etmek nerdeyse 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).

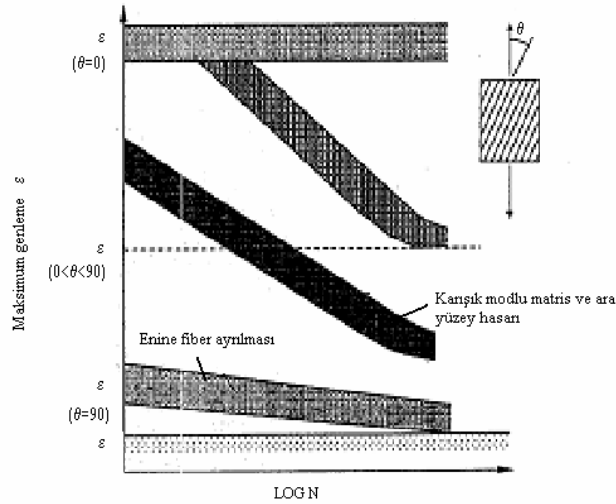
II. bölge hasar oluşumunun devam ettiği gelişme bölgesi olarak adlandırılmaktadır. Burada oluşan hasar mekanizmaları bu bölgenin eğiminden sorumlu fiber köprülü çatlaklar (fiber bridged cracking) ve gelişen soyulmadır. Yorulma duyarlılığı genellikle yorulma-ömür diyagramındaki II. Bölgenin eğimi ile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



Şekil 2.17: Malzeme eksenine göre “ $\theta$ ” açısı ile yüklenen tek yönlü kompozitin yorulma ömrü grafiği (Pantelakis ve Labeas, 2001)

Yükleme eksenine 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 yüklenme açısıyla “ $\theta$ ” ilişkilidir (Şekil 2.17).

#### **2.4. Kompozit Tabakaların Hasar Karakteristiği ve Darbe Direnci**

Shyr ve Pan orta-ağır darbe enerjili düşük hızlı darbeler altında, çeşitli kalınlıkta tabakalara sahip farklı dokuma yapılı kompozit malzemelerdeki hasar karakterlerini ve darbe davranışlarını incelemiştir. Örgülü, örgüsüz dokuma yapılı kompozit malzemelerin darbe dirençleri incelenmiştir. Darbe hasarının detayları hasar karakteristiğini belirlemek için tahribatlı metotlar kullanarak gözlemlenmiştir.

Enerji-absorbsiyon mekanizmalarına bakılırsa, yedi katmana sahip kompozit malzemede en önemli hasar modunun delaminasyon olduğu görülürken, on üç katmanlı kompozit malzemede en önemli hasarın fiber kırılması olduğunu göstermiştir. Bu yüzden, katmanlar kompozit tabakalarda enerji-absorbe mekanizması için önemli parametrelerden biri olduğu sonucu çıkmıştır (Shyr ve Pan, 2003).

Fiber ve/veya matris kırılması, fiberin yerinden çıkması ve delaminasyonlar, yekpare malzemelerde oluşmamasına rağmen bir kompozit malzeme için önemli hasar mekanizmalarıdır. Son dayanımlarının altındaki gerilmelere maruz kompozitlerdeki farklı hasar mekanizmalarının varlığı analizin zorluğunu arttırmaktadır. Hangi hasar mekanizmasının etkili olacağı, hangi mekanizmaları etkileyeceği ve kompozit malzemesi içerisinde nasıl dağılacağı en önemli sorulardır (Morais ve diğ., 2005).

Darbe esnasında basma bölgesinde matris çatlağı başlar, fakat hasarın asıl olduğu bölge çekme bölgesidir. Delaminasyonlar belirgin olarak çekme bölgesinde oluşur. Sadece çekme gerilmelerinin olması delaminasyonların varlığını kritik yapmayabilir, fakat delamine olmuş bölgeler tabakaların eğilme rijitliğini etkileyeceğinden son derece önemlidir. Delaminasyonların başlamasının tabakaların kalınlığına bağlı olduğu görülmüştür (Morais ve diğ., 2005).

Tabaka kalınlığına bağlı olarak cam, karbon ve aramid fiberle takviye edilmiş kompozitlerdeki düşük enerjili tekrarlı darbe davranışının değişen dirençleri çekiç enerjisine bağlıdır. 3,7 J değerinin altındaki enerjilerde, darbenin olduğu tabakanın enine kesiti tabaka kalınlığıyla darbe direncini karşılar. Bu yüzden, tüm deneylerde kullanılan fiber cinsini hesaba katmadan, tekrarlı düşük enerjili darbeler tabaka kalınlığına bağlı olarak artırılmıştır. Bu çalışmadaki daha yüksek enerji seviyeleri için tabaka kalınlığıyla birlikte tekrarlı darbelere karşı direnç, kullanılan fiberlere ve fiberlerin dağılımına bağlı olmaktadır. Aynı fiber hacim oranına sahip üç farklı fiberle takviye edilmiş kompozit malzemelerde en küçük fiber çapı cam fiber olarak belirlenmiştir. En iyi performansın aramid ve karbon fiber takviyeli kompozitlere nazaran daha yüksek bölgesel yer kaplaması nedeniyle cam fiber takviyeli kompozitlerde olduğu gözlemlenmiştir (Morais ve diğ., 2005).

Bir diğer çalışmada, tabakalı kompozitlerde darbe-hasar başlangıcı ve ilerlemesi incelenmiştir. Üç çeşit hasar mekanizması (matris çatlağı, fiber kırılması, ve delaminasyonlar) belirlenmiştir. Tabaka kalınlığı, fiberlerin dizilişii gibi etkilerin kompozit plakaların hasar davranışları üzerindeki etkileri incelenmiştir (Zhao ve Cho, 2005).

Düşük-hızlı darbelerde, tabakalı kompozit plakaların kalınlığı kalıcı bölgesel çukurlar ve delaminasyonun oluşumu üzerinde ihmal edilemez bir etkiye sahiptir. Kalınlıktaki değişim azda olsa darbenin hız eşiğini değiştirirken, maksimum hasar büyüklüğünü belirgin bir şekilde etkilemiştir. Daha kalın kompozit plakalarda, aynı darbe hızında daha küçük hasar bölgesi oluşur. Çünkü darbe uzaklığı kalın plakalarda ince plakalara nazaran daha azdır, bu yüzden hasarın büyüklüğü toplam dinamik deformasyonla ilişkilidir (Zhao ve Cho, 2005).

## **2.5. 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).

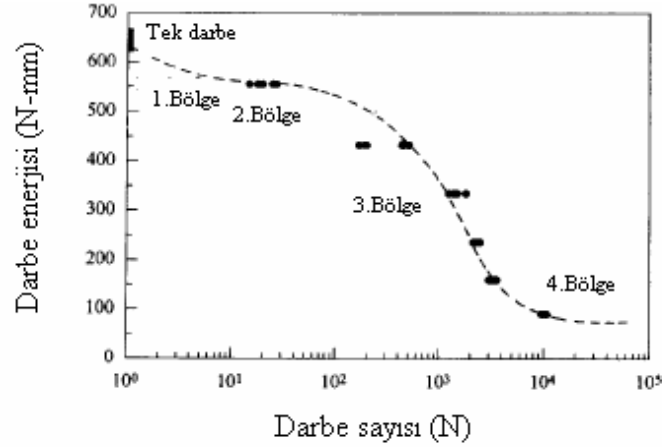
Kısa fiber takviyeli polyphenylenether (GF-PPE) ve polyphenylenesulfide (GF-PPS)'in darbe yorulma özellikleri tek eksenli ve tekrarlı testler yardımıyla incelenmiştir. Çatlağın başladığı tekrar sayısının temas süresine bağlı olduğu gözlenmiştir. Tek eksenli testlerde, çatlağın başladığı tekrar sayısı yüksek olup, tekrarlı testlerde ise tekrar sayısının az olduğu görülmüştür. Farklı koşullar altında yapılan darbe yorulma testlerinde farklı hasar mekanizmaları ortaya çıkmıştır (Kawaguchi ve diğ., 2004).

Tekrarlı darbe yorulma testlerinde sürekli fiber takviyeli epoksi ve PPS kompozitlerinin hasar mekanizmalarını incelemişlerdir ve darbe yorulma testinin hem termoplastik hem de termoset kompozitlerinin hasar toleransı için kullanışlı olduğunu bulmuşlardır (Roy ve diğ., 2001).

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.

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).



Şekil 2.18: Cam fiber takviyeli polimer kompozitin yorulma darbe eğrisi (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 olmaktadır (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 delaminasyon ve soyulma kompozitlerde esas hasar tipleridir. Darbede delaminasyonun çekme ve basma özelliklerinin bozulmasına neden olduğu tespit edilmiştir. Böylece darbe altındaki kompozitin

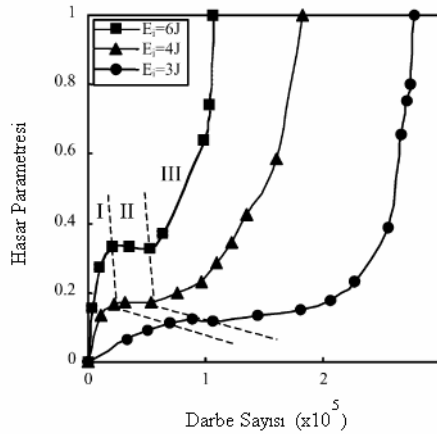


uygunluğu sadece uygun tasarım parametreleriyle belirlememeli, ayrıca malzemenin absorbe ettiği darbe enerjisi de göz önüne alınmalıdır.

Darbe dayanımı genellikle darbe hızı, kullanılan fiber ve matris tipi, fiber hacim oranı ve ara yüzey yapışması gibi parametrelerle saptanmalıdır. Fiberlerin yerinden çıkması ve kayma hasarı, matris çatlağı, ayrılma ve delaminasyonun 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).

Bu çalışmada, darbe tekrar sayısına bağlı olarak değişen hasar parametresi eğrileri üç ana bölge halinde incelenmiştir (Şekil 2.19). I.bölgede, tabakalar arası ayrılma ilk darbe tekrarlarında görünmektedir. Bu bölgede iki olay gerçekleşmektedir: tabakalar arası ayrılma yüzeylerinin büyümesi ve yeni ayrılma yüzeylerinin oluşması. I.bölge tabakalar arası ayrılmanın başladığı ve bunların birleşerek çoğaldığı bölgedir.



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

II.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.

III.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 delaminasyonları ilerletmeye ve numuneyi kırmaya yetmemektedir (Azouaoui, 2001).

Karbon fiber takviyeli polimer kompozitler üzerinde yapılan düşük hızlı darbe testleri 20° ile -150° 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 birlikte artmaktadır. Darbeden önce tabakaları kurutmanın darbe enerjisinin yarattığı etkiye bezer bir etki yarattığı görülmüştür: daha büyük matris çatlağı ve delaminasyon 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).

Bu çalışmada [0/45/90/-45]<sub>2S</sub> yönlü karbon/epoksi tabakalar düşük-hızlı darbeye maruz bırakılmıştır. Bu tabakalara değişik darbe enerjileri uygulanmış, ve darbe etkiden 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 delaminasyonlar 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 edilen sonuçlardan, düşük-hızlı darbe yüklemesinin karbon/epoksi kompozitinin yorulma davranışını etkilediği görülmüştür (Gomez-del Rio ve diğ. 2005).

Termal çevrim yapılması halinde yüksek sıcaklıkta çapraz katlı karbon fiber takviyeli polimer AS4/PEEK malzemesinde matris çatlakları görülmüştür ve hasarın gelişimi analiz edilmiştir. Tüm katmanlarda, -196-250° C çevriminde matris çatlakları yoğunluğu 0° katmanlarına göre 90° katmanlarında yaklaşık olarak iki kat fazla olmuştur. Hasarın mekanik analizi her katmanda matris çatlakları göz önüne alınarak enerji salıverme oranı ve ortalama enine gerilmeleri hesaplamada kullanılmıştır. (Kobayashi ve diğ., 2001)

PEEK çevresel etkilere karşı dirençli, iyi mekanik özelliklere sahip 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 tekrarına maruz kalacağı açıktır (Tai ve diğ., 1999).

Kompozitler havacılık endüstrisinde kullanılırken, mekanik ve termal yorulma gibi yüklemelere maruz kalırlar. Bu düşük-enerjili darbeler malzemede hasarı başlatan unsur olabilir. Karbon/PEEK kompoziti, düşük-enerjili darbe ile etkilenmiştir. Katmanların yorulma davranışı ve mekanik özelliklerindeki değişim üzerinde termal çevrimin etkisini görmek amacıyla test edilmiştir.

Düşük-enerjili darbe ve termal çevrim ile test edilmiş  $[0/45/90/-45]_{2S}$  quasi-isotropik karbon/PEEK katmanların çekme dayanımı ve yorulma davranışları incelenmiştir. Düşük-enerjili darbenin çekme dayanımını düşürdüğü gözlemlenmiştir. Termal çevrim ise katmanların çekme dayanımını fazla etkilememesine rağmen, yüzeyde oluşan hasar miktarını arttırmıştır. Yorulma testleri ise düşük-enerjili darbenin ve termal çevrim yüklemesinin yeterli miktarda karbon/PEEK katlı kompozitlerin yorulma ömrünü düşürdüğünü göstermiştir (Tai ve diğ., 1999).

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 yüklemde çok düşük enerji absorbe yeteneğine sahiptirler. Bu epoksi matrisin kırılma enerjisine, grafit fiberlerin düşük enine kayma dayanımına ve hasar esnasında oluşan düşük genlemeden kaynaklanmaktadır (Salehi-Khojin ve diğ., 2007).

Levhanın darbe etkilenen yüzeyine bir kevlar veya hibrit tabakası konulup, üç kat karbon fiber katlı kompozit plakalara  $-50^{\circ}\text{C}$  ila  $120^{\circ}\text{C}$  arasındaki sıcaklıkta 15,25 ve 45 J değerindeki enerji seviyelerinde düşük hızlı darbeler uygulanmıştır. Maksimum absorbe enerjisi, çarpma performansı, gerilmeyi karşılama ve kayma gerilmesi araştırılmıştır (Salehi-Khojin ve diğ., 2007).

Araştırmalarda, sıcaklığın hibrit ve kevlarla takviye edilmiş karbon fiber takviyeli polimerlerin darbe davranışını önemli ölçüde etkilediği görülmüştür. Yüksek enerji seviyesinde kompozit plakanın alt yüzeyinde penetrasyon oluşmuştur. Artan sıcaklıkla maksimum absorbe edilen enerjinin miktarı karbon-karbon ve karbon-kevlarda artarken karbon-hibritte ise azalmıştır (Salehi-Khojin ve diğ., 2007).

Gevrek veya sünek, metal yada kompozit, tüm malzemelerdeki kırılma az yada çok çatlaklar, boşluklar gibi mikroskobik süreksizlikler ve kusurlardan kaynaklanmaktadır. Malzemenin dayanımı kırılma enerjisine, elastisite modülüne, ve kırılmaya sebep olan çatlakın büyüklüğüne bağlıdır (Dash ve Chatterjee, 2004).

Bir yük etkisinde malzemenin kırılma dayanımı, çatlak ilerlemesine karşı malzemenin direncini ve kırılma davranışını belirlemede esas rolü üstlenmektedir. Malzeme, yapısının en son dayanımını ve kırılma davranışını incelemeye kullanılmamalıdır (Dash ve Chatterjee, 2004). 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).

Farklı çentik boyutuna sahip çeşitli çevresel etkilere maruz bırakılmış karbon fiber takviyeli polimer 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 numuneleri etkilemesinden sonra soyulma ve delaminasyonlar oluşmuştur. Bu çekme yüklemesinde numunelerin tamamen hasara uğramasına neden olmaktadır.
- Sıcaklığın matris ayrılmasına gözle görülür bir etki ettiği gözlenmiş ve malzemenin dayanımını düşürmüştür.

Sıvı ortamında, malzemedeki nem difüzyonunun miktarı önemli bir etkidir. Osmotik basınç ve malzemedeki boşluklar nem difüzyon miktarını etkileyen parametrelerdir (Dash ve Chatterjee, 2004).

### 3. MALZEME VE YÖNTEM

#### 3.1. Kullanılan Malzeme

##### 3.1.1. Malzeme hakkında genel bilgiler

Sürekli karbon fiber takviyeli Polieterimid (KF-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 iç yapıda kullanılmaktadır.

Üretici firmalar tarafından genellikle 3,660x1,220 mm ebatında üretilmektedirler. Reçine konvansiyonel termoplastik kalıp ekipmanında işleme tabi tutulur. Enjeksiyon kalıp uygulamalarında erime sıcaklığı 350-425 °C'dır. Kalıp sıcaklığı ise 65-175 °C arasında olmalıdır ([www.tencate.com](http://www.tencate.com)).

##### 3.1.2. PEI malzemesinin özellikleri

Üretici firmadan alınan PEI malzemesinin özellikleri Tablo 3.1'de gösterilmiştir.

Tablo 3.1: PEI malzemesinin özellikleri ([www.tencate.com](http://www.tencate.com))

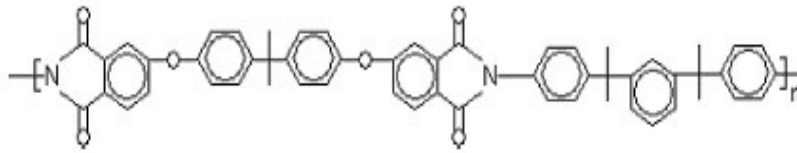
Spesifik yoğunluk	1,27 gr./cm <sup>3</sup>	Eğilme dayanımı	138 MPa
T <sub>g</sub> (Camsı geçiş sıcaklığı)	419 °F (215 °C)	Eğilme modülü	3,450 MPa
Erime sıcaklığı	572 °F (300 °C)	Kesme dayanımı	103 MPa
Nem emilimi	% 1,25	Poisson oranı	0,44
Çekme dayanımı	105 MPa	Izod çentiksiz	1,335 J/m
Çekme modülü	% 7 uzamada 3,276 MPa	Izod çentikli	53,4 J/m
Basma dayanımı	152 MPa	Termal iletkenlik	0.067W/m-°C
Basma modülü	3,310 MPa		

### 3.1.3. Deneyde kullanılan kompozit malzeme hakkında bilgiler

Deneylerde kullanılan sürekli karbon fiber takviyeli polieterimid (KF-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 ağırlığının  $222 \text{ g/m}^2$  ve kalınlığının 0,14 mm olduğu 14 tabakadan oluşmaktadır. Plakanın ticari kodu CD5150'dir. Kompozit tabakanın mekanik özellikleri Tablo 3.2'de verilmiştir. Ayrıca PEI malzemesinin kimyasal yapısı Şekil 3.1'de gösterilmiştir (Sınmazçelik ve Arıcı, 2006).

Tablo 3.2: Tek yönlü 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



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

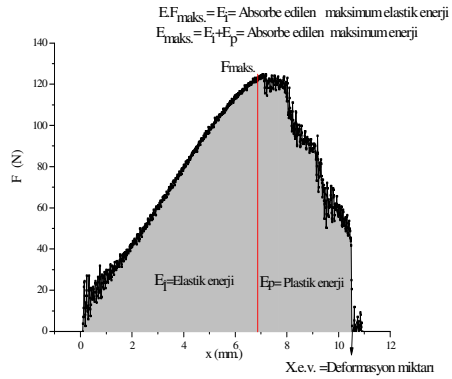
## 3.2. Uygulanan Deneysel Yöntem ve Standartları

### 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 absorpsiyonunu 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-deformasyon miktarı eğrisi gösterilmektedir.



Şekil 3.2: Deneysel olarak belirlenen büyüklüklerin F-x grafiğinde sembolik olarak gösterimi

Şekil 3.2’de sembolik olarak çizilen F-x grafiğinden 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 numunenin uygulanan darbeye karşı gösterdiği direnç daha yüksektir. Darbe testlerinde de numunelere farklı enerjilere sahip tekrarlı darbeler uygulanmıştır ve numunelerin darbelere gösterdiği direnç görülmüştür.  $E.F_{maks}$  değeri

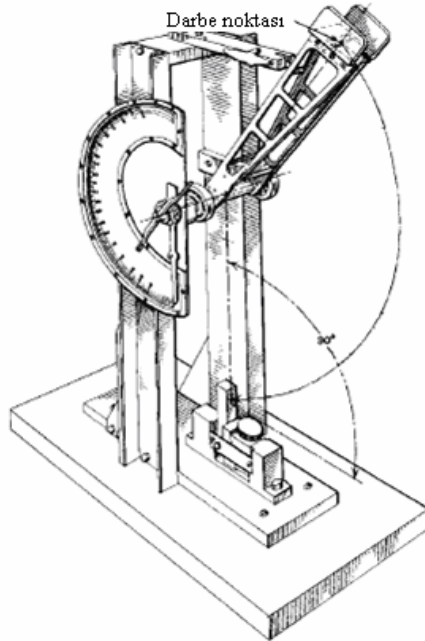


numunenin absorbe edebileceği maksimum elastik enerjidir. F-x grafiğinde maksimum yükün sol tarafında kalan alandır.  $F_{maks}$  değeri her bir darbe de ulaşılan en yüksek kuvvet değeridir. X.e.v. değeri ise numunede her bir darbede oluşan maksimum deformasyon miktarıdır.

### 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 malzemeye 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 genel sertliği arasında kıyaslama yapmak için kolay kullanılabilir 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, 2004).



Şekil 3.3: İzod darbe test cihazı (ASTM D 4812-06, 2004)

Test Yöntemi: Numunenin ince kenarı sarkacın çarpacağı yüzeye gelecek şekilde 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 kullanılır (ASTM D 4812-06, 2004).

Kullanılan çekiç: Çekiç, çarpma ucunu içeren ve numuneye belli bir yükseklikten bırakılan cisimdir. Çekiçteki numuneye temas eden çarpma burnu, sertleştirilmiş çelikten imal edilmiş olup sarkacın sallandığı düzleme dik ve yatay olarak  $0.80 \pm 0.20$  mm'lik bir yarıçapa sahip silindirik bir yüzeydir (ASTM D 4812-06, 2004).

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 (ASTM D 4812-06, 2004)

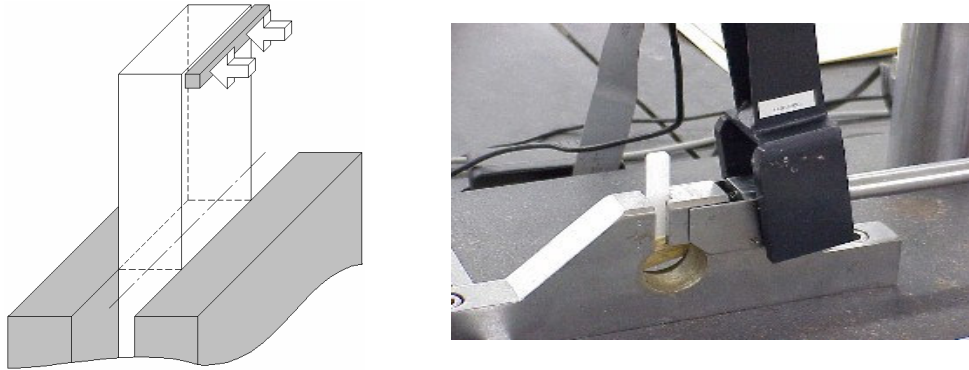
Test numunesi	ASTM (mm)	ISO (mm)
Uzunluk	64	80
Genişlik	12,7	10
Kalınlık	3,2	4

Veriler: ASTM darbe enerjisi J cinsinden okunmaktadır. Darbe dayanımı numuneye uygulanan darbe enerjisinin numunenin kesitine bölünmesiyle hesaplanmaktadır. 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, 2004).

Deneyin yapılışı: Deneyler Ceast firmasının Resil 25 model sarkaç tipi cihazı ile yapılmıştır. İzod tipi test numuneleri ISO 180 standartlarına göre hazırlanmıştır.

Tablo 3.3'te belirtilen ISO standartlarına göre hazırlanmış çentiksiz numuneler için alt sınır 10×2×60 mm'dir. Deneylerde kullanılan çentiksiz numuneler 10×2×65 mm boyutlarına sahiptir. Bu çalışmada malzemelerin belirli bir darbe enerjisine sahip ne kadar darbe sayısı sonrası hasara uğrayacağını tespit etmek için bir çalışma gerçekleştirildi.

Darbe deneyleri sarkaç tipi Ceast Resil 25 test cihazı ile gerçekleştirildi. Test numuneleri ISO 180'e göre hazırlandı. Çalışılacak çekiç açısı ve enerjisini belirlemek için bir ön çalışma yapıldı ve çalışma sonucunda PEI malzeme ile 0,54 J-0,94 J arasında çalışılmasına karar verildi. Numunelerin cihaza yerleştirilme şekli şematik olarak Şekil 3.4'te verilmiştir.



Şekil 3.4: Çentiksiz izod numunesinin sarkaç tipi Ceast Resil 25 test cihazında tekrarlı yüklemeye maruz bırakılması

## 4. DENEY SONUÇLARI

### 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 gereken önemli bir konudur. Literatür araştırmalarına göre PEI matrisli kompozitler de bu konuyla ilgili çok çalışma bulunmamaktadır.

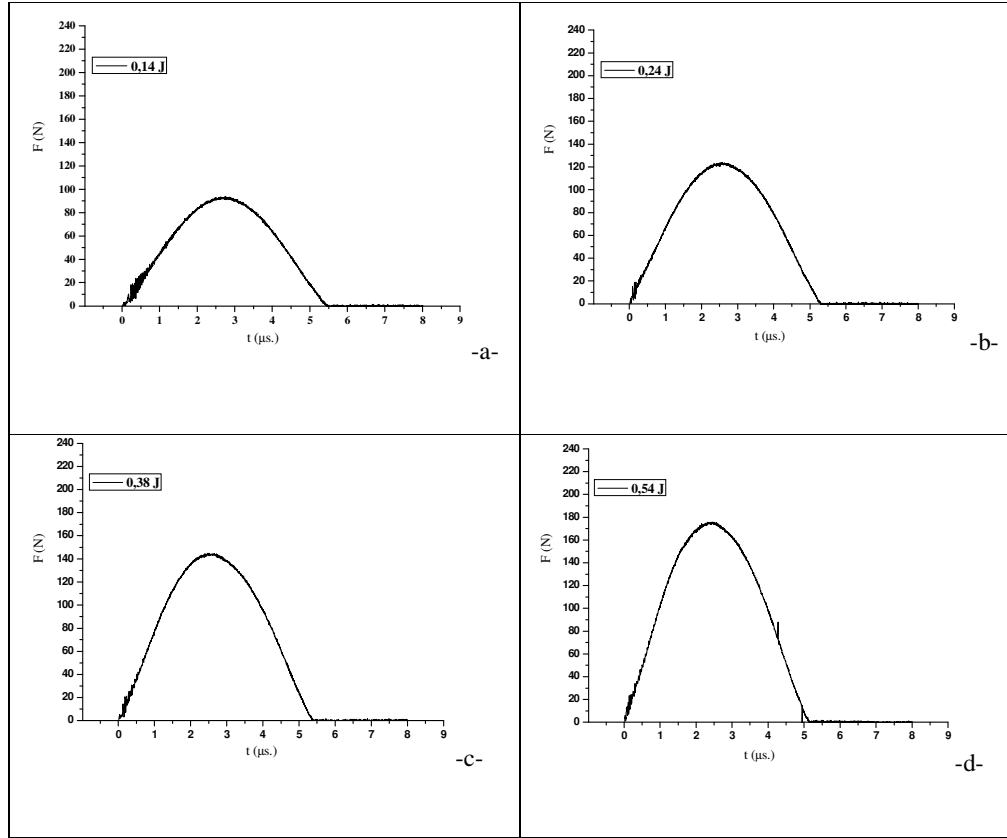
Üretici firmadan temin edilen sürekli karbon fiber takviyeli PEI matrisli kompozit Ceast firmasının enstrumante edilmiş Resil 25 model sarkaç tipi cihazı ile düşük enerjili tekrarlı darbelere maruz bırakılmıştır.

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 kalması el yardımıyla önlenmiştir.

0,54 J değerine kadar olan darbelerde malzeme elastik tepki vermiştir. 0,54 J değerinden sonra uygulanan 0,57 J enerjili darbeye 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 değerinde bir darbe uygulandı ve malzeme tek vuruşta kırıldı (Şekil 4.2-d). Darbe enerjisi 2,01 J değerine düşürüldüğünde de malzeme 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).

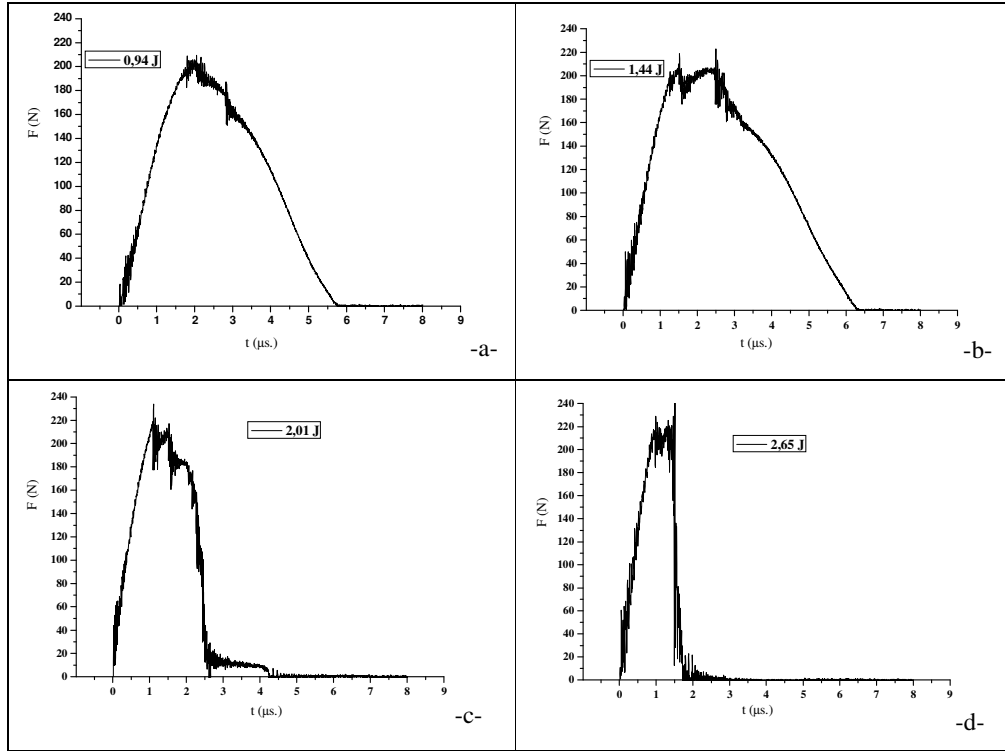
Darbe enerjisi 0,94 J değerine düşürüldü ve 10 adet test uygulandı. Numunelerin hiçbiri kırılmadı ve önemli ölçüde plastik deformasyona uğradıkları görüldü. Bu nedenle üst darbe enerjisi değeri olarak 0,94 J değeri kabul edildi. Sonuç olarak darbe-yorulma çalışma aralığı 0,54 J-0,94 J olarak belirlendi.



Şekil 4.1: Numunelerin tamamen elastik deformasyona uğradığı küçük enerjili darbeler (a-0,14, b-0,24, c-0,38, d-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, 0,94 J). Çekicinin bu darbe enerjilerinde numuneye çarpma hızı sırasıyla; 0,93, 0,96, 0,99, 1,02, 1,05, 1,11, 1,14, 1,17, 1,20 m/sn'dir.

Belirtilen enerjilerdeki darbeler numunelere ard 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 data alma işlemi 8  $\mu s.$ 'dir. Bu sürede toplam 2000 data alınmaktadır.



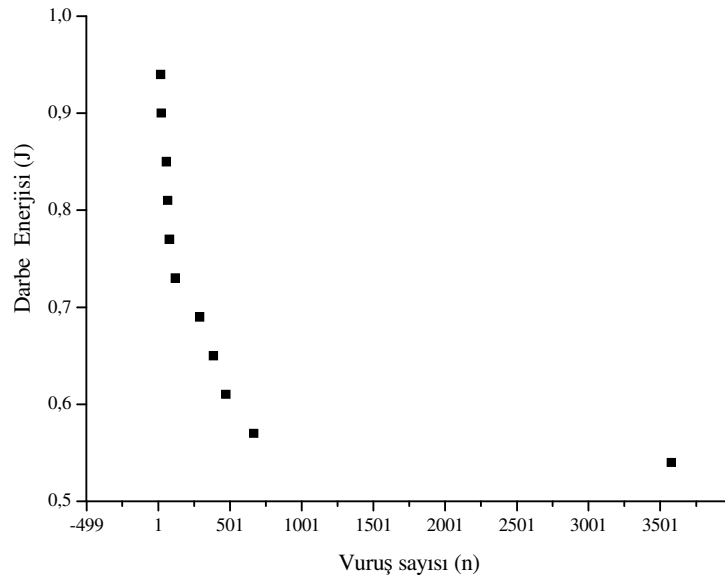
Şekil 4.2: Darbe-Yorulma çalışması için gerçekleştirilen ön çalışma sonuçları (a-0,94 J, b-1,44 J, c-2,01 J, d-2,65 J)

Küçük darbe enerjileri seçildikten sonra yapılan çalışmanın sonuçları grafikler ile açıklanacaktır. 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.: Numuneler için darbe enerjisine bağlı olarak değişen kırılma için gerekli darbe tekrar sayılarının karşılaştırılması

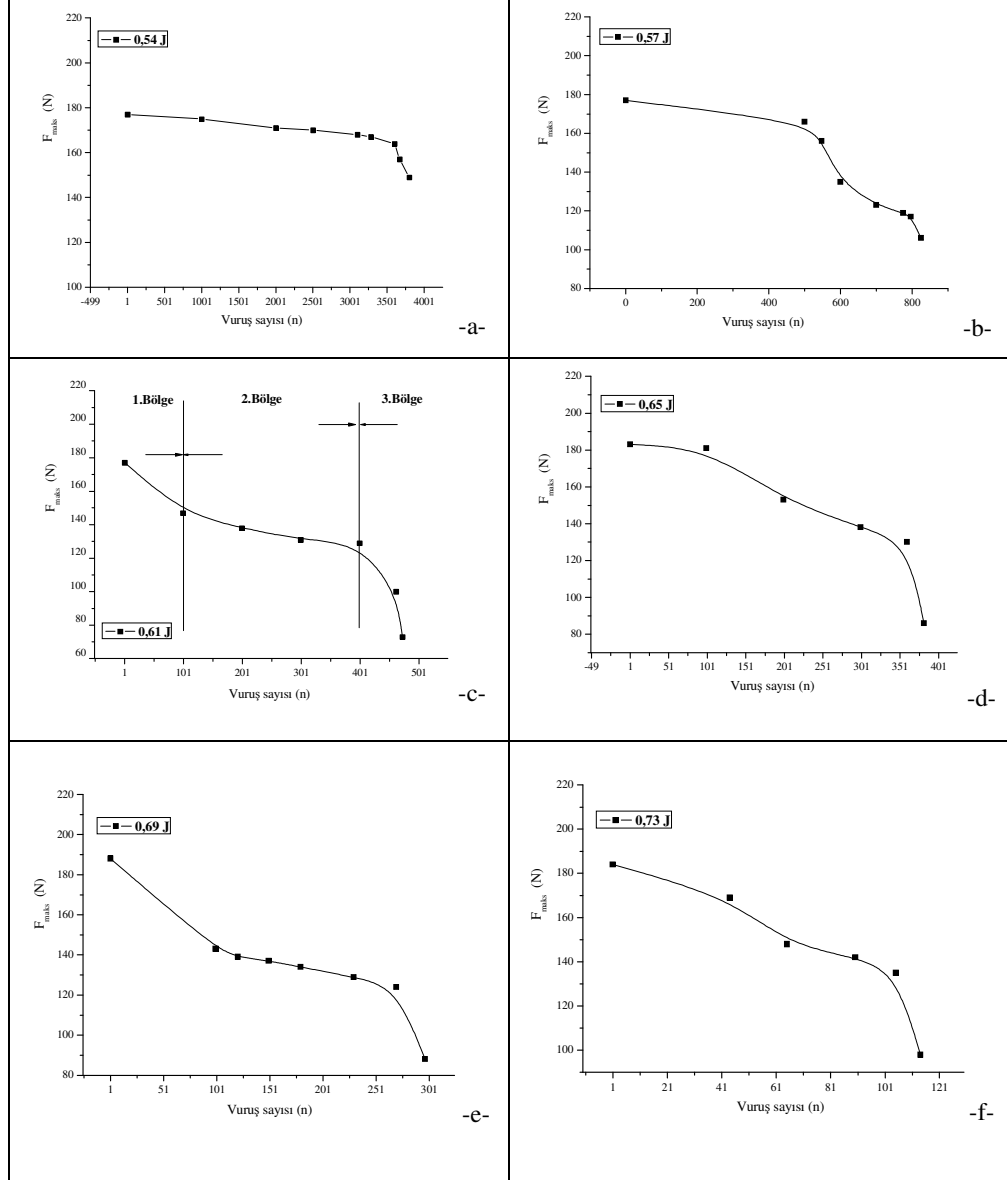
Darbe Enerjisi	Kırılıncaya kadarki Darbe Sayısı	Darbe Enerjisi	Kırılıncaya kadarki Darbe Sayısı
0,54 J	3580	0,77 J	80
0,57 J	829	0,81 J	66
0,61 J	473	0,85 J	59
0,65 J	382	0,89 J	43
0,69 J	208	0,94 J	21
0,73 J	122		



Şekil 4.3: Numunenin darbe-yorulma ömür grafiği

Şekil 4.3’ten görüldüğü üzere tek yönlü sürekli karbon fiber takviyeli PEI matrisli 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 çekicinin teması ile oluşan  $F_{maks}$  değerindeki

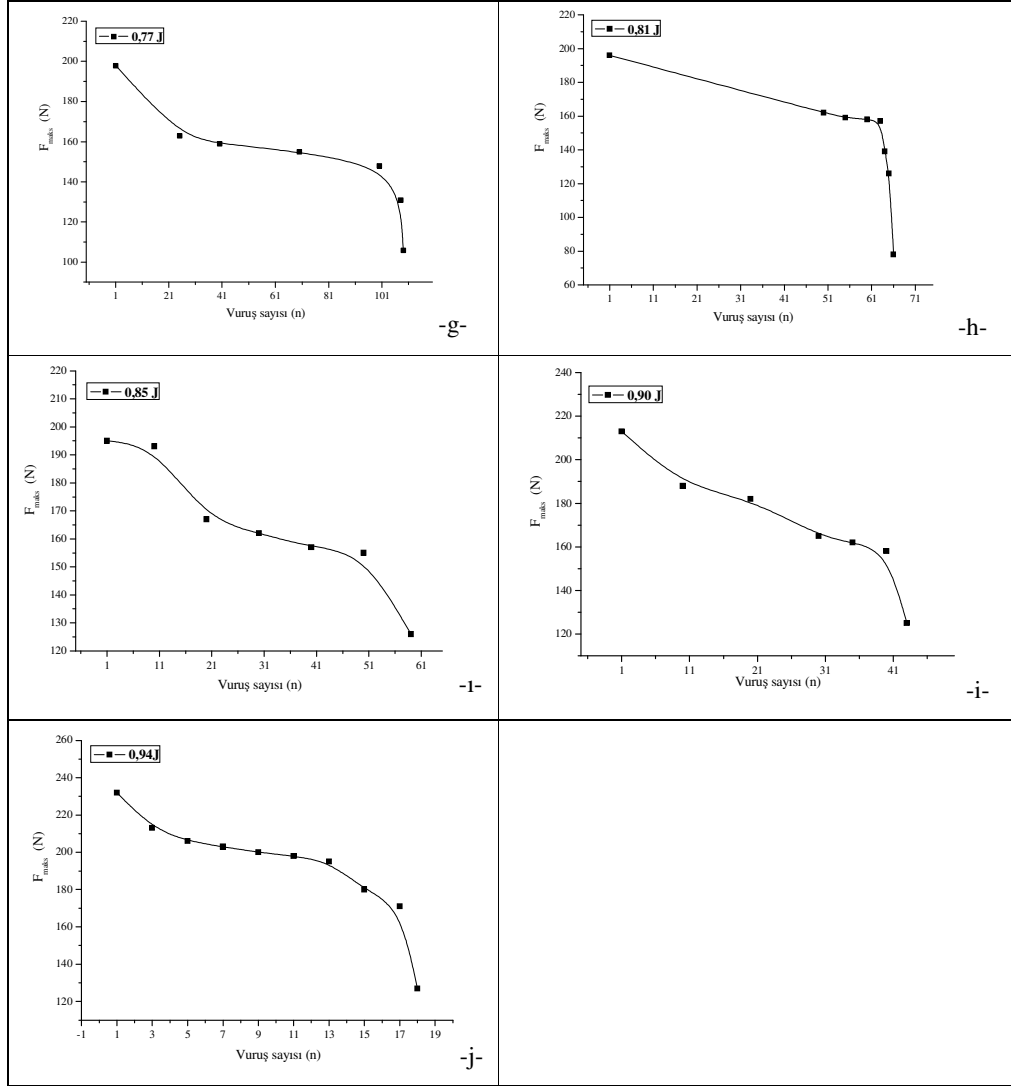
değişimler grafikler yardımıyla Şekil 4.4'te gösterilmiştir. Şekil 4.4'teki grafiklere göre, darbe enerjisinin artmasıyla malzemenin hasara uğraması için gerekli olan darbe tekrar sayısının azaldığı görülmüştür.  $F_{maks}$  değerlerinin artan darbe tekrar sayısı ile giderek azaldığı görülmüştür.



Şekil 4.4: Her bir darbe enerjisi için  $F_{maks}$ -tekrar darbe sayısı grafikleri

Yüksek enerji seviyelerinde beklenildiği gibi ilk vuruşlardan elde edilen  $F_{maks}$  değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir.



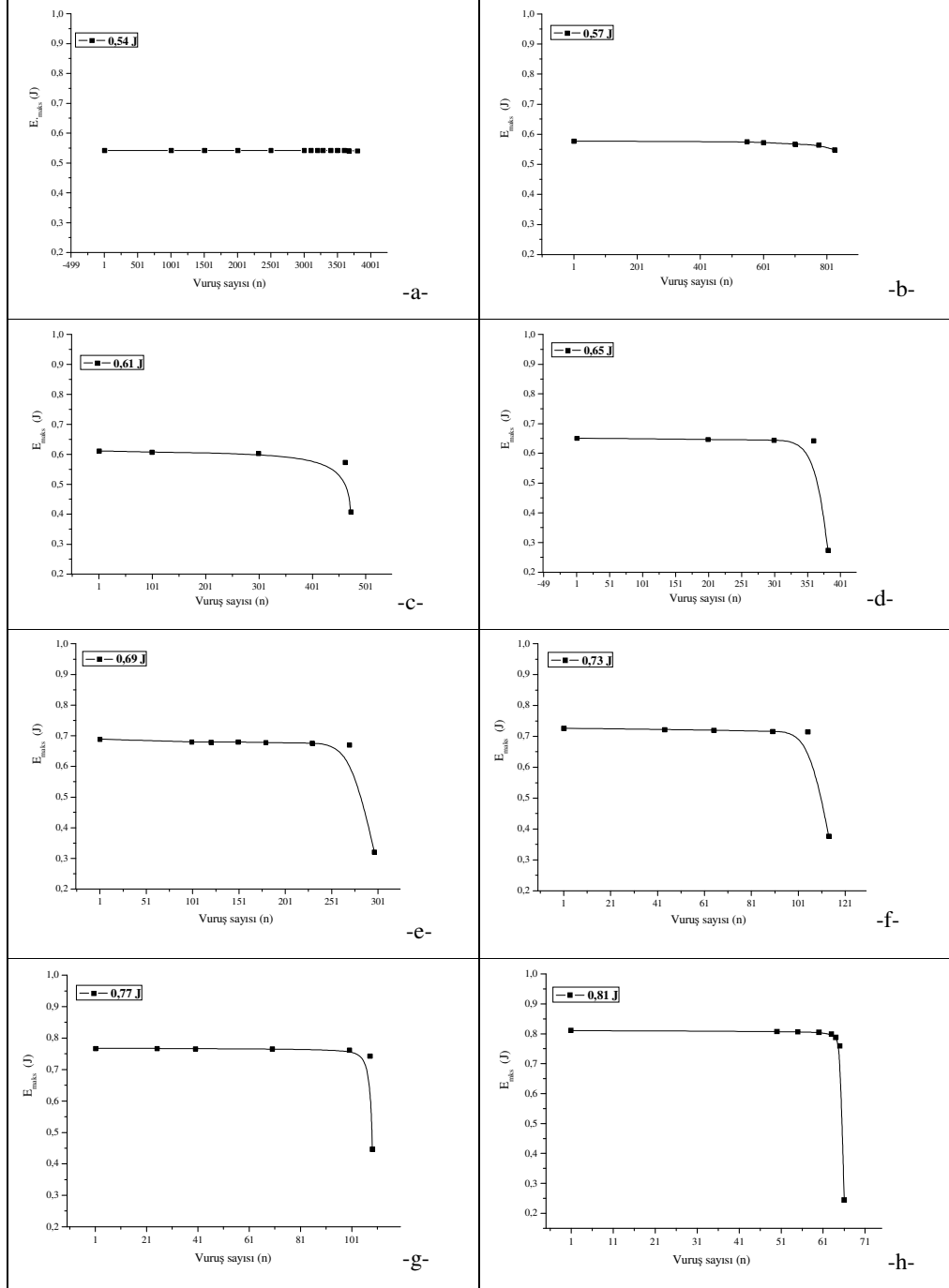


Şekil 4.4: (Devamı) Her bir darbe enerjisi için  $F_{maks}$ -tekrar darbe sayısı grafikleri

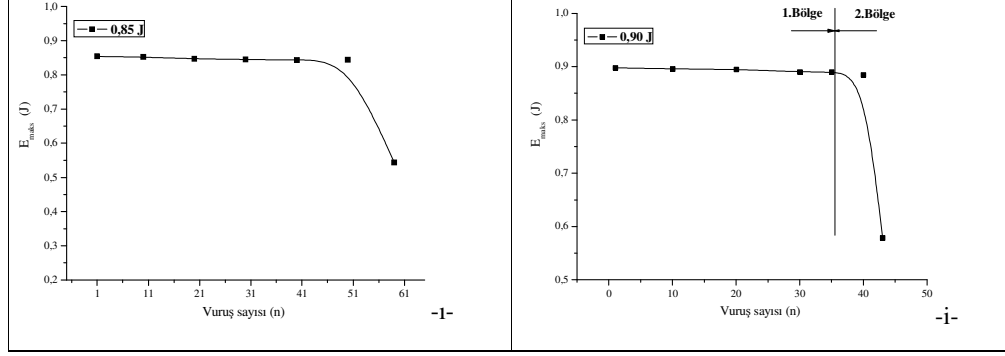
Şekil 4.4'te gösterilen darbe sayısı ile  $F_{maks}$  değerlerinin değişimini gösteren grafiklerde üç ayrı bölge oluştuğu tespit edilmiştir. Birinci bölgenin belirli bir darbe sayısına kadar  $F_{maks}$  değerlerinde hızlı bir düşüşün olduğu ve darbe etkisi ile basma bölgesinde ilk fiber hasarlarının oluştuğu bölgedir.

İkinci bölge “plato” bölgesi olarak adlandırılan ve birinci bölgede tekrarlı darbe yüklemesi nedeniyle oluşan matris çatlaklarının birleşerek ilerlemesi, fiber-matris ara yüzünün soyulması, tabakalar arasında oluşan delaminasyonların büyümesi ve yenilerinin oluşması gerçekleşmektedir.

Üçüncü bölgede ise artan tekrarlı darbe sayısı ile matris-fiber ara yüzeyinde oluşan delaminasyonlar 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



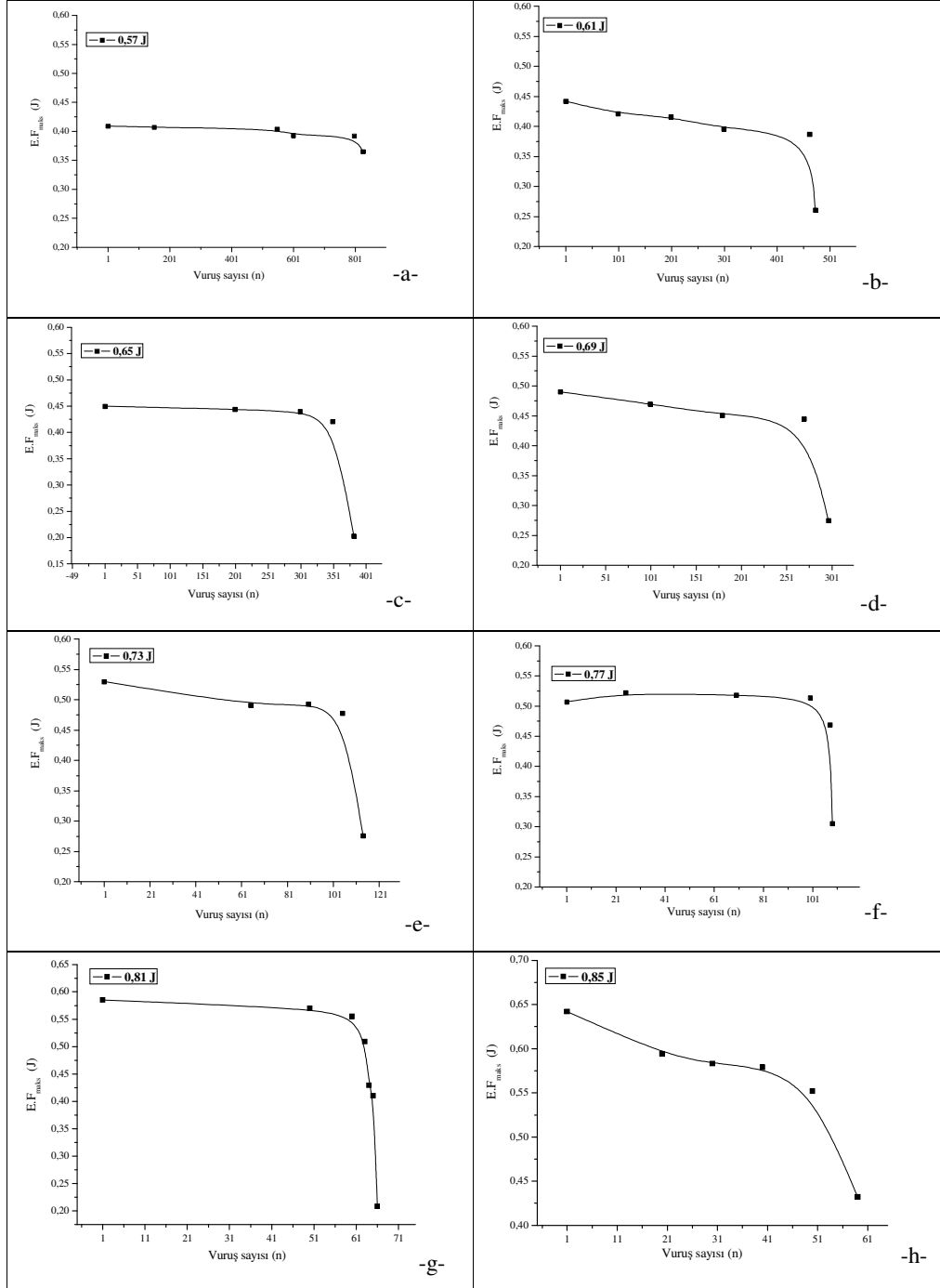
Şekil 4.5: (Devamı) Her bir darbe enerjisi için  $E_{maks}$ -tekrar darbe sayısı grafikleri

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 sayısı ile giderek azalmaktadır. Artan enerji seviyesiyle her bir deney için ilk vuruşlarda elde edilen  $E_{maks}$  değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir.

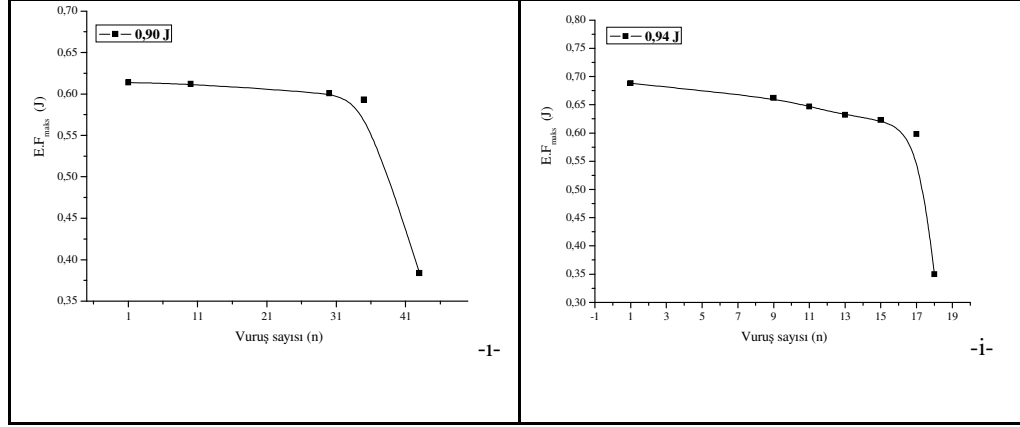
Şekil 4.5'te gösterilen  $E_{maks}$ -tekrarlı darbe sayısı eğrilerinde iki ayrı bölge bulunmuştur. Birinci bölge belirli bir darbe sayısına kadar maksimum absorbe edilen enerji değişimi yaklaşık olarak sabit kalmaktadır. Bunun nedeni olarak,  $F_{maks}$ -tekrar darbe sayısı eğrilerindeki (Şekil 4.4) ilk iki bölgede gerekli olan enerjinin sabit kaldığı gözlemlenmiştir.  $E_{maks}$  değerlerinin ikinci bölgedeki ani düşüşü ile  $F_{maks}$  eğrilerinin üçüncü bölgelerindeki düşüş yaklaşık olarak aynı tekrar sayısında meydana gelmektedir. Buna göre, bu bölgede matris ve delaminasyon 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.



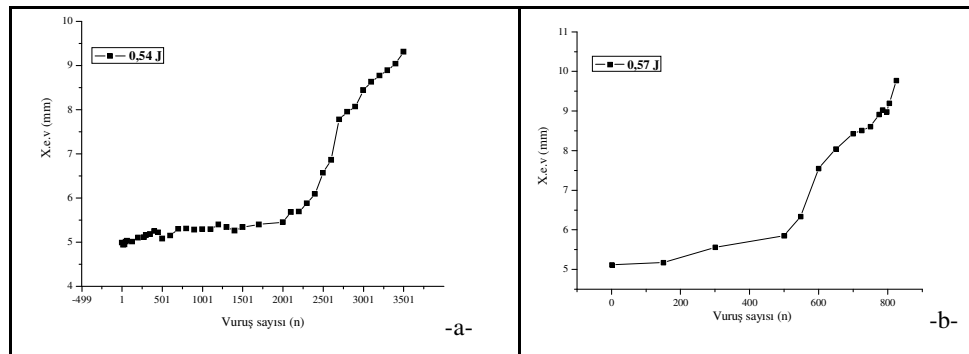
Şekil 4.6: Her bir darbe enerjisi için  $E.F_{maks}$ -tekrar darbe sayısı grafikleri



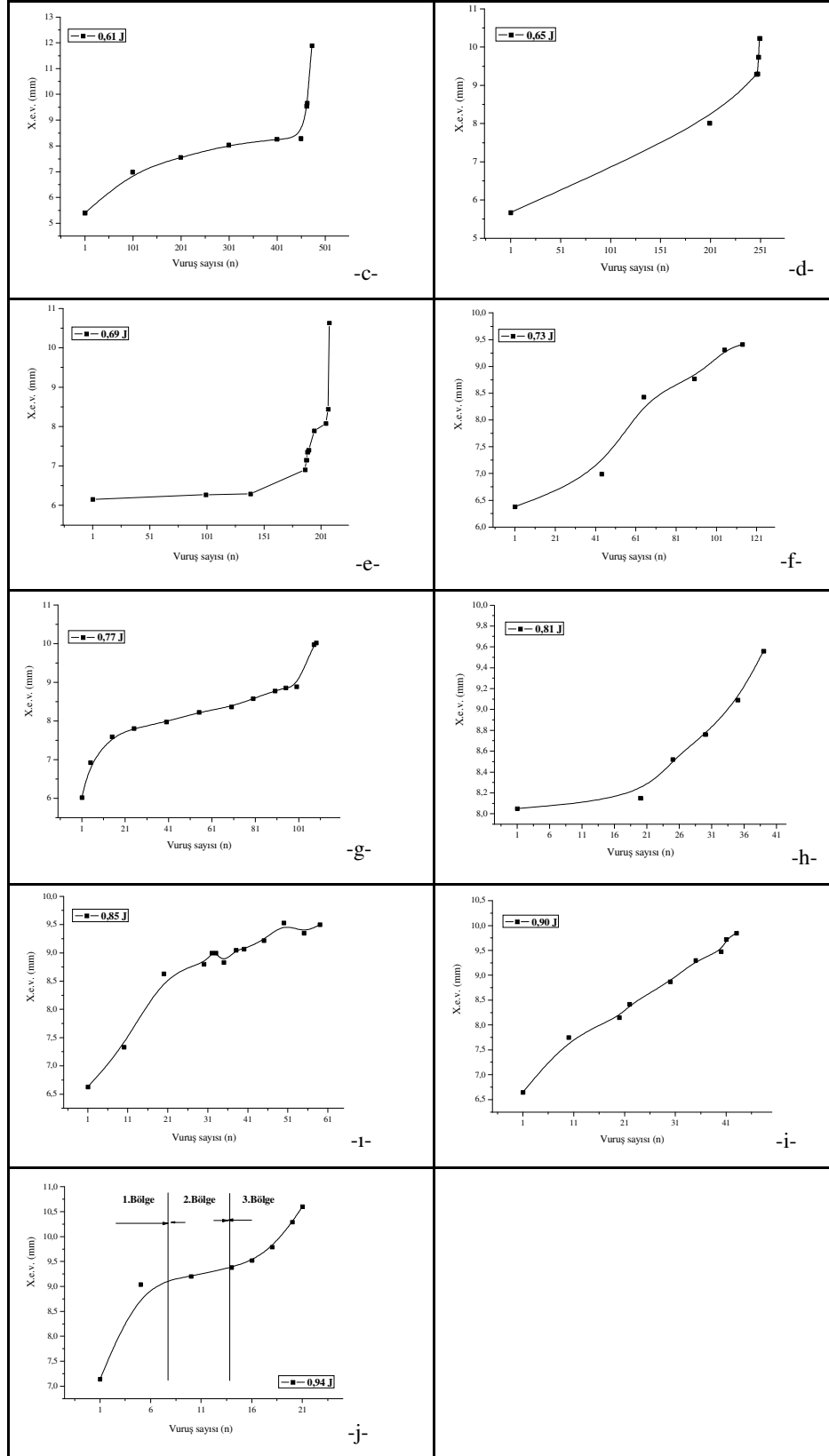
Şekil 4.6: (Devamı) Her bir darbe enerjisi için E.F<sub>maks</sub>-tekrar darbe sayısı grafikleri

Şekil 4.7’de her bir darbe enerjisi için X.e.v-tekrar darbe sayısı grafikleri çizilmiştir. Grafiklerden F<sub>maks</sub>-tekrar darbe sayısı grafiklerinde olduğu gibi üç ayrı bölgenin olduğu gözlemlenmiştir.

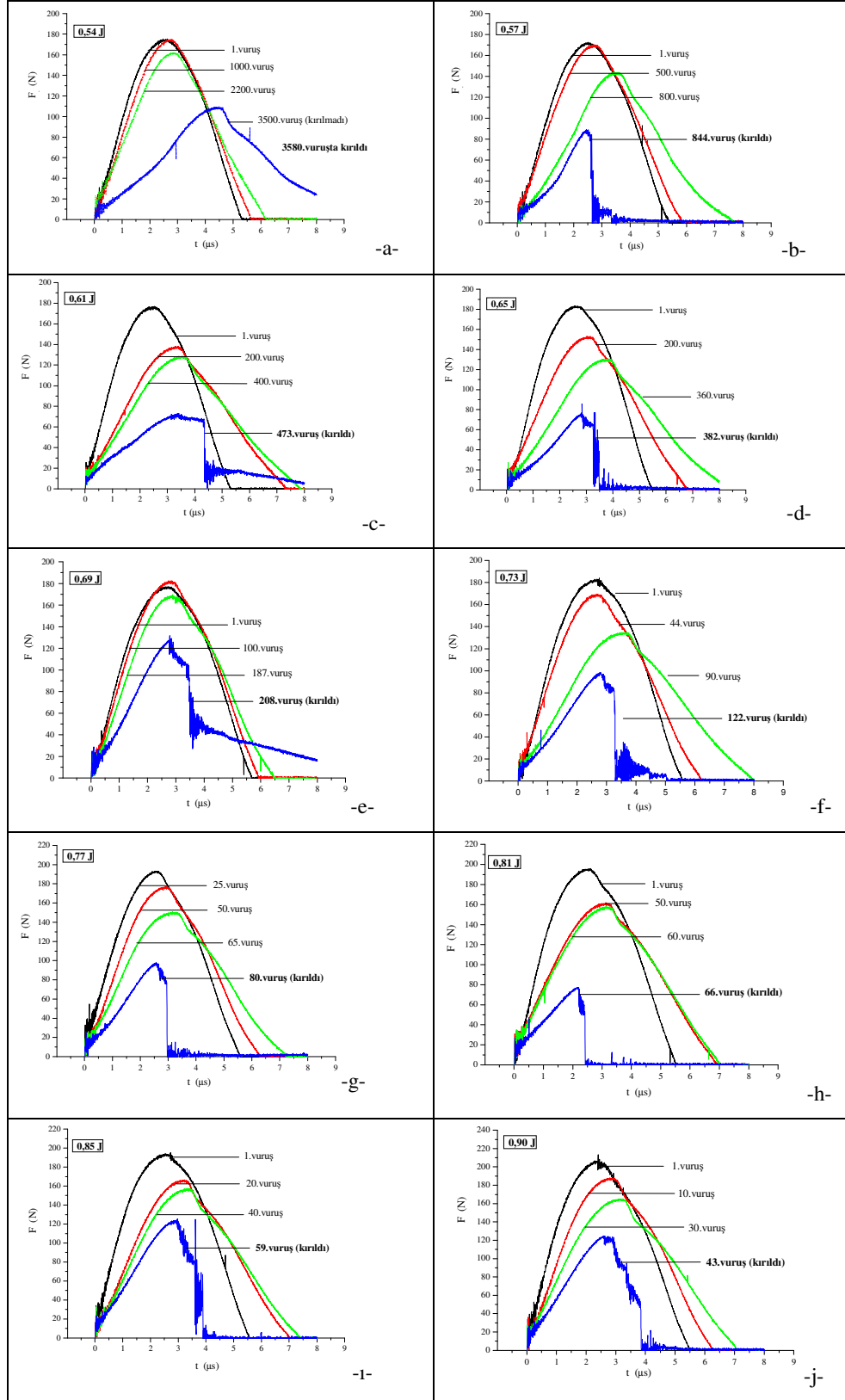
Birinci bölge için fiberlerde basma nedenli burkulma ve kayma hasarları olduğu bölge olarak açıklanmıştır. Düşük enerji ile yapılan darbelerde deformasyonlar yavaş olurken yüksek enerji ile yapılan darbelerde hızlı (az tekrar sayısında) olduğu görülmüştür. İkinci bölge ise “plato” olarak nitelendirilmiştir.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



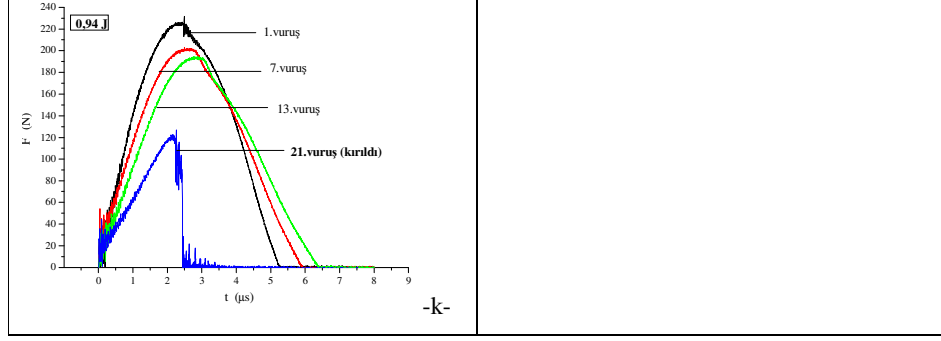
Şekil 4.7: Her bir darbe enerjisi için X.e.v.-tekrar darbe sayısı grafikleri



Şekil 4.7: (Devamı) Her bir darbe enerjisi için X.e.v-tekdar 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 F-t grafikleri aynı skalada çizilmiştir. Artan darbe tekrar sayısı ile ilk vuruşlardaki deformasyon sürelerine göre son vuruşlardaki data süresi yaklaşık olarak yarı yarıya azalmıştır.

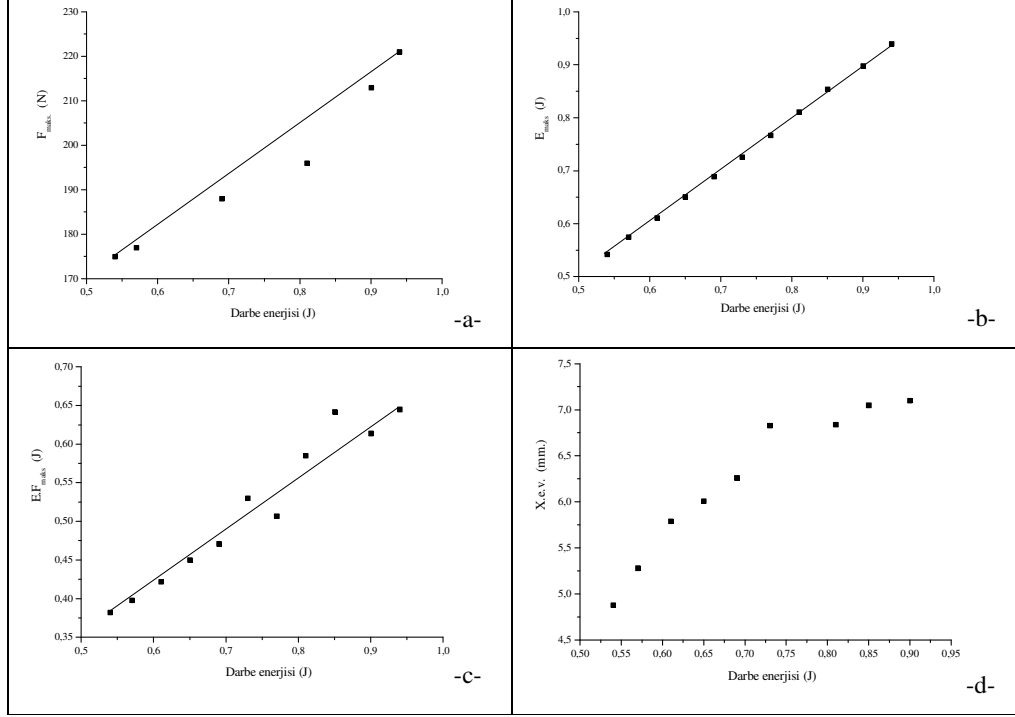
Her bir darbe enerjisi seviyesinde artan tekrar sayısı ile eğrilerde oluşan darbe modülü değerlerinde azalma meydana gelmiştir. Örneğin Şekil 4.8 b ve j karşılaştırılırsa numuneye uygulanan darbe enerjisi arttırıldığında numunede oluşan deformasyon miktarı artmıştır.

Grafiklerdeki ilk vuruşlar incelendiğinde numunede darbe enerjisinin artmasıyla plastik bölge oluşmuştur. Buda numunenin yüksek darbe enerjisinde daha az tekrar sayısında kırıldığını açıklamaktadır.

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.

$F_{maks}$ ,  $E_{maks}$ ,  $E.F_{maks}$ ,  $X.e.v$  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: Yorulma deneylerindeki ilk vuruşlarda alınan verilerin toplu olarak gösterimi

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 yaklaşık olarak doğrusal 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.

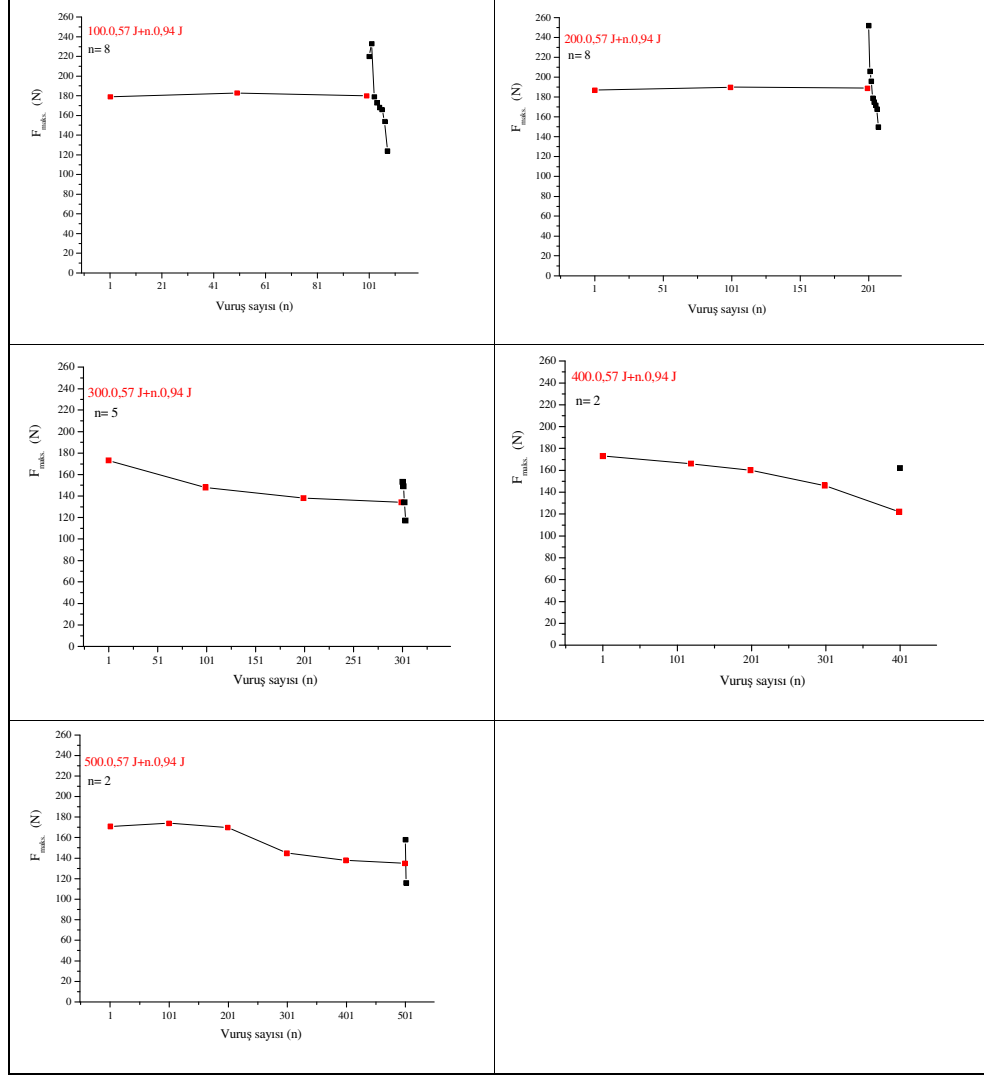
## **4.2 Farklı Enerji Seviyelerinde Tekrarlı Darbelere Maruz Kalan Numunelerin Darbe Davranışlarının İncelenmesi**

Karbon fiber takviyeli PEI matrisli kompozit malzeme iki farklı düşük enerjili tekrarlı darbelere maruz bırakılmıştır. Çalışacağımız darbe enerjileri aralığını seçmek için Bölüm 4.1’de yapılan deneyler esas alınarak iki farklı darbe enerjisi seçilmiştir. Deneylerde 11 ayrı darbe enerjisi seçilmiştir. Malzeme içerisindeki deformasyon ve kırılma davranışları arasındaki farklılıkları iyi ayırt edebilmek için darbe enerjilerinin birbirine çok yakın olmaması sağlanmıştır. Birinci grubumuz [100÷500].0,57 J + [n.0,94 J; n.0,85 J; n.0,77 J]’dur. Bu deney üç alt başlığa ayrılmaktadır. Kompozit malzeme ilk önce 100 ile 500 arasında 0,57 J değerindeki darbelere maruz bırakılmıştır. Her deney grubunda 5 farklı numune kullanılmıştır. 0,57 J değerindeki darbelerden sonra ise daha yüksek üç farklı darbe enerji seviyelerinde kırılıncaya kadar “n” adet darbe uygulanıp malzemenin darbe-yorulma özellikleri incelenmiştir. İkinci grup deneyde ise birinci grupta yapılan işlemin tersi gerçekleştirilmiştir. İlk gruptan farklı olarak bu grupta iki farklı darbe enerjisi kullanılmıştır. Bu grupta kompozit malzeme ilk önce 1 ile 5 arasında 0,94 J değerindeki darbelere maruz bırakılmıştır. Önce yüksek darbe enerjisiyle malzeme tekrarlı darbeye maruz bırakıldıktan sonra, daha düşük darbe enerjisiyle malzeme hasara uğratılmıştır. 5 farklı deney gerçekleştirilmiş olup, her bir deneyde numuneye 0,94 J değerindeki enerjiden bir adet fazla darbe uygulanmıştır. Daha sonra ise numuneye 0,57 J değerindeki darbe enerjisiyle kırılıncaya kadar “n” adet darbe uygulanmıştır.

### **4.2.1. Düşük Enerjili Tekrarlı Darbeleri Takip Eden Yüksek Enerjili Darbeler İle Yapılan Deneyler**

#### **4.2.1.1. [100÷500].0,57 J + n.0,94 J kodlu darbe-yorulma deney sonuçları**

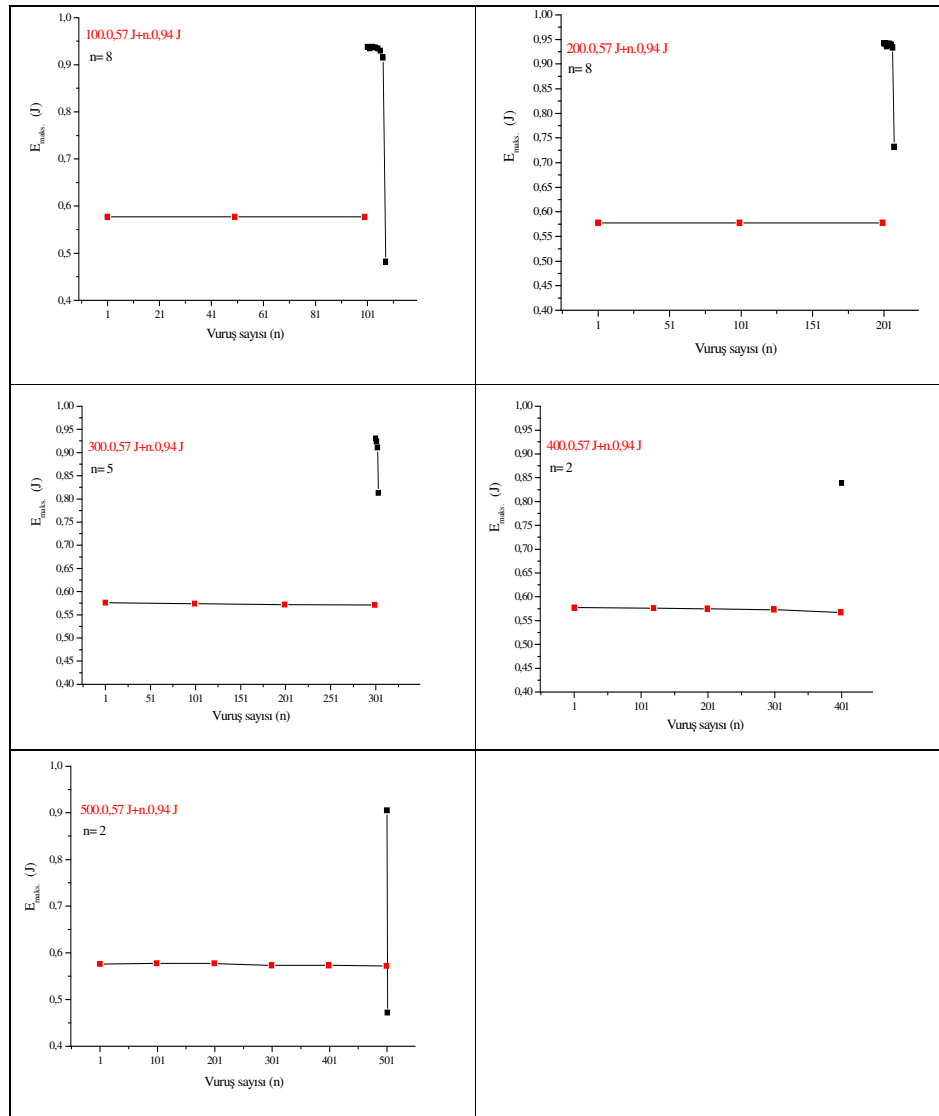
Belirli sayıda düşük enerjili darbeler uygulandıktan sonra daha yüksek darbe enerjisiyle numuneyi kırana kadar yapılan deney gruplarının ilki [100÷500].0,57 J + n.0,94 J’dür. Bu grupta elde edilen sonuçlar  $F_{maks}$ ,  $E_{maks}$ ,  $E.F_{maks}$ ,  $X.e.v.$ ’nin değişimleri cinsinden ayrı ayrı incelenmiştir.



Şekil 4.10:  $[100\div 500].0,57 J + n.0,94 J$  darbe enerjileri arasında yapılan darbeleri-yorulma için  $F_{maks}$ -tekrar vuruş sayısı grafikleri

Şekil 4.10 ve onu takip eden şekillerdeki grafiklerde kırmızı çizgiler  $[100\div 500].0,57 J$  değerini simgelerken, siyah çizgiler  $n.0,94 J$  değerini simgelemektedir. Şekil 4.10'da görüldüğü gibi  $0,57 J$  değerindeki darbelerin numuneye uygulanmasının ardından numuneyi kırarak olan  $0,94 J$  değerindeki darbelerin sayısı azalmaktadır. Bölüm 4.1'de bahsedildiği gibi  $0,57 J$  büyüklüğündeki tekrarlı darbeler sonucu numune 829 tekrar sayısından sonra hasara uğramıştır.  $0,57 J$  değerindeki darbelerin her deneyde 100 darbe sayısı kadar artması numuneyi daha fazla hasara uğratmaktadır. Bu nedenle  $0,57 J$  değerinden sonra numuneye uyguladığımız  $0,94 J$  değerindeki darbe enerjisinin vuruş sayısı düşmektedir. Şekil 4.10'da gösterilen diğer

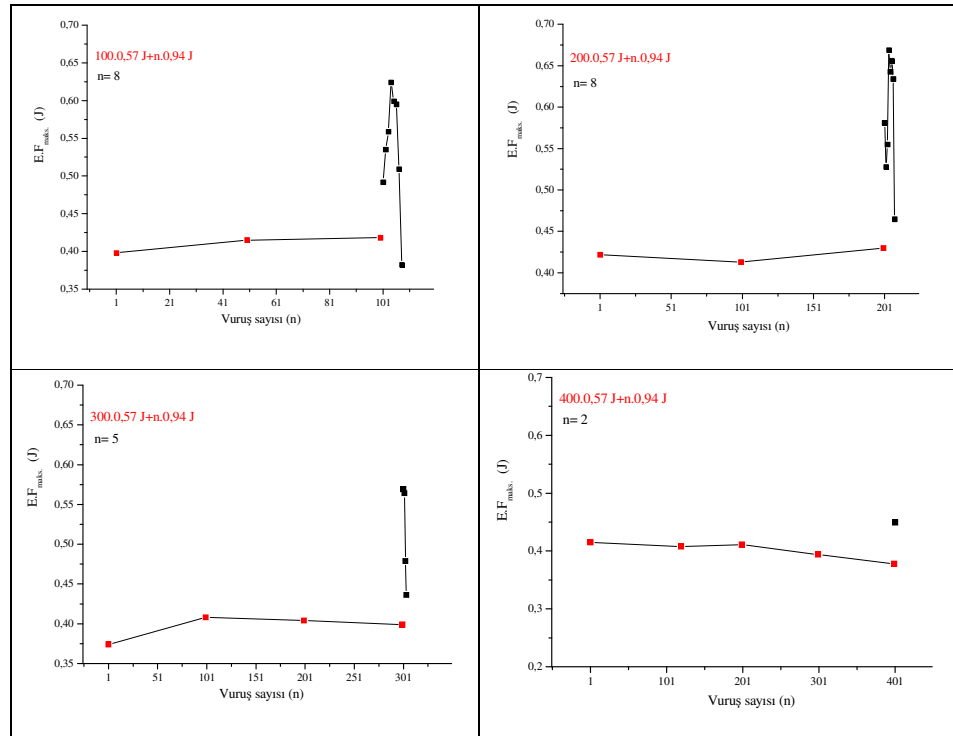
önemli husus ise, 0,57 J değerindeki darbelerden sonra vurulan ilk 0,94 J değerindeki darbenin  $F_{maks}$  değeri bir önceki darbenin  $F_{maks}$  değerinden daha yüksek çıkmaktadır. Normalde de 0,94 J değerindeki darbeye elde edilen  $F_{maks}$  değerleri 0,57 J değerindeki darbe enerjisinininkine göre daha yüksektir. Numune artan 0,57 J değerindeki darbelerle yeterli seviyede iç hasarlara sahip olduktan sonra 0,94 J değerindeki darbe ile çok daha kolay hasara uğramıştır. Orijinal numunelere uygulanan 0,94 J değerindeki darbenin  $F_{maks}$  değeri yaklaşık olarak 240 N iken bu değer yukarıdaki grafiklerden de görüldüğü gibi giderek azalmaktadır.



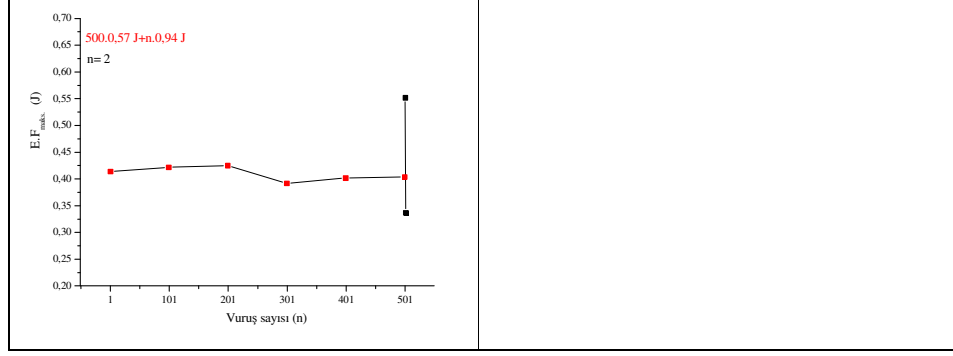
Şekil 4.11:  $[100\div 500].0,57 J + n.0,94 J$  darbe enerjileri arasında yapılan darbeleri-yorulma için  $F_{maks}$  tekrar vuruş sayısı grafikleri

Beklenildiği gibi 0,57 J değerindeki darbelerden sonra numuneye uygulanan ilk 0,94 J değerindeki darbenin  $E_{maks}$  değeri 0,57 J değerindeki darbeye göre ani bir şekilde artmaktadır. Sabit enerjili darbe-yorulma deneylerinde  $E_{maks}$  değişimi nasılsa burada da 0,57 J değerindeki darbeler için ilk bölgedeki değerler aynıdır. 0,57 J değerindeki darbenin etkin olduğu bu birinci bölgedeki  $E_{maks}$  değişimi ilk iki grafikte görüldüğü gibi yaklaşık olarak aynı kalmaktadır. Numuneye uygulanan 0.57 J değerindeki darbenin sayısı arttıkça  $E_{maks}$  değerlerinde de düşüş gözlenmiştir. Bu düşüşün nedeni Bölüm 4.1’de belirtildiği gibi 0.57 J değerindeki darbe ile numuneyi kırmak için gerekli olan tekrar sayısına yaklaşılmıştır.

Şekil 4.11’de düşük enerjili darbelerden sonra uygulanan yüksek enerjili darbeler esnasında  $E_{maks}$  değerlerindeki değişim görülmektedir.  $E_{maks}$  değerindeki bu ani artışla malzemenin enerji absorpsiyonu artmış, bu sayede numune daha az vuruş sayısı ile hasara uğramıştır.



Şekil 4.12: [100÷500].0,57 J + n.0,94 J darbe enerjileri arasında yapılan darbeleri-yorulma için  $E.F_{maks}$ -tekrar vuruş sayısı grafikleri

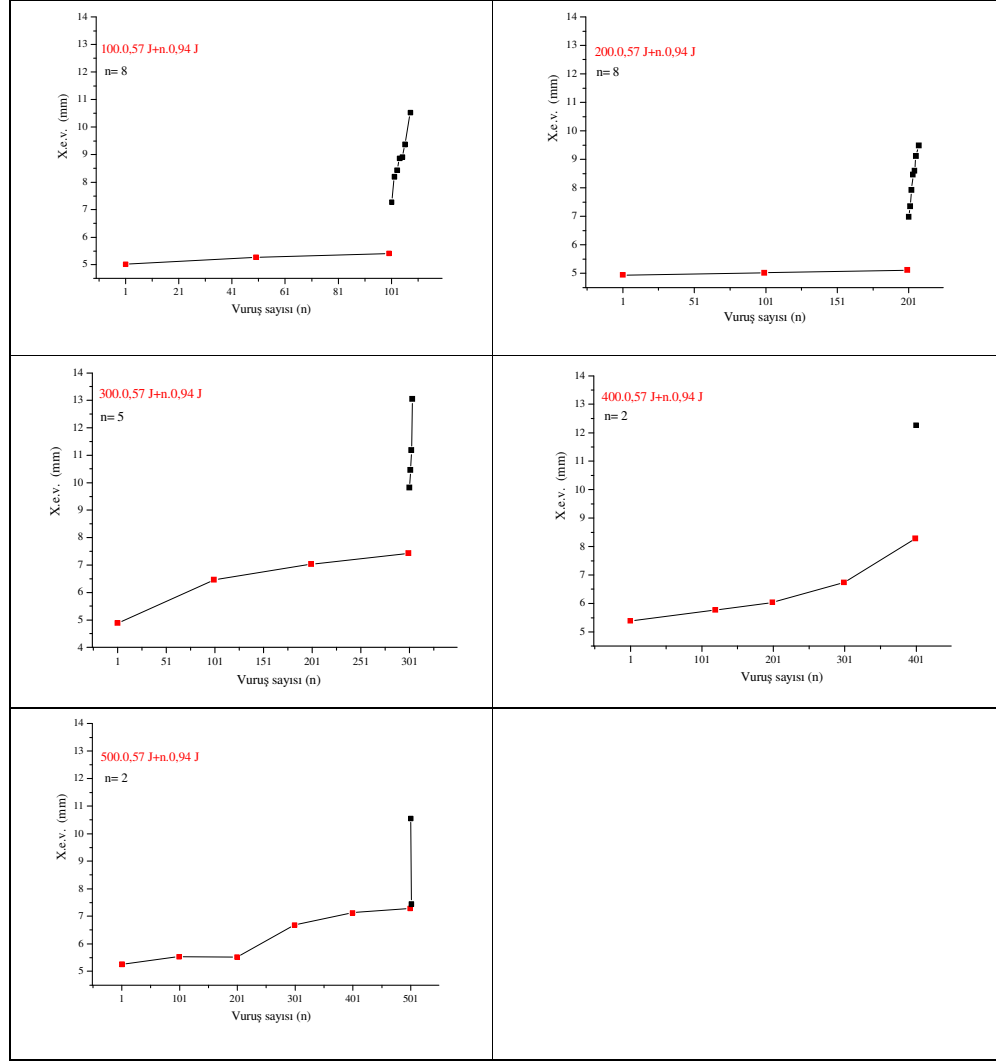


Şekil 4.12: (Devamı) [100÷500].0,57 J + n.0,94 J darbe enerjileri arasında yapılan darbelyorulma için E.Fmaks-tekrar vuruş sayısı grafikleri

Şekil 4.12'deki [100÷500].0,57 J + n.0,94 J darbe enerjisiyle yapılan darbelyorulma için E<sub>maks</sub> değerlerinin yaklaşık olarak yarısı büyüklüğünde E.F<sub>maks</sub> değerlerinin elde edildiği bulunmuştur. F<sub>maks</sub> ve E<sub>maks</sub> verilerindeki değişim, E.F<sub>maks</sub>-vuruş sayısı grafiklerinin dağılımını değiştirmektedir. Daha öncede belirttiğimiz gibi 0,57 J değerindeki darbe enerjisinin E.F<sub>maks</sub> dağılımı E<sub>maks</sub> ve F<sub>maks</sub> grafiklerindeki gibi düzgün bir şekilde değişirken, 0,94 J değerindeki darbe enerjisinin numuneye uygulanmasıyla E.F<sub>maks</sub> değerleri birden artmış ve grafiklerdeki eğrinin düzgün değişimini değiştirmiştir. Her bir enerjinin kendi içindeki grafikteki değişimi düzgün olarak azalmaktadır.

Şekil 4.13'teki X.e.v.-vuruş sayısı grafiklerini incelersek, artan 0,57 J değerindeki darbe sayısı ile kırmızı kareli çizginin eğimi artmış ve numunenin hasara uğraması için gereken deformasyon miktarına yaklaşmıştır. Numunenin hasara uğraması için gereken deformasyon miktarına yaklaşılmasıyla 0,57 J değerindeki darbelerden sonra uygulanacak olan 0,94 J değerindeki darbeler esnasında numunenin kırılması için gereken deformasyon aralığı azalmıştır. Yani daha az vuruş sayısı ile malzemeyi kırarak olan deformasyon miktarına ulaşabilecektir. Bu yüzden artan 0,57 J değerindeki darbe sayısı sonrası daha az 0,94 J değerindeki darbe numuneyi kırmaya yetmektedir. 0,94 J değerindeki darbelerin numuneye uygulanmasıyla yaklaşık olarak düzgün artan X.e.v. miktarı birden ivme kazanmıştır. 0,57 J değerindeki darbe enerjisi nedeniyle malzemenin içersinde oluşan hasarlar 0,94 J değerindeki darbelerle büyüyerek malzemenin hasara uğramasına neden olmuştur. Normalde 0,94 J

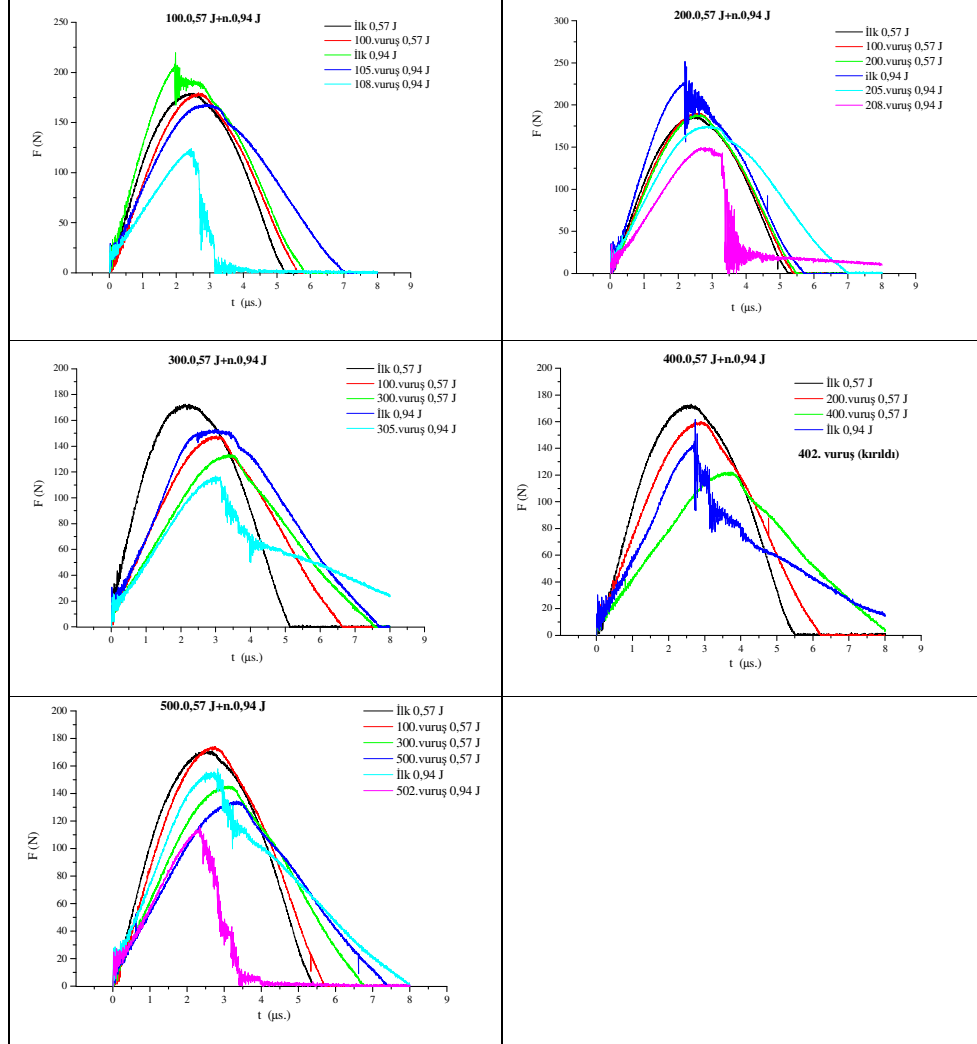
değeriyle 21 vuruşta hasara uğrayan numune bu deneylerde artan 0,57 J değerindeki darbeler sonrası iki vuruşa kadar düşmüştür.



Şekil 4.13: [100÷500].0,57 J + n.0,94 J darbe enerjileri arasında yapılan darbeleri-yorulma için X.e.v.-tekrar vuruş sayısı grafikleri

Şekil 4.14'te [100÷500].0,57 J + n.0,94 J darbe enerjisiyle yapılan darbeleri-yorulma için çizilen üst üste eğriler gösterilmektedir. Şekillerden de görüldüğü gibi ilk iki grafikte 0,57 J değerindeki enerjinin vuruş sayısının az olması nedeniyle malzemeyi hasara uğratmak için gereken 0,94 J değerindeki darbe sayısı daha fazladır. Ayrıca 0,57 J değerinden sonraki ilk 0,94 J değerindeki darbelerin  $F_{maks}$  değerleri daha fazladır. İlk iki deneyde 0,57 J değerindeki darbeler esnasında F-t eğrilerinin

simetrikliklerinde ciddi deformasyonlar olmamıştır. Diğer deneylerde ise artan 0,57 J ile numunenin F-t grafiğinin simetriği bozulmuş ve malzemede plastik deformasyonlar oluşmuştur. Numunenin içinde oluşan hasarlar nedeniyle, uygulanan yüksek darbe enerjisiyle malzeme daha az tekrarlı vuruş sayısıyla kırılmıştır.



Şekil 4.14: [100÷500].0,57 J + n.0,94 J darbe enerjisiyle yapılan darbeleri-yorulma için çizilen üst üste eğriler

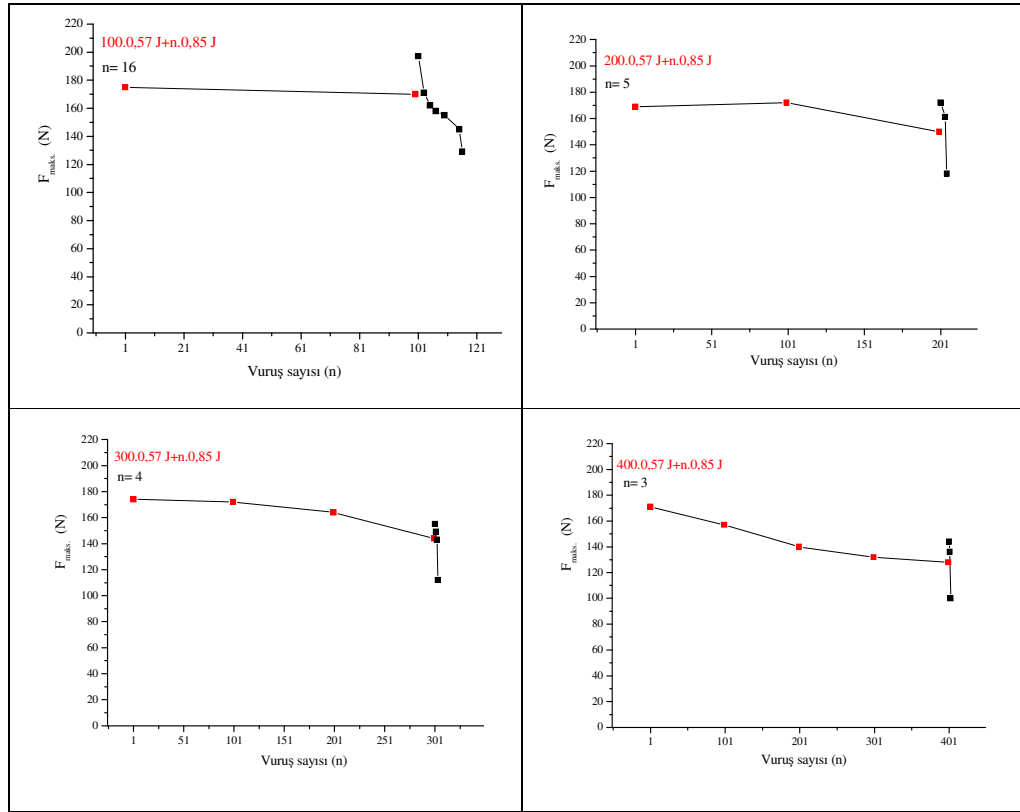
#### 4.2.1.2. [100÷500].0,57 J + n.0,85 J kodlu darbe-yorulma deney sonuçları

Belirli sayıda düşük enerjili darbe uygulandıktan sonradaha yüksek darbe enerjisiyle numuneyi kırana kadar yapılan deneylerin ikincisi [100÷500].0,57 J+n.0,85 J'dür. Bu



grupta elde edilen sonuçlar  $F_{maks}$ ,  $E_{maks}$ ,  $E.F_{maks}$ , X.e.v. cinsinden ifade edilmiştir. Şekil 4.15 ve sonraki şekillerdeki grafiklerde kırmızı çizgiler  $[100\div 500]. 0,57 J$  değerini simgelerken, siyah çizgiler  $n.0,85 J$  değerini simgelemektedir.

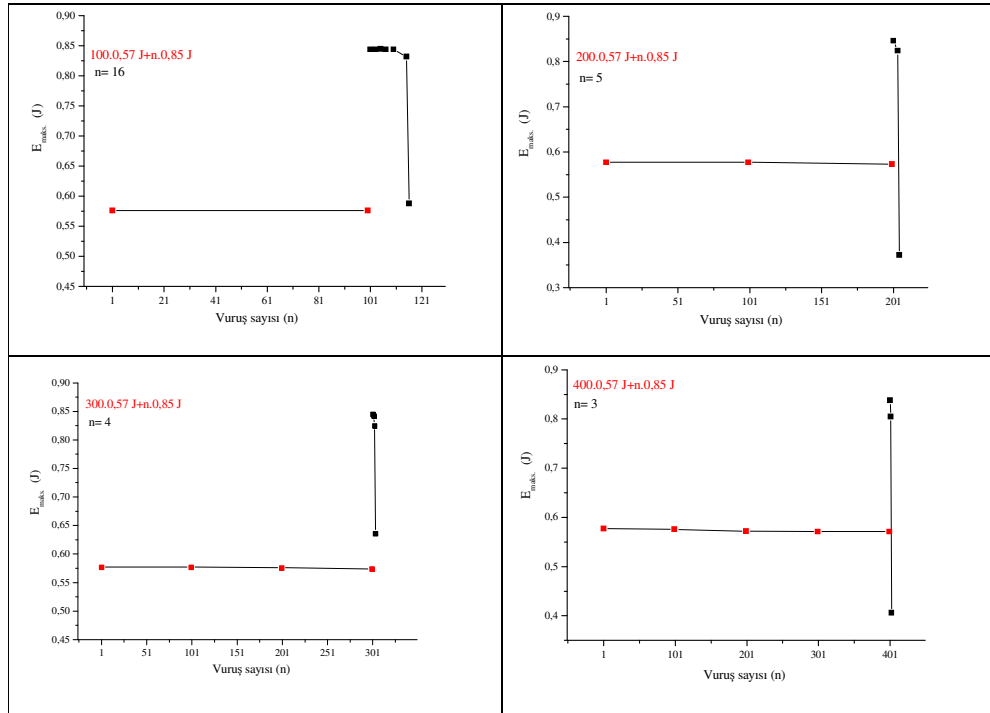
Bu grupta elde edilen deney sonuçları Bölüm 4.2.1.1’de anlatılan deney sonuçları ile yaklaşık olarak aynı çıktığı, numunenin hasara uğraması için gerekli olan “n” tekrarlı vuruş sayısının bu grupta biraz daha yüksek çıktığı gözlemlenmiştir. Bunun temel nedeni  $0,94 J$  ile  $0,85 J$  değerleri birbirine yakın iki değer olmasıdır.



Şekil 4.15:  $[100\div 500].0,57 J + n.0,85 J$  darbe enerjileri arasında yapılan darbeleri-yorulma için  $F_{maks}$ -tekrar vuruş sayısı grafikleri

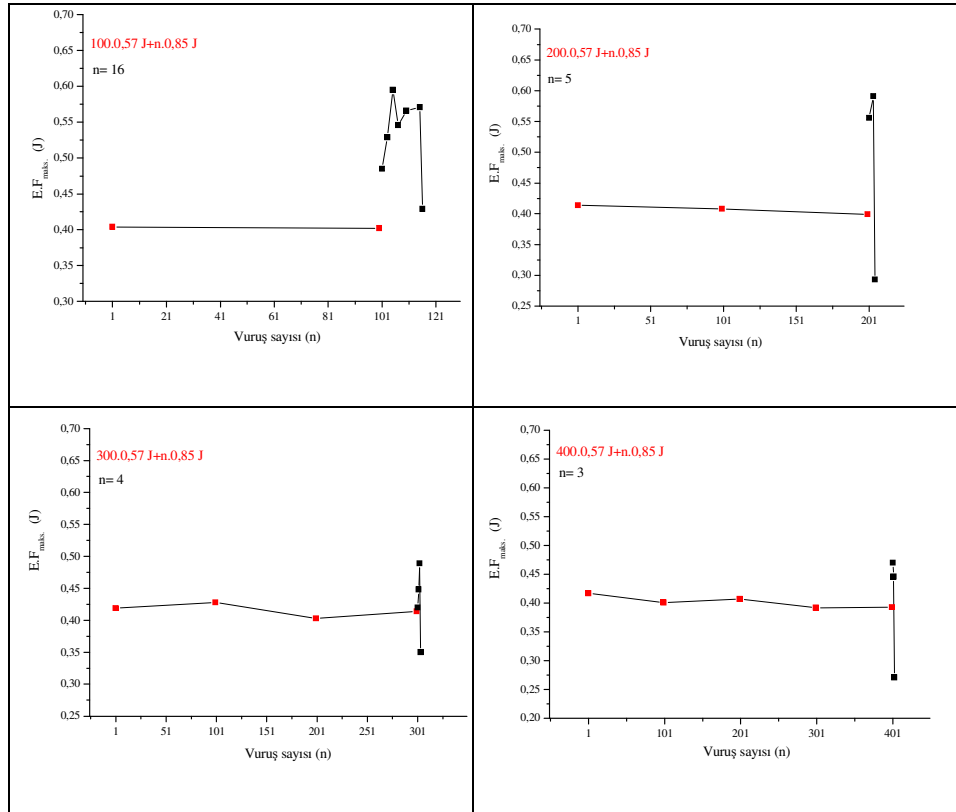
Şekil 4.15’ten görüldüğü gibi  $0,57 J$  değerindeki darbe enerjisinin numuneye uygulandığı darbe sayısı arttıkça numuneyi kırarak olan  $0,85 J$  değerindeki darbe sayısı giderek azalmaktadır. Bunun nedeni Bölüm 4.1’de belirtildiği gibi  $0,57 J$  değerindeki darbelerde numunenin 829 tekrar sayısından sonra hasara uğramasıdır.  $0,57 J$  değerindeki darbelerin her grupta 100 darbe sayısı kadar artması ile numuneyi

daha fazla hasara uğratmaktadır. Doğal olarak ta 0,57 J değerinden sonra numuneye uygulanan 0,85 J değerli darbe vuruş sayısı giderek düşmektedir. Önceki grupta olduğu gibi, 0,57 J değerinden sonra vurulan ilk 0,85 J değerindeki darbenin  $F_{maks}$  değeri en son vurulan 0,57 J değerindeki darbenin  $F_{maks}$  değerinden daha yüksektir. Normalde de 0,85 J değerli darbenin  $F_{maks}$  değerleri 0,57 J değerindeki darbe enerjisinininkine göre daha yüksekti. Numune artan 0,57 J değerindeki darbelerle belirli seviyede iç hasarlara sahip olduktan sonra 0,85 J değerindeki enerjiyle bu hasarlar hızla ilerlemiştir. Ayrıca ilk iki deneyde uygulanan 0,57 J değerindeki darbe enerjisinde numunenin  $F_{maks}$  değerlerinde gözle görülür bir değişim olmamasına rağmen diğer üç deneyde  $F_{maks}$  miktarı gözle görülür bir şekilde düşmüştür. Bu da yukarıda açıklanmış olan 0,57 J değerindeki darbenin numuneyi hasara uğratması için gereken “n” darbe sayısına yaklaşmasındandır.  $E_{maks}$ -vuruş sayısı grafiklerinden  $F_{maks}$ -vuruş sayısı grafiklerindeki gibi 0,57 J değerindeki darbe enerjisinden sonra numuneye uygulanan ilk 0,85 J değerindeki darbe enerjisinin  $E_{maks}$  değeri 0,57 J değerindeki enerjiye göre ani bir şekilde artmaktadır.



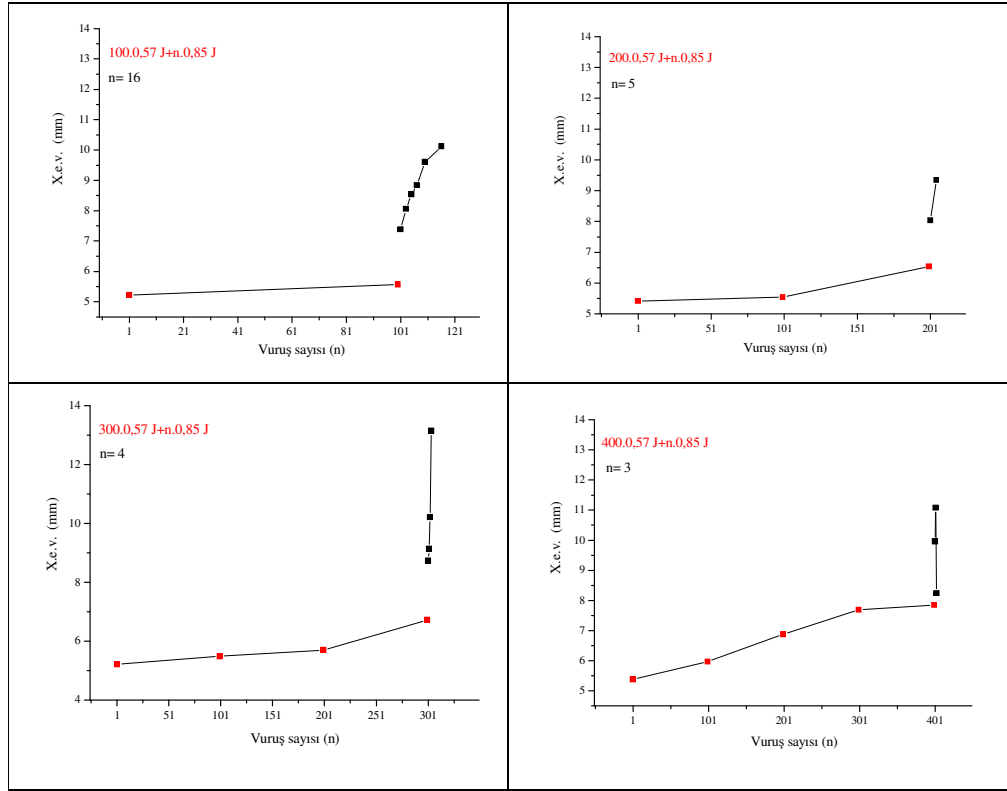
Şekil 4.16: [100÷500].0,57 J + n.0,85 J darbe enerjileri arasında yapılan darbeleri-yorulma için  $E_{maks}$ -tekrar vuruş sayısı grafikleri

Bilindiği gibi 0,57 J değerindeki darbelerden sonra numuneye uygulanan ilk 0,85 J değerindeki darbenin  $E_{maks}$  değeri 0,57 J değerine sahip darbeye göre ani bir şekilde artmaktadır. Sabit enerjili darbe-yorulma deneylerinde  $E_{maks}$  değişimi nasılsa burada da 0,57 J değerindeki darbeler için ilk bölgedeki değerler aynıdır. Şekil 4.16'da düşük darbelerden sonra uygulanan yüksek enerjili darbeler esnasında  $E_{maks}$  değerlerindeki değişim görülmektedir.  $E_{maks}$  değerindeki bu ani artışla malzemenin enerji absorpsiyonu artmış, bu sayede numune daha az vuruş sayısı ile hasara uğramıştır. İçi siyah kareyle simgelenirilmiş olan 0,85 J değerinde darbe enerjisindeki ani düşüş yaklaşık olarak  $F_{maks}$  eğrilerindeki 0,85 J değerindeki darbe enerjisinin ilkinden sonraki darbeye başlamaktadır. 0,85 J değerindeki darbe enerjilerinin vuruş sayısı arttıkça malzemedeki 0,57 J darbe enerjisi nedeni iç çatlaklar birleşir ve malzeme maruz kaldığı tekrarlı darbelere dayanamaz. İşte bu nedenle  $E_{maks}$  Grafiklerinde belli bir değerden sonra azalma ani bir şekilde artmaktadır.



Şekil 4.17:  $[100\div 500].0,57 J + n.0,85 J$  darbe enerjileri arasında yapılan darbeleri-yorulma için  $E.F_{maks}$ -tekrar vuruş sayısı grafikleri

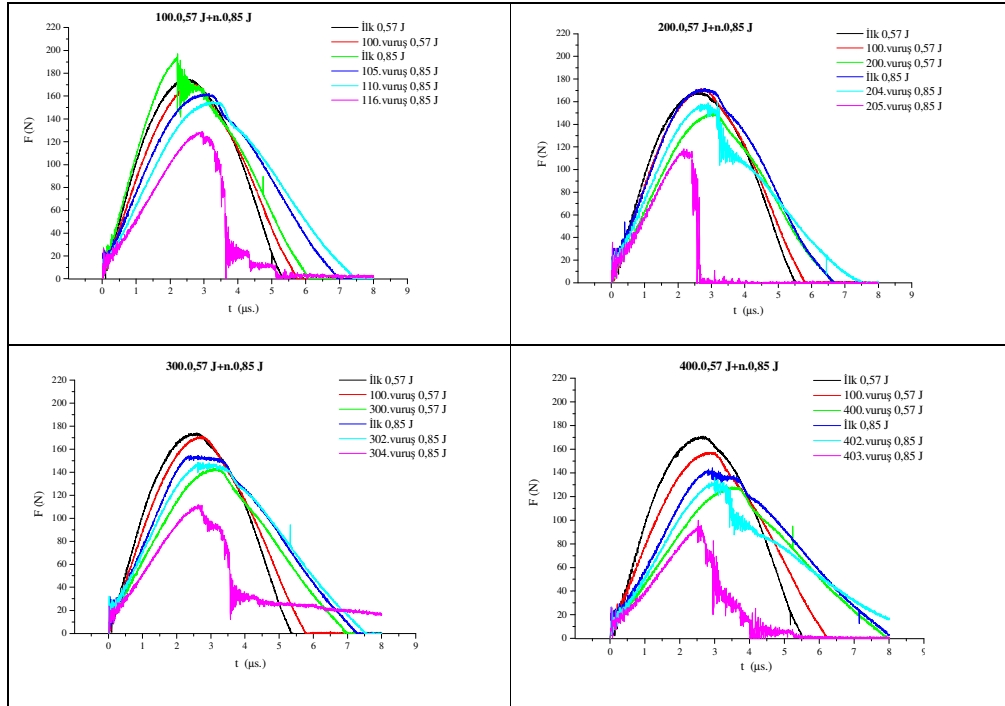
Şekil 4.17'deki [100÷500].0,57 J + n.0,85 J darbe enerjisiyle yapılan darbeleri-yorulma için  $E_{maks}$  değerlerinin yaklaşık olarak yarısı büyüklüğünde  $E.F_{maks}$  değerlerinin elde edildiği bulunmuştur.  $F_{maks}$  ve  $E_{maks}$  verilerindeki değişim,  $E.F_{maks}$ -vuruş sayısı grafiklerinin dağılımını değiştirmektedir. Daha öncede belirttiğimiz gibi 0,57 J değerindeki darbe enerjisinin  $E.F_{maks}$  dağılımı  $E_{maks}$  ve  $F_{maks}$  grafiklerindeki gibi düzgün bir şekilde değişirken, 0,85 J değerindeki darbe enerjisinin numuneye uygulanmasıyla  $E.F_{maks}$  değerleri birden artmış ve grafiklerdeki eğrinin düzgün değişimini değiştirmiştir. Her bir enerjinin kendi içindeki grafikteki değişimi düzgün olarak azalmaktadır.



Şekil 4.18: [100÷500].0,57 J + n.0,85 J darbe enerjileri arasında yapılan darbeleri-yorulma için X.e.v.-tekrar vuruş sayısı grafikleri

X.e.v.-vuruş sayısı grafiklerini incelersek, artan 0,57 J değerindeki darbe sayısı ile kırmızı kareli çizginin eğimi artmış ve numunenin hasara uğraması için gereken deformasyon miktarına yaklaşılmıştır. Numunenin hasara uğraması için gereken deformasyon miktarına yaklaşılmışla 0,57 J değerindeki darbelerden sonra

uygulanacak olan 0,94 J değerindeki darbeler esnasında numunenin kırılması için gereken deformasyon aralığı azalmıştır. Yani daha az vuruş sayısı ile malzemeyi kırarak olan deformasyon miktarına ulaşabilecektir. Bu yüzden artan 0,57 J değerindeki darbe sayısı sonrası daha az 0,94 J değerine sahip darbe numuneyi kırmaya yetmektedir. 0,85 J değerindeki darbelerin numuneye uygulanmasıyla yaklaşık olarak düzgün artan X.e.v. miktarı birden ivme kazanmıştır. 0,57 J değerindeki darbe enerjisi nedeniyle malzemenin içerisinde oluşan hasarlar 0,85 J değerindeki darbelerle büyüyerek malzemenin hasara uğramasına neden olmuştur. Normalde 0,85 J değerinde 59 vuruşta hasara uğrayan numune bu deneylerde artan 0,57 J değerindeki darbeler sonrası üç vuruşa kadar düşmüştür. Bu da numunenin 0,57 J değerindeki darbe nedeniyle hasara uğradığını göstermektedir.



Şekil 4.19: [100÷500].0,57 J + n.0,85 J darbe enerjileri arasında yapılan darbeleri-yorulma için çizilen üst üste eğriler

Şekil 4.19'da [100÷500].0,57 J + n.0,85 J darbe enerjisiyle yapılan darbeleri-yorulma için çizilen üst üste eğriler gösterilmektedir. Şekillerden de görüldüğü gibi ilk iki grafikte 0,57 J değerindeki enerjinin vuruş sayısının az olması nedeniyle malzemeyi hasara uğratmak için gereken 0,85 J değerindeki vuruş sayısı daha fazladır. Ayrıca

0,57 J değerinden sonraki ilk 0,85 J değerindeki darbelerin  $F_{maks}$  değerleri daha fazladır.

İlk iki deneyde 0,57 J değerindeki darbeler esnasında F-t eğrilerinin simetrikliklerinde ciddi deformasyonlar olmamıştır. Diğer deneylerde ise artan 0,57 J ile numunenin F-t grafiğinin simetriği bozulmuş ve malzemede plastik deformasyonlar oluşmuştur. Numunenin içinde oluşan hasarlar nedeniyle, uygulanan yüksek darbe enerjisiyle malzeme daha az tekrarlı vuruş sayısı ile kırılmıştır.

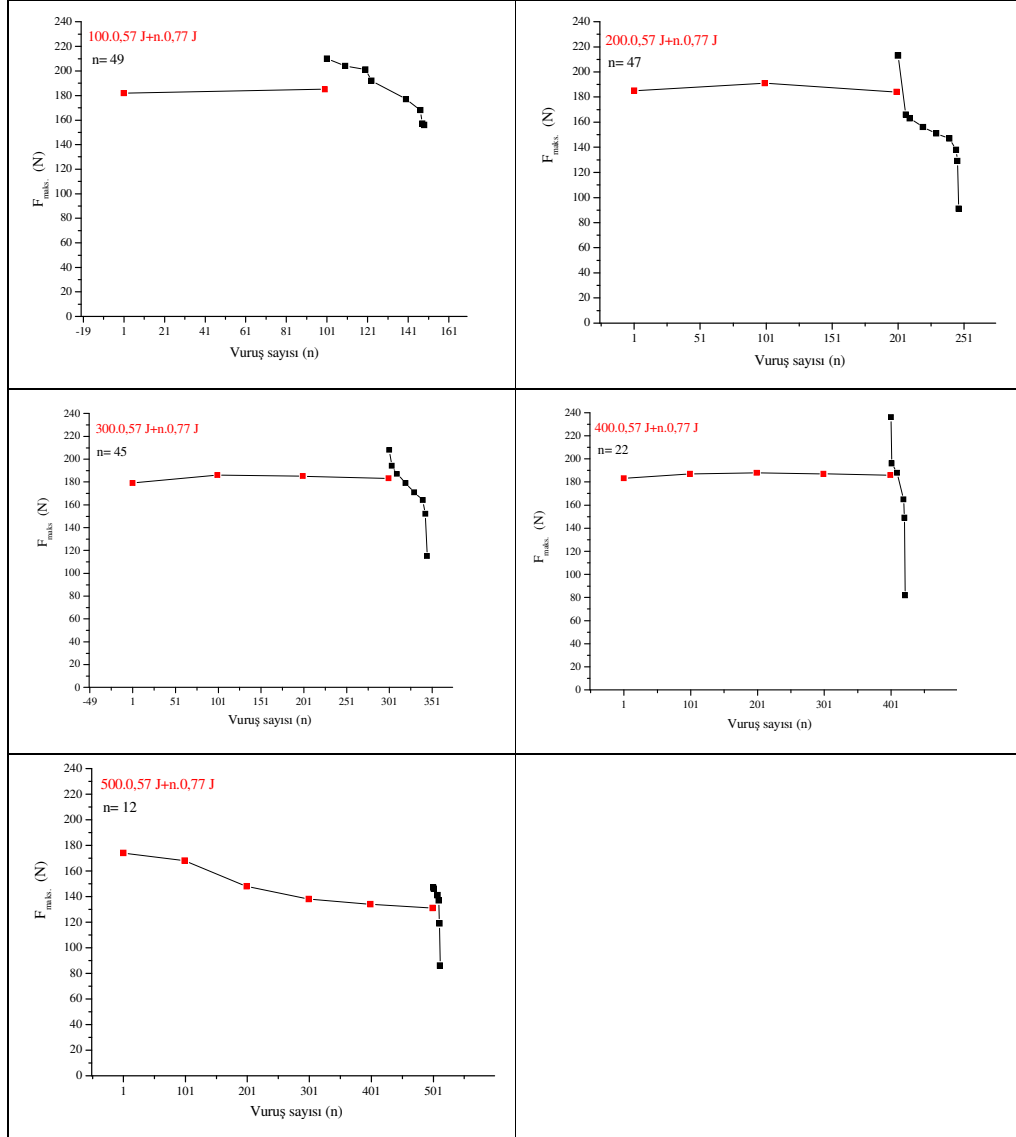
#### **4.2.1.3. [100÷500].0,57 J + n.0,77 J kodlu darbe-yorulma deney sonuçları**

Belirli sayıda düşük enerjili darbe uygulandıktan sonra daha yüksek darbe enerjisiyle numuneyi kırana kadar yapılan deney gruplarının sonuncusu [100÷500]. 0,57 J + n.0,77 J'dür. Bu grupta elde edilen sonuçlar  $F_{maks}$ ,  $E_{maks}$ ,  $E.F_{maks}$ , X.e.v.'nin değişimleri cinsinden ayrı ayrı incelenmiştir. Şekil 4.20 ve onu takip eden şekillerdeki grafiklerde kırmızı çizgiler [100÷500].0,57 J'ü simgelerken, siyah çizgiler n.0,77 J'ü simgelemektedir.

Bu grupta elde edilen deney sonuçları Bölüm 4.2.1.1'de anlatılan deney sonuçları ile yaklaşık olarak aynı çıktığı, numunenin hasara uğraması için gerekli olan "n" tekrarlı vuruş sayısının bu grupta biraz daha yüksek çıktığı gözlemlenmiştir. Bunun nedeni ise 0,94 J ile 0,85 J değerlerinin birbirine yakın iki değer olmasıdır. Bu yüzden farklı değerler çıkması ve aradaki farkı görebilmek amacıyla 0,77 J değerindeki darbe kullanıldı. Elde edilen sonuçlar sayesinde daha düşük darbe enerjisi seçilmesi ile numuneyi hasara uğratmak için gerekli olan tekrarlı vuruş sayısının arttığı görülmüştür. "n" tekrarlı vuruş sayısındaki artışla darbe enerji miktarının malzemeyi hasara uğrattırken ne kadar önemli olduğu gözlemlenmiştir.

Şekil 4.20'den görüldüğü gibi 0,57 J değerindeki darbelerin numuneye uygulanmasının ardından numuneyi kırarak olan 0,77 J değerindeki darbelerin sayısı azalmaktadır. Bölüm 4.1'de bahsedildiği gibi 0,57 J büyüklüğündeki tekrarlı darbeler sonucu numune 829 tekrar sayısından sonra hasara uğramıştır. 0,57 J değerindeki darbelerin her deneyde 100 darbe sayısı kadar artması numuneyi daha fazla hasara

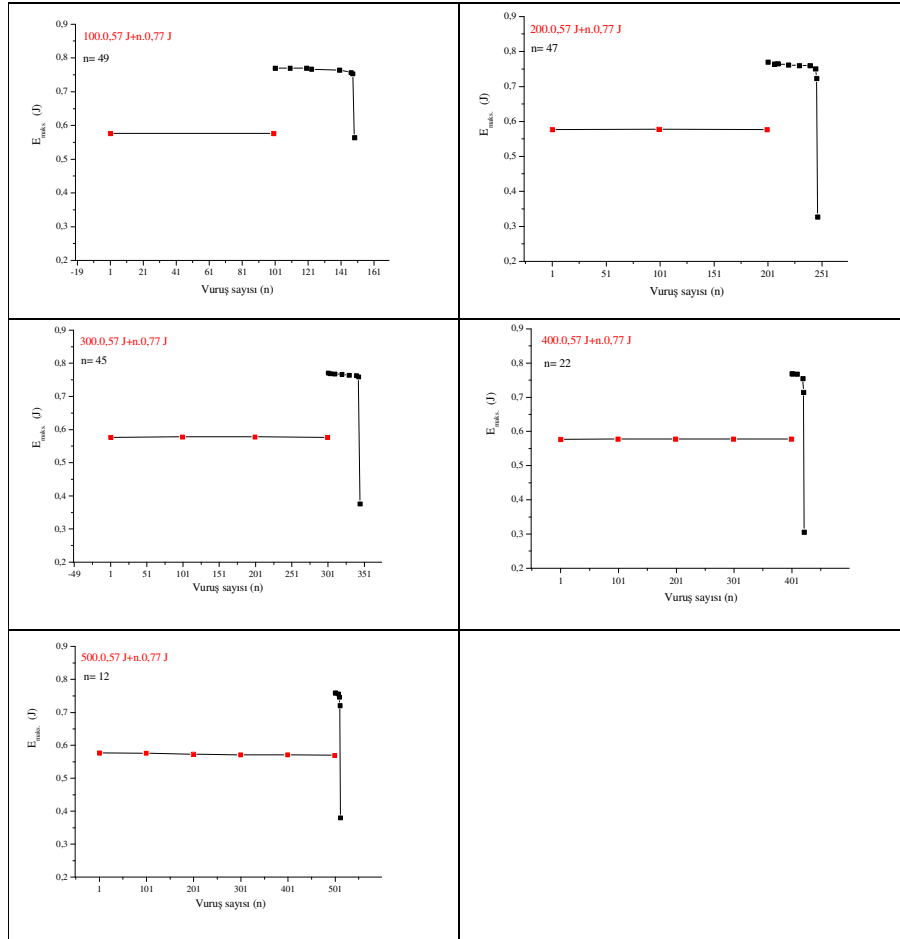
uğratmaktadır. Bu nedenle 0,57 J değerinden sonra numuneye uyguladığımız 0,77 J değerindeki darbe enerjisinin vuruş sayısı düşmektedir.



Şekil 4.20:  $[100\div 500].0.57 J + n.0.77 J$  darbe enerjileri arasında yapılan darbeleri-yorulma için  $F_{maks}$ -tekrar vuruş sayısı grafikleri

0,57 J değerindeki darbelerden sonra numuneye etki eden 0,77 J değerindeki darbelerin  $F_{maks}$  dağılımına bakıldığında değişim normal numunelerdekine benzer bir şekilde üç bölgeden oluşmaktadır. 0,57 J değerindeki darbeler numuneye belli bir hasara uğratmıştır ama asıl etkiyi 0,77 J değerindeki darbeler yapmaktadır. Bölüm

4.1'den 0,77 J için  $F_{maks}$ -vuruş sayısı grafiklerine bakacak olursak  $F_{maks}$  'taki düşüş üç bölgeden oluşmaktaydı. Burada oluşan dağılım da ona benzemekte olup 0,57 J değerindeki darbe enerjisinin numuneyi zayıflatmasından ötürü eğri yavaş inişini kaybedip daha hızlı bir düzen sergilemiştir. Şekil 4.20'de gösterilen diğer önemli husus ise, 0,57 J değerindeki darbelerden sonra vurulan ilk 0,77 J değerindeki darbenin  $F_{maks}$  değerleri bir önceki darbenin  $F_{maks}$  değerinden daha yüksek çıkmaktadır. Numune artan 0,57 J değerine sahip darbelerle yeterli seviyede iç hasarlara sahip olduktan sonra 0,77 J değerindeki darbe ile çok daha kolay hasara uğramıştır. Beklenildiği gibi 0,57 J değerindeki darbelerden sonra numuneye uygulanan ilk 0,77 J değerindeki darbenin  $E_{maks}$  değeri 0,57 J değerindeki darbeye göre ani bir şekilde artmaktadır.



Şekil 4.21:  $[100\div 500].0,57 J + n.0,77 J$  darbe enerjileri arasında yapılan darbeleri-yorulma için  $E_{maks}$ -tekrar vuruş sayısı grafikleri

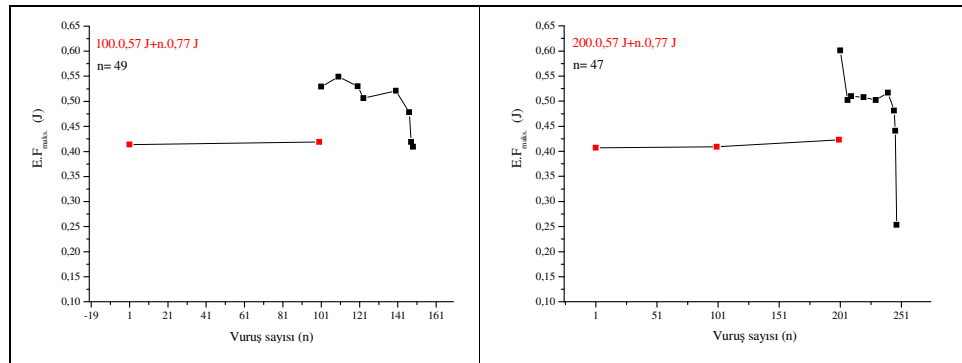


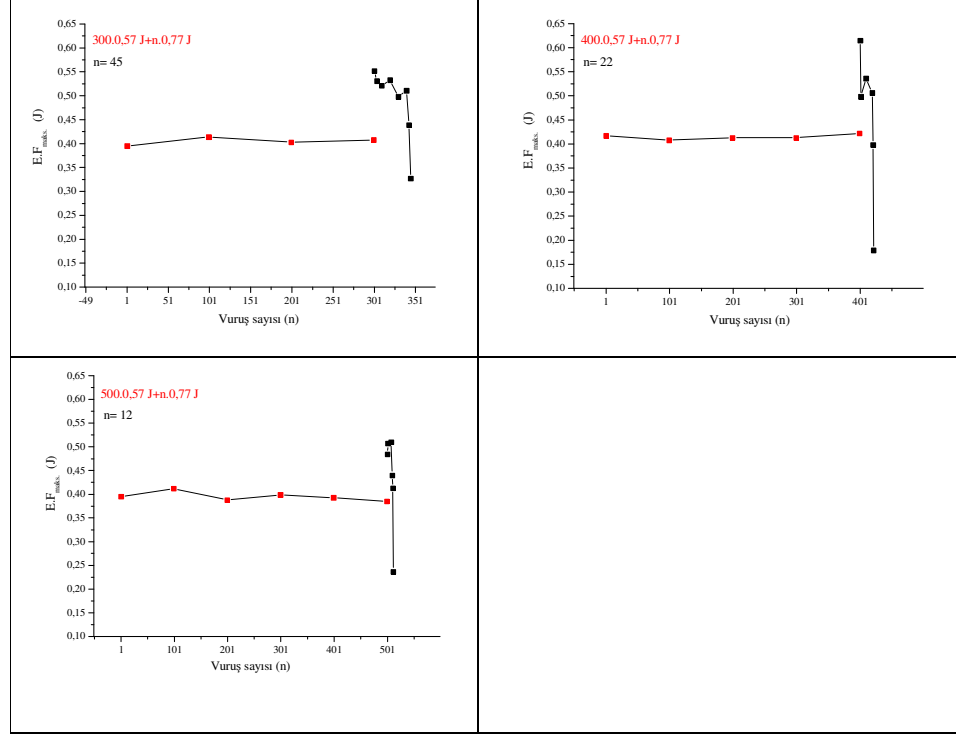
Şekil 4.21’de düşük enerjili darbelerden sonra uygulanan yüksek enerjili darbeler esnasında  $E_{maks}$  değerlerindeki değişim görülmektedir.  $E_{maks}$  değerindeki bu ani artışla malzemenin enerji absorpsiyonu artmış, bu sayede numune daha az vuruş sayısıyla hasara uğramıştır.

İç siyah kareyle simgelenirilmiş olan 0,77 J değerine sahip darbelerdeki ani düşüş yaklaşık olarak  $F_{maks}$  eğrilerindeki 0,77 J değerindeki darbenin ilk vuruşundan sonraki darbeye başlamaktadır. 0,77 J değerindeki darbelerin vuruş sayısı arttıkça malzemedeki 0,57 J değerli darbe nedeni ile iç çatlaklar birleşir ve malzeme maruz kaldığı tekrarlı darbeler dayanamaz. İşte bu nedenle  $E_{maks}$  grafiklerinde belli bir değerden sonra azalma ani bir şekilde artmaktadır.

Şekil 4.22’deki  $[100\div 500].0,57 J + n.0,77 J$  darbe enerjisiyle yapılan darbeleri-yorulma için  $E_{maks}$  değerlerinin yaklaşık olarak yarısı büyüklüğünde  $E.F_{maks}$  değerlerinin elde edildiği bulunmuştur.  $F_{maks}$  ve  $E_{maks}$  verilerindeki değişim,  $E.F_{maks}$ -vuruş sayısı grafiklerinin dağılımını değiştirmektedir.

Daha öncede belirttiğimiz gibi 0,57 J değerli darbe enerjisinin  $E.F_{maks}$  dağılımı  $E_{maks}$  ve  $F_{maks}$  grafiklerindeki gibi düzgün bir şekilde değişirken, 0,77 J değerindeki darbe enerjisinin numuneye uygulanmasıyla  $E.F_{maks}$  değerleri birden artmış ve grafiklerdeki eğrinin düzgün değişimini değiştirmiştir. Her bir enerjinin kendi içindeki grafikteki değişimi düzgün olarak azalmaktadır.

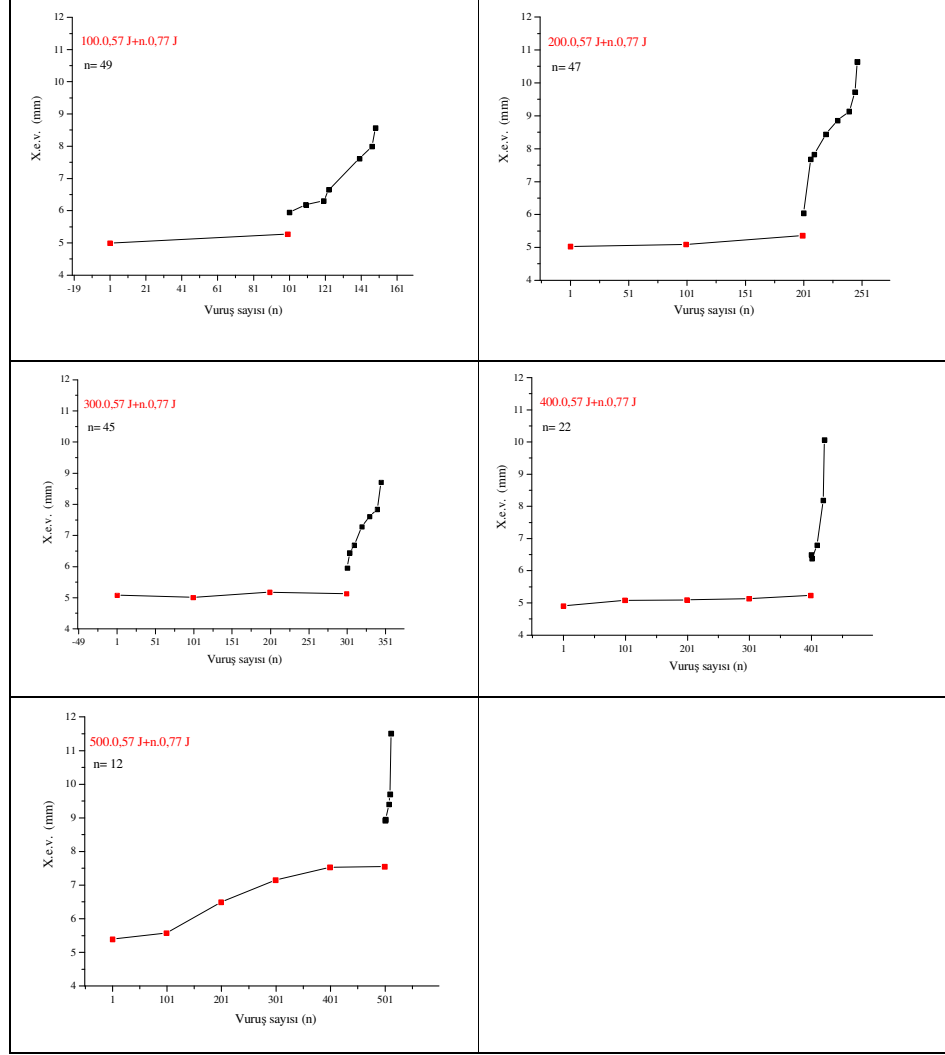




Şekil 4.22: (Devamı) [100÷500].0,57 J + n.0,77 J darbe enerjileri arasında yapılan darbeleri-  
yorulma için E.F.\_maks-tekerrar vuruş sayısı grafikleri

Şekil 4.23'teki X.e.v.-vuruş sayısı grafiklerini incelersek, artan 0,57 J değerli darbe sayısı ile kırmızı kareli çizginin eğimi artmış ve numunenin hasara uğraması için gereken deformasyon miktarına yaklaşmıştır.

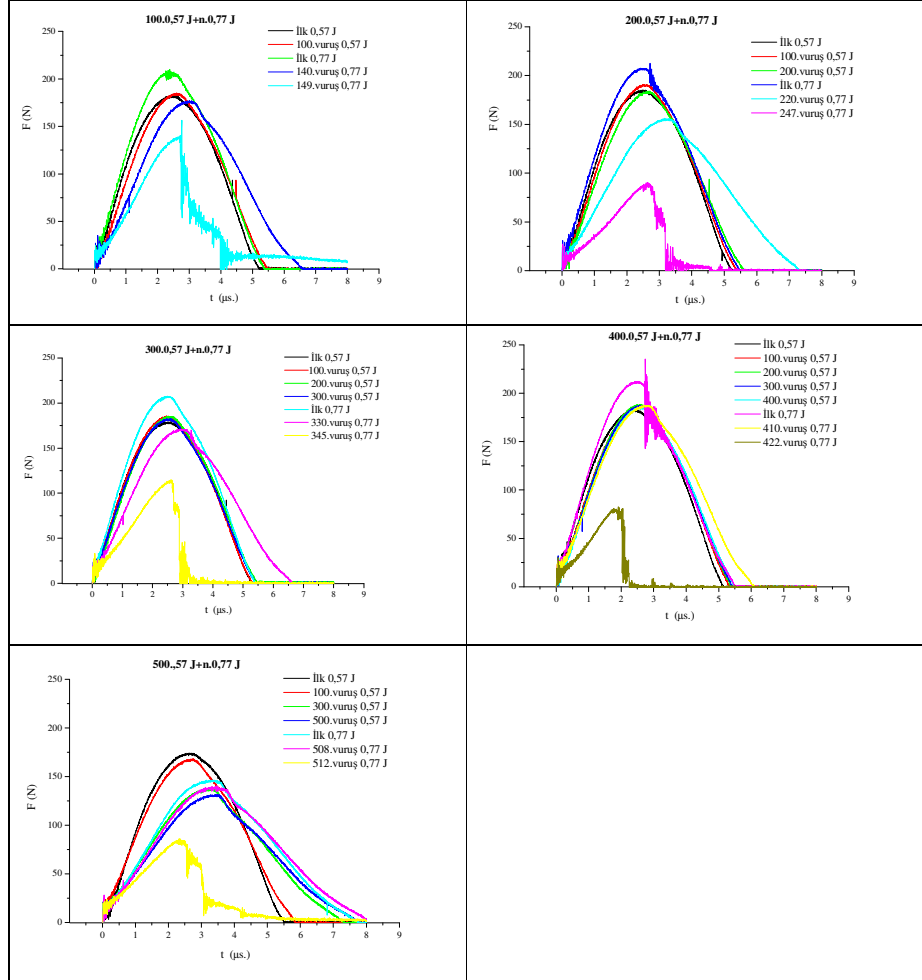
Numunenin hasara uğraması için gereken deformasyon miktarına yaklaşılmasıyla 0,57 J değerindeki darbelerden sonra uygulanacak olan 0,77 J değerindeki darbeler esnasında numunenin kırılması için gereken deformasyon aralığı azalmıştır. Yani daha az vuruş sayısı ile malzemeyi kırarak olan deformasyon miktarına ulaşabilecektir. Bu yüzden artan 0,57 J değerli darbe sayısı sonrası daha az 0,77 J değerindeki darbe numuneyi kırmaya yetmektedir. 0,77 J değerindeki darbelerin numuneye uygulanmasıyla yaklaşık olarak düzgün artan X.e.v. miktarı birden ivme kazanmıştır. 0,57 J değerindeki darbe enerjisi nedeniyle malzemenin içerisinde oluşan hasarlar 0,77 J değerindeki darbelerle büyüyerek malzemenin hasara uğramasına neden olmuştur. Normalde 0,77 J değeriyle 80 vuruşta hasara uğrayan numune bu deneylerde artan 0,85 J ile 12 vuruşa kadar düşmüştür.



Şekil 4.23:  $[100\div 500].0,57 J + n.0,77 J$  darbe enerjileri arasında yapılan darbeleri-yorulma için X.e.v.-tekrar vuruş sayısı grafikleri

Şekil 4.24'te  $[100\div 500].0,57 J + n.0,77 J$  darbe enerjisiyle yapılan darbeleri-yorulma için çizilen üst üste eğriler gösterilmektedir. Şekillerden de görüldüğü gibi  $0,57 J$  değerli enerjinin vuruş sayısının az olması nedeniyle malzemeyi hasara uğratmak için gereken  $0,77 J$  değerindeki darbe sayısı daha fazladır. Ayrıca  $0,57 J$  değerinden sonraki ilk  $0,77 J$  değerindeki darbelerin  $F_{maks}$  değerleri daha fazladır. İlk iki deneyde  $0,57 J$  değerindeki darbeler esnasında  $F-t$  eğrilerinin simetrikliklerinde ciddi deformasyonlar olmamıştır. Diğer deneylerde ise artan  $0,57 J$  ile numunenin  $F-t$  grafiğinin simetriği bozulmuş ve malzemede plastik deformasyonlar oluşmuştur.

Numunenin içinde oluşan hasarlar nedeniyle, uygulanan yüksek darbe enerjisiyle malzeme daha az tekrarlı vuruş sayısıyla kırılmıştır.



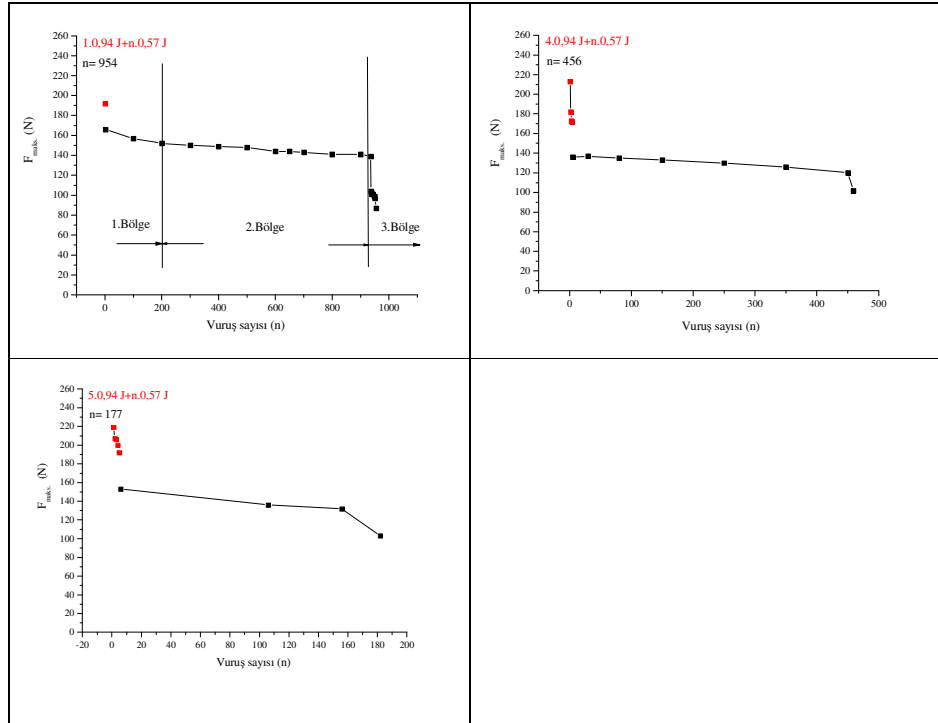
Şekil 4.24:  $[100\div 500].0,57 J + n.0,77 J$  darbe enerjileri arasında yapılan darbeleri-yorulma için çizilen üst üste eğriler

#### 4.2.2. Yüksek Enerjili Tekrarlı Darbeleri Takip Eden Düşük Enerjili Darbeler İle Yapılan Deneyler

##### 4.2.2.1. $[1\div 5].0,94 J + n.0,57 J$ kodlu darbe-yorulma deney sonuçları

Yüksek enerjili darbeler uygulandıktan sonra düşük enerjili darbelerle numuneyi hasara uğratmak için yapılan deney grubu  $[1\div 5]. 0,94 J + n.0,57 J$ 'dür. Bu grupta

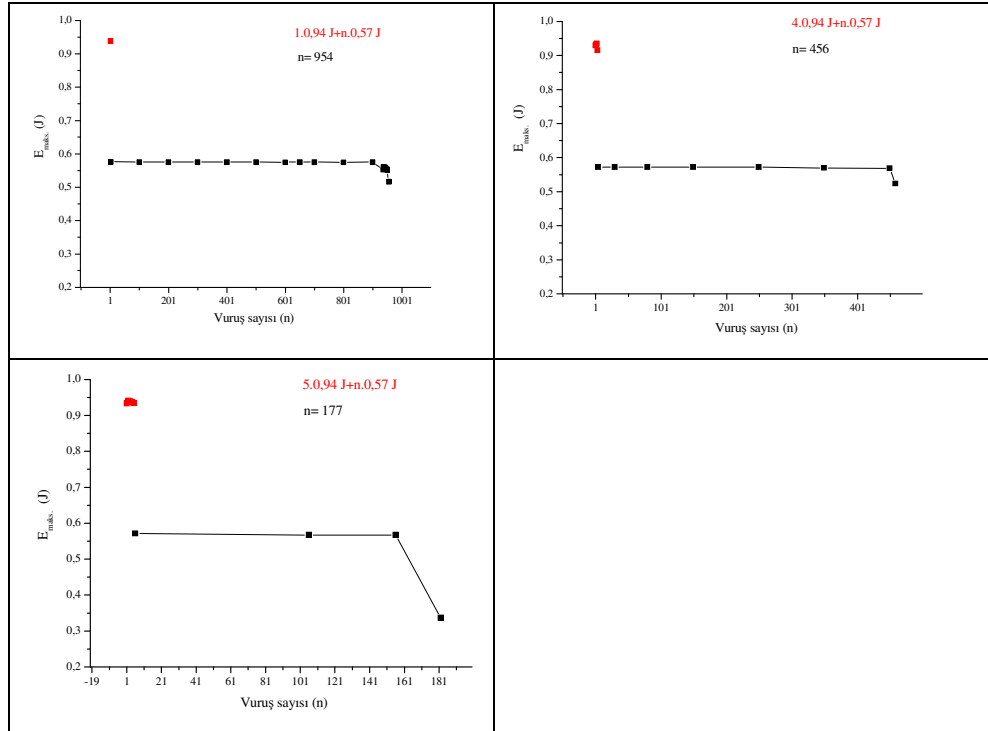
elde edilen sonuçlar  $F_{maks}$ ,  $E_{maks}$ ,  $E.F_{maks}$ , X.e.v.'in değişimleri cinsinden ayrı ayrı incelenmiştir. Şekil 4.25 ve onu takip eden şekillerdeki grafiklerde kırmızı çizgiler  $[1÷5].0,94 J$  değerini simgelerken, siyah çizgiler  $n.0,57 J$  değerini simgelemektedir. Bu deneyin yapılmasının nedeni Bölüm 4.2.1'de anlatılan düşük enerjiden yüksek enerjiye geçerken malzemede oluşan deformasyonların yüksek enerjiden düşük enerjiye geçilmesindeki farklılıkları kıyaslamaktır.



Şekil 4.25:  $[1÷5].0,94 J + n.0,57 J$  darbe enerjileri arasında yapılan darbeleri-yorulma için  $F_{maks}$ -tekrar vuruş sayısı grafikleri

Şekil 4.25  $[1÷5].0,94 J + n.0,57 J$  darbe enerjisiyle yapılan darbeleri-yorulma için  $F_{maks}$ -tekrar vuruş sayısı grafiklerini göstermektedir. Buradan, özellikle ilk grafiğe bakılacak olursa [1]  $0,94 J$  değerli darbenin Bölüm 4.1'de belirtildiği gibi  $0,57 J$  değerli darbenin grafiğinin yapısını pek değiştirmedeği görülmektedir.  $0,57 J$  ile normal bir numuneye yapılan deneyde malzeme 829 vuruş sayısında kırılmasına rağmen bu deneyde 955 vuruşta kırılmıştır. Nedeni ise yüksek darbe enerjisinin malzemede çatlak başlatması ve  $0,57 J$  değerindeki darbenin bu bölgeyi yeterli vuruş sayısında aşamamasıdır.

Diğer şekillerde de yaklaşık olarak normal numunelerde bulunduğu gibi 3 bölge görülmektedir. Yalnız ilk önce 0,94 J değerindeki darbenin numuneye etki etmesiyle ondan sonra gelen 0,57 J değerindeki darbelerin  $F_{maks}$  değerleri daha düşük seviyelerden başlamaktadır.  $F_{maks}$  eğrilerinden görüldüğü üzere 2. ve 3. bölgelerde hasarların olduğu, 1. bölge hasarlarının 0,94 J değerine sahip darbelerle gerçekleştirildiği anlaşılmaktadır.

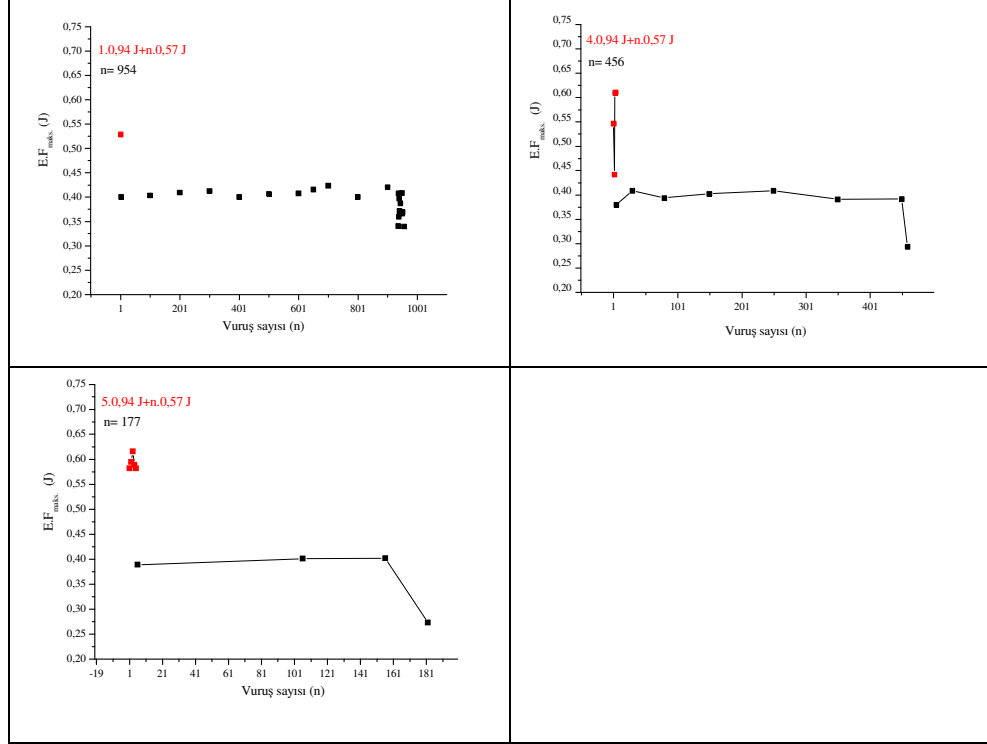


Şekil 4.26:  $[1\div 5].0,94 J + n.0,57 J$  darbe enerjileri arasında yapılan darbeleri-yorulma için  $E_{maks}$ -tekrar vuruş sayısı grafikleri

$E_{maks}$ -vuruş sayısı eğrilerinden, farklı darbe enerji sebebiyle farklı  $E_{maks}$  dağılımı sergiledikleri gözlemlenmiştir. Artan 0,94 J değerli darbe enerjisinde vuruş sayısı nedeniyle malzemenin absorbe edebileceği enerji azalmış ve daha düşük vuruş sayılarında kırılmıştır.

0,57 J değerli darbe enerjisinin olduğu eğrinin siyahla belirtilmiş çizgisindeki değişim genelde sabit kalmasına rağmen belli bir değerden sonra ani olarak düşüş göstermektedir. Bu değer yaklaşık olarak  $F_{maks}$ -vuruş sayısı grafiklerinde  $F_{maks}$

değerinin ani bir şekilde düşüş gösterdiği yerdur. Bu bölgeden sonra numune kırılır.  $[1\div 5].0,94 \text{ J} + n.0,57 \text{ J}$  değerindeki darbelerle yapılan darbeleri-yorulma için  $E.F_{maks}$ -tekrar vuruş sayısı grafiklerinden  $E_{maks}$ -tekrar vuruş sayısı grafiklerinin  $E_{maks}$  değerinin yaklaşık olarak yarısı kadar  $E.F_{maks}$  değerine sahip olduğu görülmektedir.

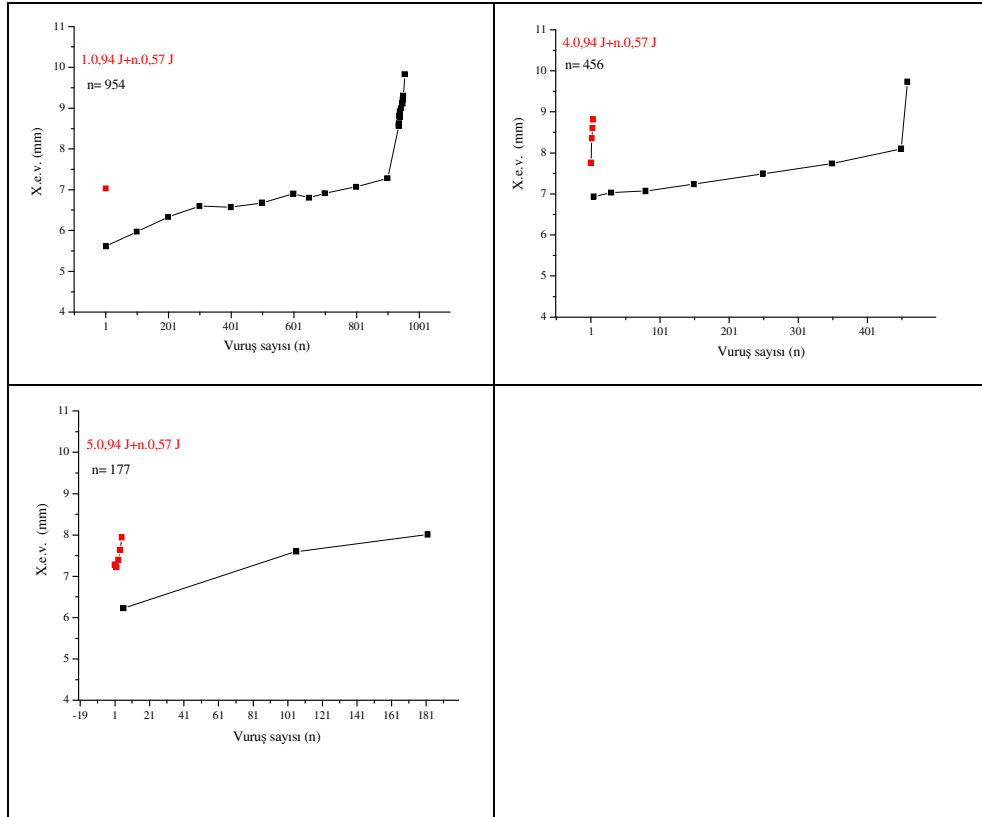


Şekil 4.27:  $[1\div 5].0,94 \text{ J} + n.0,57 \text{ J}$  darbe enerjileri arasında yapılan darbeleri-yorulma için  $E.F_{maks}$ -tekrar vuruş sayısı grafikleri

Daha öncede belirtildiği gibi  $0,57 \text{ J}$  değerindeki darbe enerjisinin  $E.F_{maks}$  dağılımı  $E_{maks}$  ve  $F_{maks}$  grafiklerindeki gibi düzgün bir şekilde değişirken,  $0,94 \text{ J}$  değerindeki darbe enerjisinin numuneye uygulanmasıyla  $E.F_{maks}$  değerleri değiştirmiştir. Her bir enerjinin kendi içindeki grafikteki değişimi düzgün olarak azalmaktadır.

Şekil 4.28.'de  $[1\div 5].0,94 \text{ J} + n.0,57 \text{ J}$  değerli darbelerle yapılan darbeleri-yorulma deneyleri için X.e.v.-tekrar vuruş sayısı grafikleri görülmektedir. Burada iki ayrı bölge bulunmaktadır. Her bölge iki farklı darbe enerjisini temsil etmektedir. Birinci bölge  $0,94 \text{ J}$  değerini, ikinci bölge ise  $0,57 \text{ J}$  değerini göstermektedir. Her bölge kendi içerisinde düzgün olarak artmaktadır.  $0,94 \text{ J}$  değerindeki darbe enerjisinden

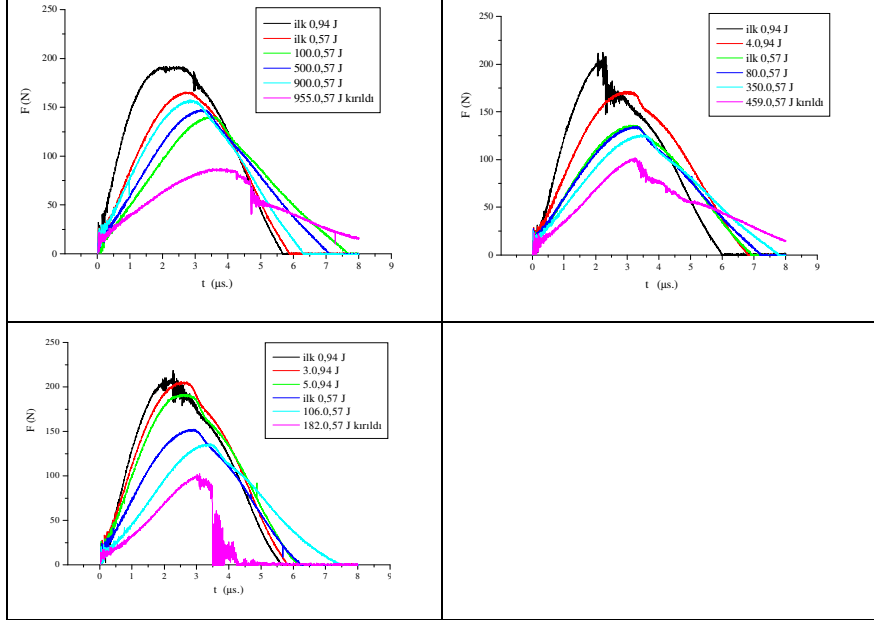
sonra 0,57 J değerindeki darbe enerjisinin uygulanmasıyla deformasyon miktarında ani bir azalma görülmektedir. Bu grafikteki deformasyon değerleri o vuruş anında alınan değerlerdir. Darbe enerjisindeki azalma nedeniyle ani bir deformasyon miktarı düşüşü yaşanmıştır. Daha sonra ise artan darbe sayısı ve daha önceden numuneye tatbik edilmiş 0,94 J değerindeki darbe enerjisi nedeniyle numunenin deformasyon miktarı hızlı bir şekilde artmaktadır.



Şekil 4.28:  $[1 \div 5].0,94 J + n,0,57 J$  darbe enerjileri arasında yapılan darbeleri-yorulma için X.e.v.-tekrar vuruş sayısı grafikleri

Şekil 4.29'dan da görüldüğü gibi numuneye ilk önce 0,94 J değerinin uygulanmasıyla numunede F-t grafiğinin simetrisi bozulmuş ve eğrinin sağ tarafında plastik deformasyonlar oluşmuştur. Plastik deformasyonların oluşması nedeniyle 0,94 J değerindeki darbe enerjisi den sonra numuneye uygulanacak 0,57 J değerindeki darbe hasarlı olan numuneyi az bir tekrarlı vuruş sayısında kırmaktadır.





Şekil 4.29:  $[1 \div 5] \cdot 0,94 \text{ J} + n \cdot 0,57 \text{ J}$  darbe enerjileri arasında yapılan darbeleri-yorulma için çizilen üst üste eğriler

### **4.3 Karma Darbelere Maruz Kalan Numunelerin Darbe Davranışlarının İncelenmesi**

Bu bölümde üç farklı darbe enerjisine maruz bırakılan malzemeleri incelemek için üç farklı deney grubu oluşturulmuştur. Birbirleri arasındaki ilişkiyi açıklayabilmek amacıyla deneylerde üç farklı darbe enerjisi ve vuruş sayıları değiştirilmeden sadece uygulama sıraları değiştirilerek uygulanmıştır.

Çalışılacak darbe enerjisi aralığını seçmek için Bölüm 4.1’de normal numunelere yapılan deneyler esas alınarak üç farklı darbe enerjisi seçilmiştir. Normal numune deneylerinde 11 ayrı darbe enerjisi seçilmişti. Malzeme içerisindeki artık gerilmeleri düzgün bir şekilde görebilmek için seçilmiş olan darbe enerjilerinin birbirine çok yakın olmaması gerekmektedir. Bu yüzden numuneleri kırmayacak sayı ve büyüklükte 250 adet 0,54 J, 10 adet 0,73 J ve 2 adet 0,94 J değerindeki darbeler seçilip numunelere üç farklı kombinasyonda uygulanmıştır.

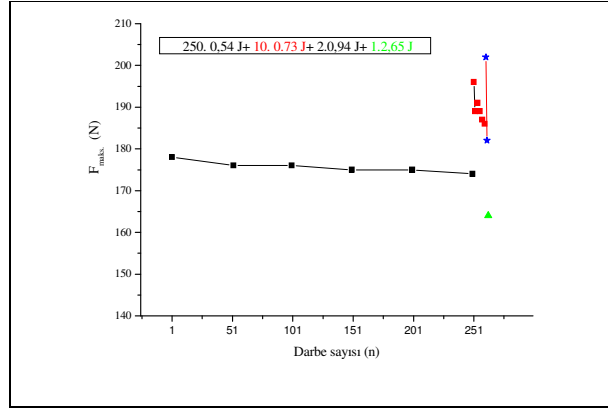
Bu bölümde üç ayrı grup oluşturulmasının nedeni, ilk önce düşük darbe enerjisinden sonra yüksek darbe enerjisi uygulanırsa veya yüksek darbe enerjisinden sonra küçük darbe enerjisi uygulanırsa ve son olarak tekrar büyük darbe enerjisi uygulanırsa numune içerisinde oluşacak deformasyon dağılımının aynı olmadığı görülmüştür. Her deney grubu için üçer adet deney yapılmış olup, her grubu temsilen bir numunenin  $F_{maks}$ ,  $E_{maks}$ ,  $E.F_{maks}$ ,  $X.e.v.$  ve  $F-t$  grafikleri çizilip, grafikler yardımıyla bulunan sonuçlar açıklanmıştır. Deneyde uygulanacak üç farklı darbe enerjisini seçtikten sonra üç farklı kombinasyon belirlendi. Bunlar sırasıyla  $(250*0,54 J + 10*0,73 J + 2*0,94 J)$ ,  $(10*0,73 J + 250*0,54 J + 2*0,94 J)$ ,  $(2*0,94 J + 250*0,54 J + 10*0,73 J)$ ’dir. Her grupta vuruş sayısı eşit tutulmuştur. Numuneler bu kombinasyonlarda darbeye maruz bırakıldıktan sonra 2,65 J değerindeki darbe uygulanarak numuneler kırılmıştır.

#### **4.3.1. $(250*0,54 J + 10*0,73 J + 2*0,94 J)$ Karma Darbe Grubu Sonuçları**

Karma darbe gruplarının ilki  $(250*0,54 J + 10*0,73 J + 2*0,94 J)$  olup tutarlı sonuçların çıkması için her deney üç kez tekrarlanmıştır. Bu karma grupta düşük

darbe enerjisinden yüksek darbe enerjisine doğru numuneler darbelere maruz bırakılmıştır.

Şekil 4.30’da  $(250*0,54 \text{ J} + 10*0,73 \text{ J} + 2*0,94 \text{ J})$  karma darbe grubu için  $F_{\text{maks}}$ -darbe sayısı grafiği gösterilmiştir. Burada dört farklı bölge bulunmaktadır. Grafiğin içinde ilk soldaki siyah içi dolu kare ile belirtilen 0,54 J değerindeki darbelerin  $F_{\text{maks}}$  değeridir. Kırmızı içi dolu kare ile gösterilen ikinci bölge ise 0,73 J değerindeki darbelerin numunede yarattığı  $F_{\text{maks}}$  olup, içi dolu mavi yıldız ile gösterilen eğri ise 0,94 J değerindeki darbelerin  $F_{\text{maks}}$  değerlerini belirtmektedir. Son olarak ta 2,65 J değerindeki darbenin  $F_{\text{maks}}$  değeri yeşil üçgen ile gösterilmiştir.

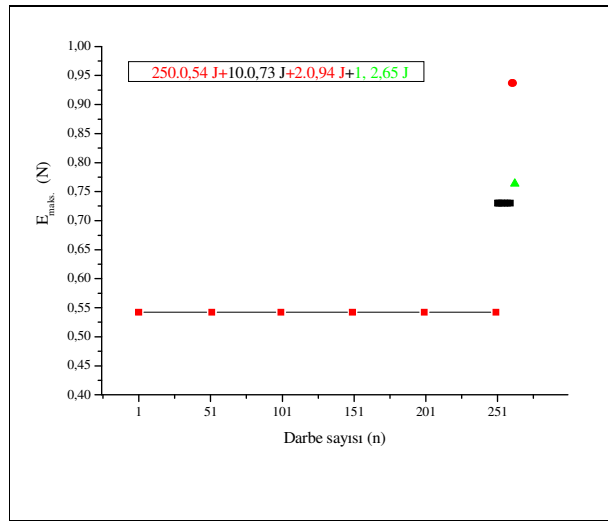


Şekil 4.30:  $(250*0,54 \text{ J} + 10*0,73 \text{ J} + 2*0,94 \text{ J})$  karma darbe grubunun etkidiği numunenin  $F_{\text{maks}}$ -darbe sayısı grafiği

Bölüm 4.1’den de hatırlanacağı gibi 0,54 J değerindeki darbe ile numunenin hasara uğraması için 3580 kez tekrarlı darbeye maruz bırakılması gerekmektedir. Burada 0,54 J değerindeki darbeden sadece 250 kez numuneye vurulduğu için  $F_{\text{maks}}$  değerinde fazla bir değişim olmamıştır. Daha sonra ise artan darbe enerjisiyle  $F_{\text{maks}}$  değerinde ani bir artış gözlenmiştir. Bu da 0,73 J değerli darbe enerjisinin 0,54 J değerinden daha yüksek bir darbe enerjisi olmasından kaynaklanmaktadır. Tabii ki 0,73 J değerindeki darbe numuneye sadece 10 kez uygulanmasına rağmen, 0,54 J değerindeki darbelerin numuneye yaptığı etkiden daha fazla etki yapmıştır. Bölüm 4.1’de  $F_{\text{maks}}$ -darbe sayısı eğrilerinde üç bölge olduğu belirtilmişti. 0,73 J değerindeki darbelerin etkimesiyle basma bölgesindeki fiberler hasarlandığı için  $F_{\text{maks}}$

değerlerinde ani bir düşüş görülmektedir. Bu numunenin  $F_{maks}$ -darbe sayısı eğrilerinde birinci bölgede olduğunu göstermektedir. 0,73 J değerindeki darbelerden sonra numuneye iki adet 0,94 J değerli darbe uygulanmıştır.

Grafikte “plato” bölgesi dediğimiz yerin oluşmamasının nedeni, 0,73 J değerli darbelerden sonra numuneye daha yüksek bir darbe uygulanmasıdır. 0,94 J değerindeki darbe numuneyi kırmamasına rağmen numunenin dayanımını azaltmıştır. En son olarak ta 2,65 J değerli darbe uygulanarak numune kırılmıştır.

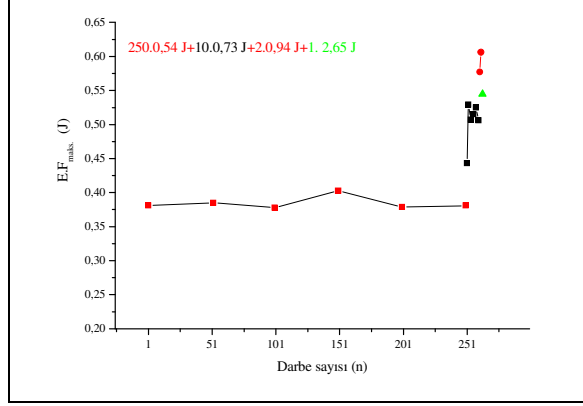


Şekil 4.31: (250\*0,54 J + 10\*0,73 J + 2\*0,94 J) karma darbe grubunun etkidiği numunenin  $E_{maks}$ -darbe sayısı grafiği

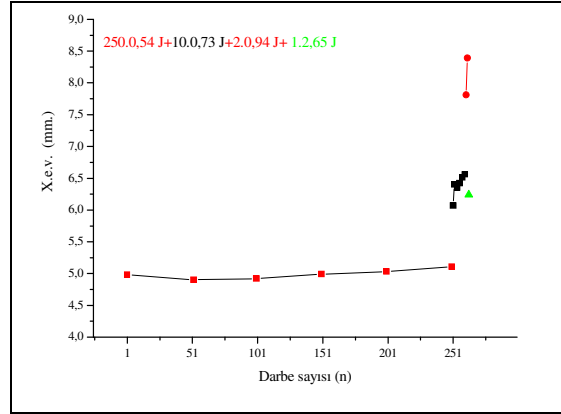
Şekil 4.31’de (250\*0,54 J + 10\*0,73 J + 2\*0,94 J) karma darbe grubunun etkidiği numunenin  $E_{maks}$ -darbe sayısı grafiğine göre, artan darbe enerjisi ile  $E_{maks}$  değerlerinin arttığı görülmektedir. 0,54 J değerindeki darbelerin  $E_{maks}$  değerlerinin değişimi çok azken, 0,94 J değerli darbelerin numuneye etkimesiyle  $E_{maks}$  değeri bir anda yaklaşık olarak iki katına çıkmıştır. Numuneye uygulanan 2,65 J değerli darbe ile  $E_{maks}$  değeri ani bir şekilde düşmektedir.

Şekil 4.32’de karma darbeye maruz bırakılmış numunenin  $E.F_{maks}$ -darbe sayısı grafiği gösterilmiştir.  $E.F_{maks}$ -darbe sayısı grafiği  $F_{maks}$ -darbe sayısı ve  $E_{maks}$ -darbe

sayısı grafikleri ile uyum göstermektedir. Artan darbe enerjisiyle  $F_{maks}$  değeri artmakta,  $F_{maks}$  değerinin artmasıyla da numunenin  $E.F_{maks}$  değerleri artmaktadır.



Şekil 4.32: (250\*0,54 J + 10\*0,73 J + 2\*0,94 J) karma darbe grubunun etkidiği numunenin  $E.F_{maks}$ -darbe sayısı grafiği

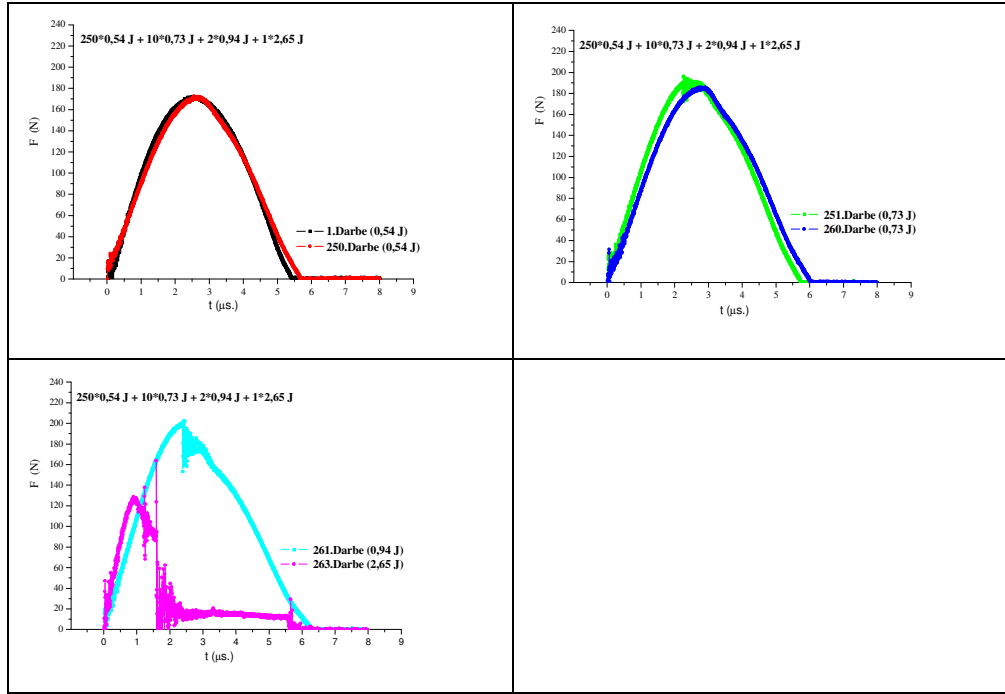


Şekil 4.33: (250\*0,54 J + 10\*0,73 J + 2\*0,94 J) karma darbe grubunun etkidiği numunenin X.e.v.-darbe sayısı grafiği

Şekil 4.33'te (250\*0,54 J + 10\*0,73 J + 2\*0,94 J) karma darbe grubunun etkidiği numunenin X.e.v.-darbe sayısı grafiği görülmektedir. Şekil 4.33'ten artan darbe enerjisiyle numunede oluşan deformasyon miktarının doğru orantılı olarak arttığı görülmektedir. 0,54 J değerli darbelerde deformasyon değişimi çok azken, darbe enerjisini yükselterek deformasyon değişiminin artması sağlanabilir. Darbe enerjisindeki artış ile X.e.v.-darbe sayısının eğrisinin eğimi artmış ve malzemenin hasara uğraması için gereken deformasyon miktarına yaklaşılmıştır. 0,54 J değerli

darbelerde deformasyon miktarı 5-5.5 mm arasında değişirken, 0,73 J değerindeki darbelerde bu değer 6.5-7 mm ve 0,94 J değerindeki darbelerde de 8.5-9.5 mm civarındadır.

(250\*0,54 J + 10\*0,73 J + 2\*0,94 J) karma darbe grubunun etkidiği numunenin üst üste grafikleri her darbe enerjisi için ayrı ayrı çizilmiştir. Şekil 4.34'e göre, 0,54 J değerli darbeyle yapılan 250 vuruşta numunenin F-t grafiğinin simetrisi bozulmamıştır. Daha sonra numuneye uygulanan ilk 0,73 J değerli darbe ile numunenin F-t grafiğindeki simetri bozulmuş ve numunede plastik deformasyon oluşmuştur. 0,94 J değerli darbelerin numuneye etkimesiyle numunenin dayanımı azalmıştır. En son olarak ta 2,65 J değerli darbe enerjisi ile numune kırılmıştır.

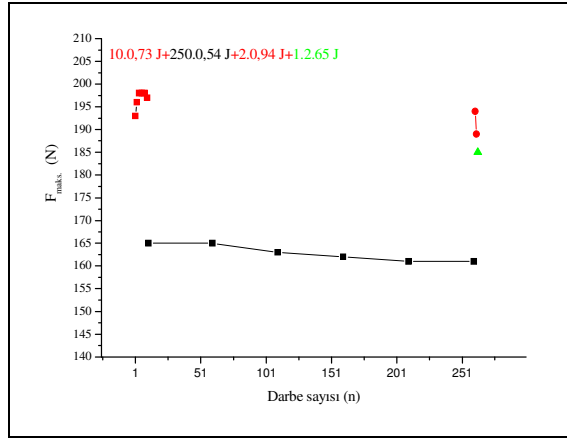


Şekil 4.34: (250\*0,54 J + 10\*0,73 J + 2\*0,94 J) karma darbe grubunun etkidiği numunenin üst üste grafikleri

#### 4.3.2. (10\*0,73 J + 250\*0,54 J + 2\*0,94 J) Karma Darbe Grubu Sonuçları

Karma darbe gruplarının ikincisi (10\*0,73 J + 250\*0,54 J + 2\*0,94 J) olup tutarlı sonuçların çıkması için her deney üç kez tekrarlanmıştır. Bu karma grupta ilk önce

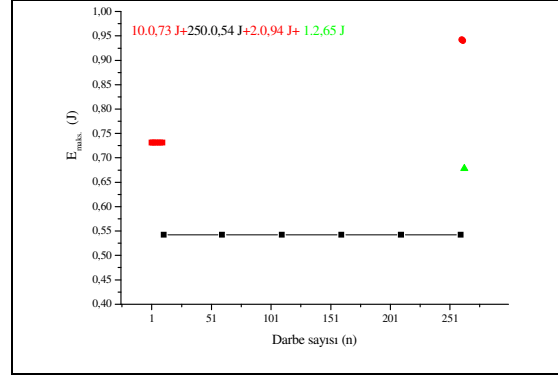
yüksek darbe enerjisinden düşük darbe enerjisine daha sonra ise düşük darbe enerjisinden yüksek darbe enerjisine doğru numuneler darbelere maruz bırakılmıştır. Şekil 4.35'te ( $10 \cdot 0,73 \text{ J} + 250 \cdot 0,54 \text{ J} + 2 \cdot 0,94 \text{ J}$ ) karma darbe grubu için  $F_{\text{maks}}$ -darbe sayısı grafiği gösterilmiştir. Burada dört farklı bölge bulunmaktadır. Grafiğin içindeki ilk soldaki kırmızı içi dolu kare ile belirtilen  $0,73 \text{ J}$  değerli darbelerin  $F_{\text{maks}}$  değerleridir. Siyah içi dolu kare ile gösterilen ikinci eğri ise  $0,54 \text{ J}$  değerli darbelerin numunede yarattığı  $F_{\text{maks}}$  olup, içi dolu kırmızı daire ile gösterilen eğri ise  $0,94 \text{ J}$  değerli darbelerin  $F_{\text{maks}}$  değerini belirtmektedir. En son olarak ta  $2,65 \text{ J}$  değerli darbenin  $F_{\text{maks}}$  değeri yeşil üçgen ile gösterilmiştir.



Şekil 4.35: ( $10 \cdot 0,73 \text{ J} + 250 \cdot 0,54 \text{ J} + 2 \cdot 0,94 \text{ J}$ ) karma darbe grubunun etkilediği numunenin  $F_{\text{maks}}$ - darbe sayısı grafiği

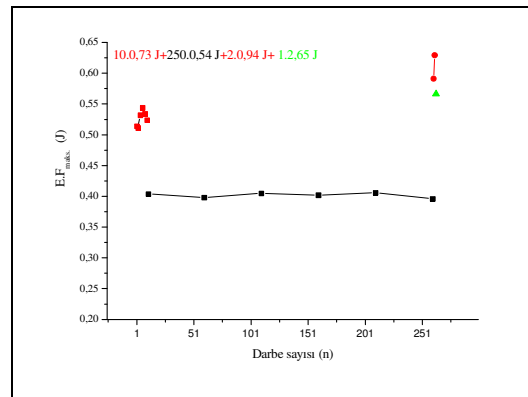
Numuneye ilk önce  $0,73 \text{ J}$  değerindeki darbe uygulanmıştır. Daha sonra ise 250 adet  $0,54 \text{ J}$  değerindeki darbelere geçilmiştir. Bölüm 4.3.1'de Şekil 4.30'da gösterilen ( $250 \cdot 0,54 \text{ J} + 10 \cdot 0,73 \text{ J} + 2 \cdot 0,94 \text{ J}$ ) karma darbe grubunun etkilediği numunenin  $F_{\text{maks}}$ -darbe sayısı grafiğinde  $0,54 \text{ J}$  değerindeki darbe ile başlanılmış olup yaklaşık olarak  $F_{\text{maks}}$  değerinin  $170 \text{ N}$  olduğu belirtilmişti. Bu bölümde ise Şekil 4.35'te  $0,54 \text{ J}$  değerindeki darbenin etkilediği bölgede  $F_{\text{maks}}$  değeri yaklaşık olarak  $165-160 \text{ N}$  arasında olduğu görülmüştür. Buradan  $0,73 \text{ J}$  değerindeki darbeler numuneyi zayıflattığı için Bölüm 4.3.1'de  $0,54 \text{ J}$  değerindeki enerji için ulaşılan  $F_{\text{maks}}$  kuvvetine burada ulaşamamıştır.  $0,54 \text{ J}$  değerindeki darbelerden sonra  $0,94 \text{ J}$  değerindeki darbeler numuneye uygulanmıştır.  $F_{\text{maks}}$  değerlerinde darbe enerjisindeki artış nedeniyle gözle görülür bir artış görülmektedir. Numune  $0,94 \text{ J}$  değerindeki

darbeler ile hasara uğramadığından hemen devamında bir kez 2,65 J değerindeki darbe uygulanarak numunenin kırılması sağlanmıştır.



Şekil 4.36: (10\*0,73 J + 250\*0,54 J + 2\*0,94 J) karma darbe grubunun etkidiği numunenin E<sub>maks</sub>-darbe sayısı grafiği

Şekil 4.36'da (10\*0,73 J + 250\*0,54 J + 2\*0,94 J) karma darbe grubunun etkidiği numunenin E<sub>maks</sub>-darbe sayısı grafiğinden, dört farklı darbe enerjisi nedeniyle oluşan dört ayrı E<sub>maks</sub> bölgesi görülmektedir. Bölüm 4.3.1'de Şekil 4.31'de gösterilen (250\*0,54 J + 10\*0,73 J + 2\*0,94 J) karma darbe grubunun etkidiği numunenin E<sub>maks</sub>-darbe sayısı grafiğinde her bir farklı darbe enerjisinin neden olduğu E<sub>maks</sub> değerleriyle, Şekil 4.36'da gösterilen (10\*0,73 J + 250\*0,54 J + 2\*0,94 J) karma darbe grubunun etkidiği numunenin E<sub>maks</sub>-darbe sayısı grafiğindeki her bir farklı darbe enerjisinin neden olduğu E<sub>maks</sub> değerleri yaklaşık olarak aynı çıkmıştır.

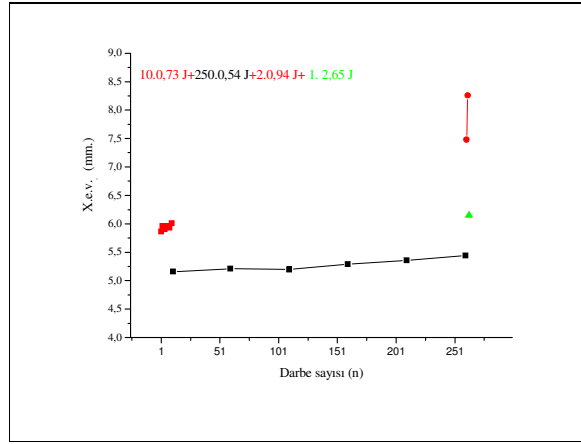


Şekil 4.37: (10\*0,73 J + 250\*0,54 J + 2\*0,94 J) karma darbe grubunun etkidiği numunenin E.F<sub>maks</sub>-darbe sayısı grafiği



Şekil 4.37’de karma darbeye maruz bırakılmış numunenin  $E.F_{maks}$ -darbe sayısı grafiği gösterilmiştir.  $E.F_{maks}$ -darbe sayısı grafiği  $F_{maks}$ -darbe sayısı ve  $E_{maks}$ -darbe sayısı grafikleri ile uyum göstermektedir. Artan darbe enerjisiyle  $F_{maks}$  değeri artmakta,  $F_{maks}$  değerinin de artmasıyla numunenin  $E.F_{maks}$  değerleri artmaktadır.

0,54 J değerindeki darbelerin numuneye etkimesiyle doğal olarak  $E.F_{maks}$  değerleri düşmüştür.  $E.F_{maks}$  her darbe enerjisinde düzgün bir şekilde dağılım göstermiştir. Daha önce yapılan deneylerdeki gibi  $E.F_{maks}$  değerleri  $E_{maks}$  değerlerinden düşük çıkmaktadır.

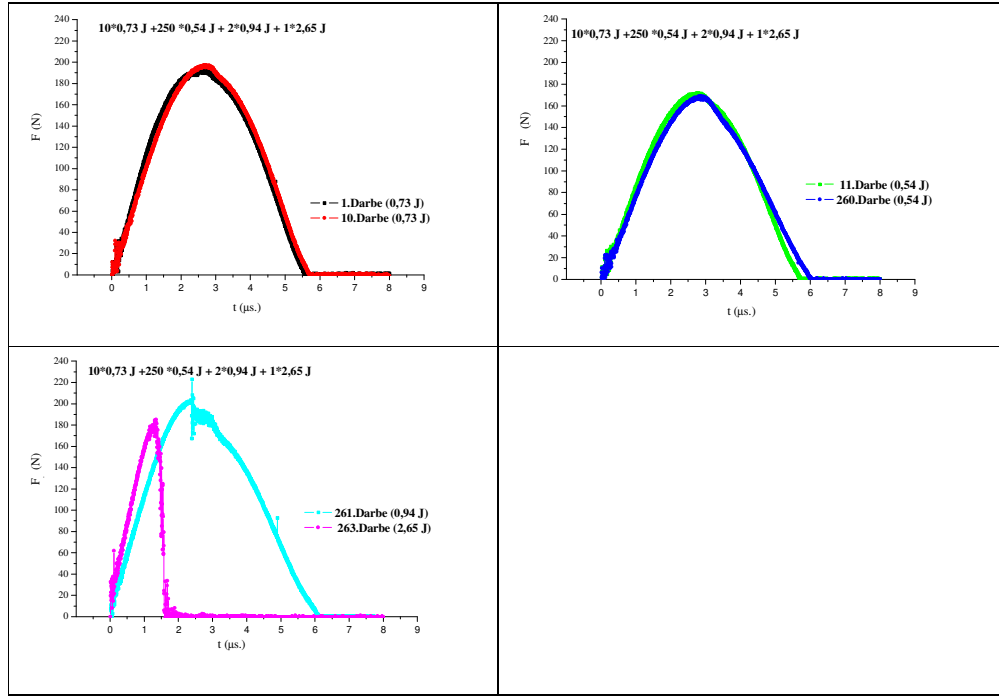


Şekil 4.38: ( $10*0,73 J + 250*0,54 J + 2*0,94 J$ ) karma darbe grubunun etkilediği numunenin X.e.v.–darbe sayısı grafiği

Şekil 4.38’de ( $10*0,73 J + 250*0,54 J + 2*0,94 J$ ) karma darbe grubunun etkilediği numunenin X.e.v.–darbe sayısı grafiği gösterilmiştir. Diğer deneylerdeki X.e.v.-darbe sayısı grafiklerinde olduğu gibi dört farklı darbe enerjisi nedeniyle dört farklı deformasyon dağılımı oluşmuştur.

Darbe enerjisinin büyüklüğüne ve uygulanış sırasına göre deformasyon dağılımı değişmektedir. İlk önce 0,73 J değerli darbeler nedeniyle deformasyon miktarı yüksek çıkmakta, 0,73 J değerli darbelerden hemen sonra 0,54 J değerli darbelerin uygulanmasıyla deformasyon miktarı azalmaktadır. Yalnız şu da belirtilmelidir ki, her bir darbe enerjisi kendi içerisinde numuneye belli bir deformasyon oluşturmaktadır.

Şekil 4.38'den da açıkça her darbe enerjisi için deformasyon miktarının arttığı görülmektedir. 0,54 J değerli darbelerin ardından numuneye uygulanan 0,94 J değerli darbelerle deformasyon miktarı tekrar yükselmiş ve numunenin gözle görülür bir şekilde hasara uğramasına neden olmuştur. Deformasyon miktarı 0,54 J değerli darbelerde 0.50-0.55 mm iken 0,94 J değerli darbelerde deformasyon miktarı bir anda 8.5 mm'ye kadar yükselmiştir.



Şekil 4.39: ( $10 \cdot 0,73 \text{ J} + 250 \cdot 0,54 \text{ J} + 2 \cdot 0,94 \text{ J}$ ) karma darbe grubunun etkidiği numunenin üst üste grafikleri

Şekil 4.39'da ( $10 \cdot 0,73 \text{ J} + 250 \cdot 0,54 \text{ J} + 2 \cdot 0,94 \text{ J}$ ) karma darbe grubunun etkidiği numunenin üst üste grafikleri gösterilmiştir. Grafiklerden numunenin 0,73 J değerli darbelerle F-t eğrilerindeki simetriyi kaybettiğini ve plastik deformasyonların oluştuğu görülmektedir. 0,54 J değerli darbenin etkimesiyle sanki numunedeki deformasyon hızı azalmıştır. Bu sayede malzemenin darbe-yorulma ömrü artmıştır. 0,94 J değerli darbe ile numune kırılmadığı için ayrıca 2,65 J değerli darbeye maruz bırakılmıştır. 2,65 J değerli darbe nedeniyle F-t grafiklerinin süresi yaklaşık olarak 2 µs.'ye kadar inmiştir. Normalde numune 0,54-0,94 J değerleri arasındaki bir değerde kırılırdı son vuruştaki F-t grafiğinin süresi 2 µs'den daha yüksek çıkacaktı. Bunun

nedeni ise numunenin tek bir vuruşta 2,65 J değerinde kırılabilmesidir. 2,65 J değerli darbe enerjisinden önce numuneye farklı darbe enerjileri uygulandığı için numunede kalıntı gerilmeler oluşmuştur. Kalıntı gerilmelerin oluşmasıyla numuneyi kıran 2,65 J değerli darbenin oluşturduğu F-t grafiğinin süresi azalmıştır.

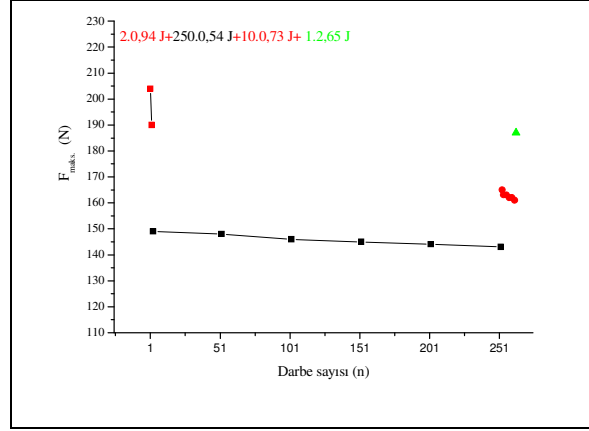
#### **4.3.3. (2\*0,94 J + 250\*0,54 J + 10\*0,73 J) Karma Darbe Grubu Sonuçları**

Karma darbe gruplarının sonuncusu (2\*0,94 J + 250\*0,54 J + 10\*0,73 J) olup tutarlı sonuçların çıkması için her deney üç kez tekrarlanmıştır. Bu karma grupta ilk önce yüksek darbe enerjisinden düşük darbe enerjisine daha sonra ise düşük darbe enerjisinden yüksek darbe enerjisine doğru, numuneler darbelere maruz bırakılmıştır.

Bölüm 4.3.2'deki karma gruba benzemekte olup, en yüksek darbe enerjisinden bir anda en düşük darbe enerjisine düşüldüğünde ne gibi sonuçlar elde edileceğini görmek için yapılmıştır.

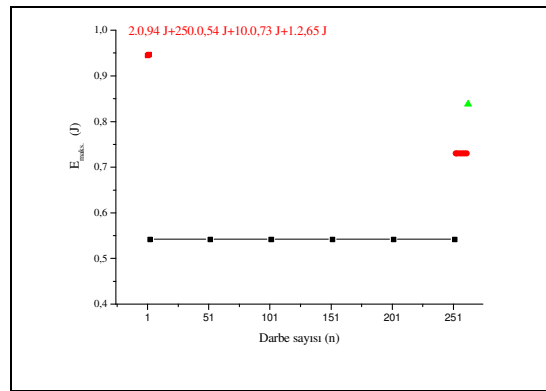
Şekil 4.40'da (2\*0,94 J + 250\*0,54 J + 10\*0,73 J) karma darbe grubu için  $F_{maks}$ -darbe sayısı grafiği gösterilmiştir. Burada dört farklı bölge bulunmaktadır. Grafiğin içindeki ilk soldaki kırmızı içi dolu kare ile belirtilen 0,94 J değerli darbelerin  $F_{maks}$  değerleridir. Siyah içi dolu kare ile gösterilen ikinci bölge ise 0,54 J değerli darbelerin numunede yarattığı  $F_{maks}$  olup, içi dolu kırmızı daire ile gösterilen bölge ise 0,73 J değerli darbelerin  $F_{maks}$  değerlerini belirtmektedir. En son olarak ta 2,65 J değerli darbenin  $F_{maks}$  değeri yeşil üçgen ile gösterilmiştir. Bu karma deney grubunda ilk önce 0,94 J değerli darbeler uygulanmıştır. Bu nedenle  $F_{maks}$  değerleri diğer bölümlerde belirtilen  $F_{maks}$ -darbe sayısı grafiklerindeki  $F_{maks}$  değerlerine göre daha yüksek çıkmıştır. 0,94 J değerli darbelerin numuneye uygulandığı darbe sayısı az olduğu için  $F_{maks}$  değerleri çok azalmamış fakat numunede deformasyona neden olmuştur. 0,94 J değerli darbelerden sonra 0,54 J değerli darbelerin uygulanmasıyla numunenin  $F_{maks}$  değerleri çok azalmıştır. Fakat  $F_{maks}$  değerlerindeki düşüş miktarı yavaşlamıştır. Bunun nedeni de 0,54 J değerli darbelerin enerji seviyesinin 0,94 J değerli darbelerin enerji seviyesine göre düşük olmasıdır. 0,54 J değerli darbelerden sonra tekrar yüksek bir darbe enerjisi olan 0,73 J numuneye uygulanmıştır. İlk önce 0,73 J uygulandığında 170-175 N arasında çıkan  $F_{maks}$  değerleri numuneye daha önce

başka darbe enerjileri uygulanması nedeniyle yaklaşık olarak 160 N'a düşmüştür. Bu da malzemenin içerisinde deformasyonların oluştuğunun bir göstergesidir.



Şekil 4.40: (2\*0,94 J + 250\*0,54 J + 10\*0,73 J) karma darbe grubunun etkidiği numunenin  $F_{maks}$ -darbe sayısı grafiği

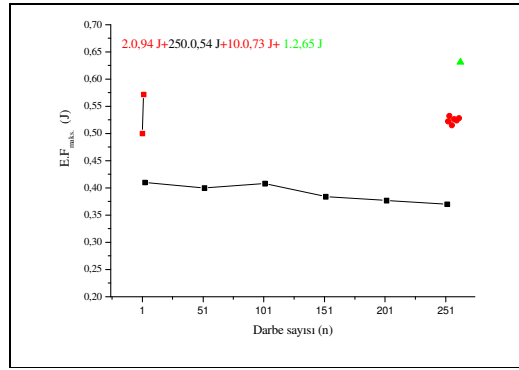
$E_{maks}$ -darbe sayısı grafiği diğer bölümlerde sunulan  $E_{maks}$ -darbe sayısı grafiklerindeki gibi darbe enerjilerinin büyüklüğüne göre dört bölgeden oluşmaktadır. Darbe enerjisinin büyüklüğüne göre azalmakta ya da artmaktadır. Her bölgedeki  $E_{maks}$  değerleri kendi içerisinde düzgün dağılım göstermiştir. Bu karma deney grubunda da Bölüm 4.3.2'de anlatılan grup gibi yüksek enerjiden başlanılıp daha sonra düşük darbe enerjisi ve en sonunda da yüksek darbe enerjisi uygulandığı için benzer bir  $E_{maks}$  dağılımı göstermiştir.



Şekil 4.41: (2\*0,94 J + 250\*0,54 J + 10\*0,73 J) karma darbe grubunun etkidiği numunenin  $E_{maks}$ -darbe sayısı grafiği

Şekil 4.42’de karma darbeye maruz bırakılmış numunenin  $E.F_{maks}$ -darbe sayısı grafiği gösterilmiştir.  $E.F_{maks}$ -darbe sayısı grafiği  $F_{maks}$ -darbe sayısı ve  $E_{maks}$ -darbe sayısı grafikleri ile uyum göstermektedir. Artan darbe enerjisiyle  $F_{maks}$  değeri artmakta,  $F_{maks}$  değerinin de artmasıyla numunenin  $E.F_{maks}$  değerleri artmaktadır.

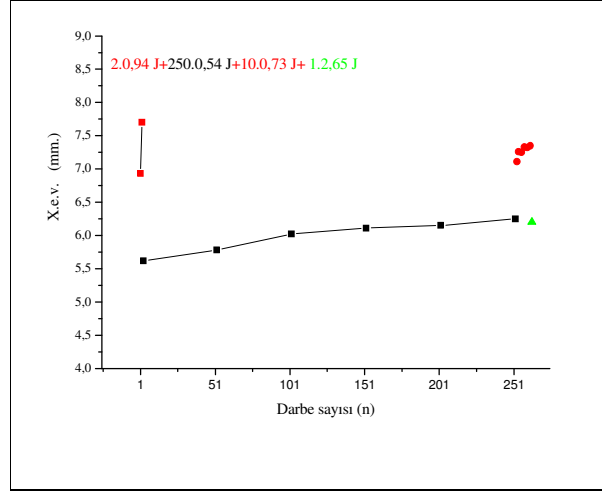
0,54 J değerli darbelerin etkimesiyle doğal olarak  $E.F_{maks}$  değerleri düşmüştür.  $E.F_{maks}$  değerleri her darbe enerjisinde düzgün bir dağılım göstermiştir. Daha önce yapılan deneylerdeki gibi  $E.F_{maks}$  değerleri  $E_{maks}$  değerlerinden düşük çıkmaktadır.



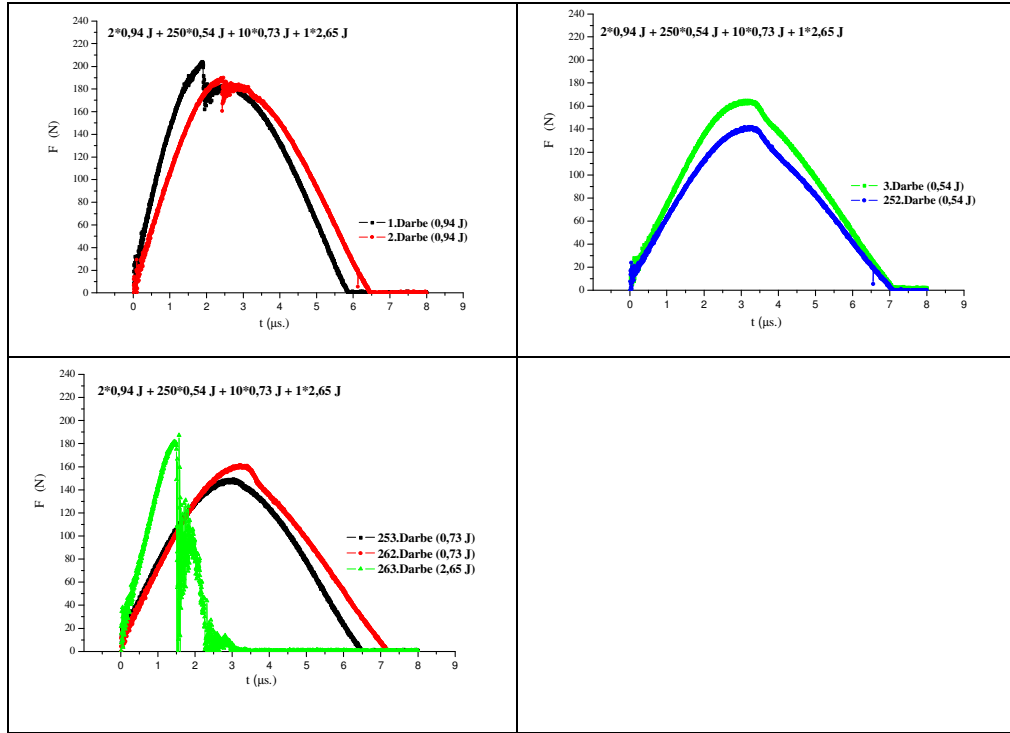
Şekil 4.42: ( $2 \cdot 0,94 \text{ J} + 250 \cdot 0,54 \text{ J} + 10 \cdot 0,73 \text{ J}$ ) karma darbe grubunun etkilediği numunenin  $E.F_{maks}$ -darbe sayısı grafiği

Şekil 4.43’te ( $2 \cdot 0,94 \text{ J} + 250 \cdot 0,54 \text{ J} + 10 \cdot 0,73 \text{ J}$ ) karma darbe grubunun etkilediği numunenin X.e.v.-darbe sayısı grafiği gösterilmiştir. Diğer deneylerdeki X.e.v.-darbe sayısı grafiklerinde olduğu gibi dört farklı darbe enerjisi nedeniyle dört farklı deformasyon dağılımı oluşmuştur. Darbe enerjisinin büyüklüğüne ve uygulanış sırasına göre deformasyon dağılımı değişmektedir. İlk önce 0,94 J değerli darbeler nedeniyle deformasyon miktarı yüksek çıkmakta, 0,94 J değerli darbelerden hemen sonra 0,54 J değerli darbelerin uygulanmasıyla deformasyon miktarı azalmaktadır. Yalnız şu da belirtmelidir ki, her bir darbe enerjisi kendi içerisinde numuneye belli bir deformasyon oluşturmaktadır. Şekil 4.43’te açıkça her darbe enerjisi için deformasyon miktarının arttığı görülmektedir. 0,54 J değerli darbelerin ardından numuneye uygulanan 0,73 J değerli darbeler ile deformasyon miktarı tekrar yükselmiş ve numunenin gözle görülür bir şekilde hasara uğramasına neden

olmuştur. Deformasyon miktarı 0,54 J değerli darbede 0.50-0.6 mm iken 0,73 J değerli darbede deformasyon miktarı bir anda 7.5-8 mm'ye kadar yükselmiştir.

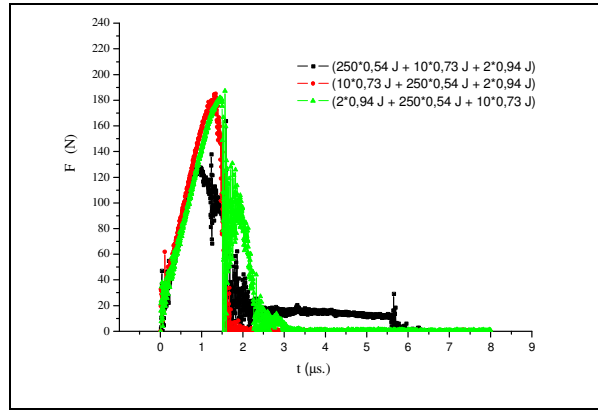


Şekil 4.43: ( $2 \cdot 0,94 \text{ J} + 250 \cdot 0,54 \text{ J} + 10 \cdot 0,73 \text{ J}$ ) karma darbe grubunun etkideği numunenin X.e.v.– darbe sayısı grafiği



Şekil 4.44: ( $2 \cdot 0,94 \text{ J} + 250 \cdot 0,54 \text{ J} + 10 \cdot 0,73 \text{ J}$ ) karma darbe grubunun etkideği numunenin üst üste grafikleri

Şekil 4.44'te ( $2*0,94 \text{ J} + 250*0,54 \text{ J} + 10*0,73 \text{ J}$ ) karma darbe grubunun etkidiği numunenin üst üste grafikleri gösterilmiştir. Grafikler Bölüm 4.3.2'de elde edilen Şekil 4.39'daki grafiklere benzemektedir. Buradaki tek fark 0,94 J değerli darbelerin öncelikle numuneye etki etmesi sonucu numunede daha büyük bir deformasyon bölgesi oluşmasıdır. Oluşan bu deformasyon bölgesi nedeniyle F-t eğrisinin simetrisi bozulmuştur. Daha sonra 0,54 J değerli darbelerin numuneye etkimesiyle  $F_{maks}$  değerleri azalmış ve eğrinin plastik bölgesi toparlanmıştır. Karma darbe grubunun numuneyi hasara uğratamaması nedeniyle 2,65 J değerli darbe ile numune kırılmıştır.



Şekil 4.45: Karma darbe gruplarının son vuruşlarının üst üste grafiği

Şekil 4.45'te karma darbe gruplarının 2,65 J değerli darbenin üst üste grafikleri gösterilmiştir. ( $10*0,73 \text{ J} + 250*0,54 \text{ J} + 2*0,94 \text{ J}$ ) karma darbe grubu ile ( $2*0,94 \text{ J} + 250*0,54 \text{ J} + 10*0,73 \text{ J}$ ) karma darbe grubunun F-t grafiğindeki değerler yaklaşık olarak aynı çıkmasına rağmen, ( $250*0,54 \text{ J} + 10*0,73 \text{ J} + 2*0,94 \text{ J}$ ) karma darbe grubunun F-t grafiğindeki değerler daha düşük çıkmıştır. Bunun nedeni 0,54 J değerli darbelerden sonra 0,73 ve 0,94 J değerli darbelerin etkimesiyle numunede daha fazla deformasyonlar meydana gelmesidir. Numunenin dayanımının azalmasıyla 2,65 J değerli darbede daha düşük  $F_{maks}$  verileri elde edilmiştir.

#### **4.4. Birbirinden Farklı Darbe Enerji Çiftleriyle Yapılan Darbelere Maruz Kalan Numunelerin Darbe Davranışlarının İncelenmesi**

Bölüm 4.1.'de belirlediğimiz on bir farklı darbe enerjisinden uygun olan çiftler seçilerek numunelere uygulanmıştır. Üç ayrı grup oluşturulmuştur. Her grupta farklı üç darbe enerjisi seçilmiş ve ilk iki darbe enerjisi her grupta farklı olurken son darbe enerjisi 0,54 J olarak belirlenmiştir. Numunelere ilk önce birbirinden farklı iki enerjide darbe etki etmiş, daha sonra ise numune hasara uğrayıncaya kadar 0,54 J değerli darbelere maruz bırakılarak 0,54 J değerli darbeden kaç adet numuneye vurulması gerektiği ve bu esnada oluşan hasar mekanizmaları incelenmiştir. Her gruptaki ilk iki darbe enerji birbirleri ile aynı vuruş sayısı olacak şekilde yer değiştirilerek numunelerin bu durumda da 0,54 J değerli darbe enerjisine göre ne kadar vuruş sayısından sonra hasara uğradığı bulunmuştur. Her gruptaki değişen darbe enerjilerinin numuneye uygulanış sayısı Bölüm 4.1'deki veriler ışığında seçilmiştir. Bu iki farklı darbe enerjisinin numuneye uygulayacağı darbe sayısı makul ölçülerde tutulmuştur. Çünkü numunenin 0,54 J değerli son darbeler ile kırılması istenmektedir.

Her bir deney grubunun  $F_{maks}$ ,  $E_{maks}$ ,  $E.F_{maks}$ ,  $X.e.v.$  ve  $F.t$  grafikleri çizilip yorumlanmıştır. Deney grupları kendi içinde "n" tekrarlı darbe sayısının karşılaştırılmasıyla yorumlanmıştır.

##### **4.4.1. (50\*0,69 J + 75\*0,61 J + n\*0,54 J) ve (75\*0,61 J + 50\*0,69 J + n\*0,54 J) Tekrarlı Darbelere Maruz Kalan Numunelerin Darbe Davranışlarının İncelenmesi**

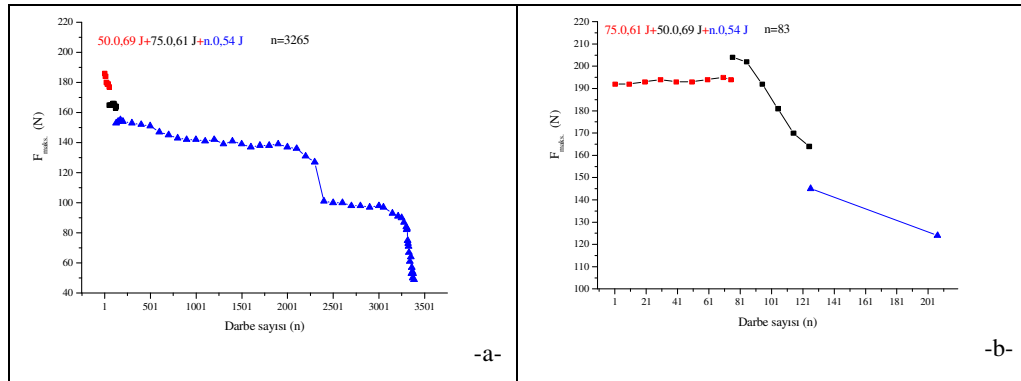
Birbirinden farklı darbe enerji çiftleriyle yapılan darbelere maruz kalan numunelerin darbe davranışlarının incelenmesi için yapılan ilk deney çifti (50\*0,69 J + 75\*0,61 J + n\*0,54 J) ve (75\*0,61 J + 50\*0,69 J + n\*0,54 J)'dir. Şekil 4.46'da (50\*0,69 J + 75\*0,61 J + n\*0,54 J) ve (75\*0,61 J + 50\*0,69 J + n\*0,54 J) darbe grubunun etkideği numunelerin  $F_{maks}$ -darbe sayısı grafikleri karşılaştırılmıştır. Şekilden de görüldüğü gibi ilk deney grubunda numune 3265 tekrarlı darbe sayısında hasara uğrarken ikinci deney grubunda bu değer 83'e kadar düşmüştür. Numunelerin dayanımları



öngörüldüğü gibi azalmaktadır.  $F_{maks}$  değerleri önceden tahmin edildiği gibi çıkmıştır.  $(50*0,69 J + 75*0,61 J + n*0,54 J)$  deney grubunda uygulanan darbe enerjilerinin giderek azalmasıyla  $F_{maks}$ -darbe sayısı grafiğindeki  $F_{maks}$  değerleri düzgün bir şekilde azalmıştır.

$(75*0,61 J + 50*0,69 J + n*0,54 J)$  deney grubunda ise 0,61 J değerli darbelerden sonra 0,69 J değerli darbeler numuneye uygulandığı için  $F_{maks}$  değerinde bir artış gözlemlenmektedir. 0,61 J değerli darbelerle zaten zayıflayan numune 0,69 J değerli darbeler nedeniyle iyice dayanımı azalmıştır.

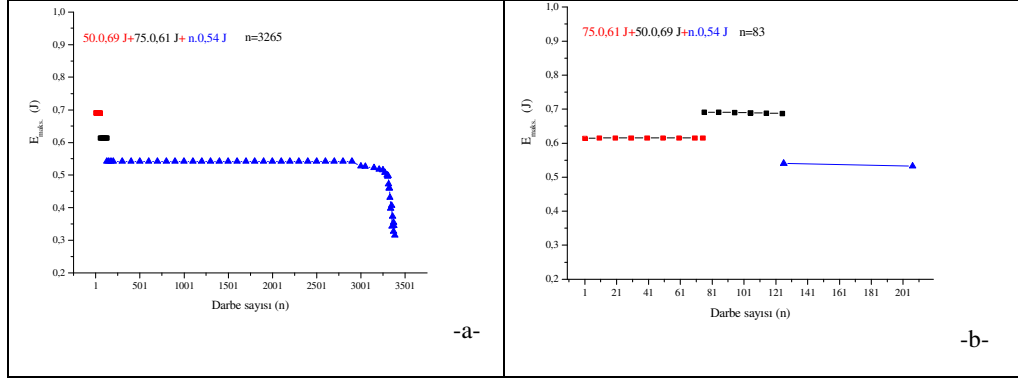
Grafiklerdeki ilk 0,54 J değerli darbelerin  $F_{maks}$  değerlerini karşılaştırırsak, Şekil 4.46-a'da  $F_{maks}$  değeri yaklaşık olarak 160 N çıkarken, Şekil 4.46-b'de  $F_{maks}$  değerinin 140 N olduğu görülmektedir. Bu da ikinci darbe grubunun artan darbe enerjisi nedeniyle numuneyi daha fazla etkilediğini göstermektedir.



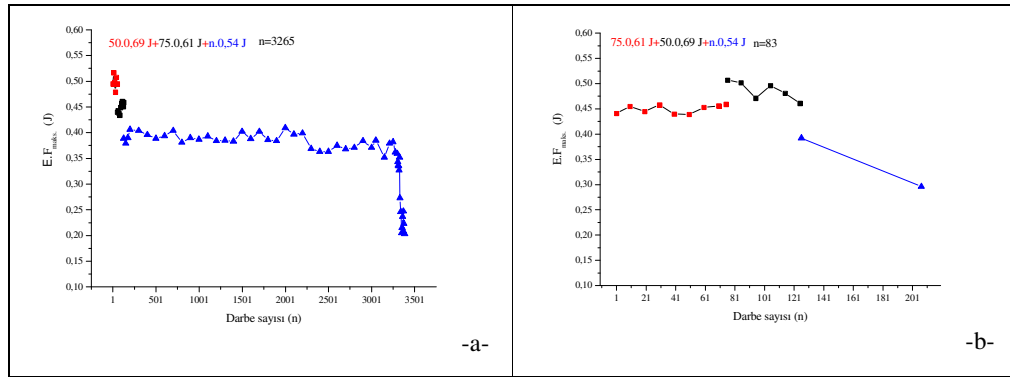
Şekil 4.46:  $(50*0,69 J + 75*0,61 J + n*0,54 J)$  ve  $(75*0,61 J + 50*0,69 J + n*0,54 J)$  darbe grubunun etkilediği numunelerin  $F_{maks}$ -darbe sayısı grafikleri

Şekil 4,47'de  $E_{maks}$ -darbe sayısı grafiklerinden azalan veya artan darbe enerjileriyle numunelerin absorbe ettiği enerjinin nasıl değiştiği görülmektedir. Burada en önemli husus 0,54 J değerli darbeyi belirten içi mavi renkle doldurulmuş üçgenlerle ifade edilen eğrideki ani düşüştür. Bu ani düşüş yaklaşık olarak  $F_{maks}$ -darbe sayısı grafiklerindeki 0,54 J değerli darbe bölgesindeki ani düşüşün olduğu yerdir. Bu ani düşüşle birlikte numunelerin hasara uğradığı görülmektedir. Her farklı darbe enerjisi

farklı  $E_{maks}$  değerleri içerdiğinden grafiklerde üç ayrı bölge görülmektedir. Bu üç ayrı bölge kendi içerisinde düzgün bir şekilde değişmektedir.



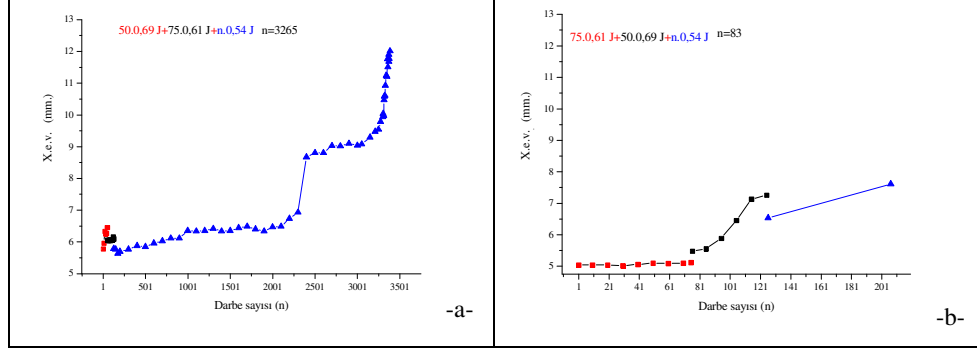
Şekil 4.47:  $(50*0,69 J + 75*0,61 J + n*0,54 J)$  ve  $(75*0,61 J + 50*0,69 J + n*0,54 J)$  darbe grubunun etkidiği numunelerin  $E_{maks}$ -darbe sayısı grafikleri



Şekil 4.48:  $(50*0,69 J + 75*0,61 J + n*0,54 J)$  ve  $(75*0,61 J + 50*0,69 J + n*0,54 J)$  darbe grubunun etkidiği numunelerin  $E.F_{maks}$ -darbe sayısı grafikleri

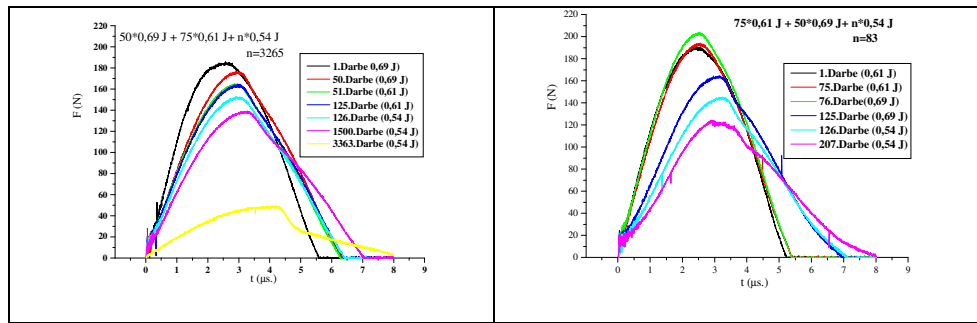
Şekil 4.48  $(50*0,69 J + 75*0,61 J + n*0,54 J)$  ve  $(75*0,61 J + 50*0,69 J + n*0,54 J)$  darbe grubunun etkidiği numunelerin  $E.F_{maks}$ -darbe sayısı grafiklerini göstermektedir. Grafiklerdeki  $E.F_{maks}$  değerleri F-t grafiklerinde  $F_{maks}$  değerinin sol tarafında kalan alandır.  $F_{maks}$  değerinin değişmesi bu alanın büyüklüğünü değiştirmektedir. Numuneye farklı darbe enerjilerinin etkimesiyle  $E.F_{maks}$  değerleri değişmektedir. Grafiklerde üç farklı bölge oluşmasının nedeni budur.  $E.F_{maks}$  değerleri Şekil 4.47'de gösterilen  $E_{maks}$  değerlerinin yaklaşık olarak yarısıdır. Görülen başka önemli hususta iki farklı grafikte de 0,54 J değerli darbelerin ilk

E.F<sub>maks</sub> değeri yaklaşık olarak aynıdır. Şekil 4.49-a'da ki X.e.v.-darbe sayısı grafiğinden 0,69 ve 0,61 J değerli darbelerin numunenin deformasyon miktarına fazla etki etmediği bu yüzden de numuneyi kırmak için gereken 0,54 J değerli darbeden fazla uygulanması gerektiği görülmektedir.



Şekil 4.49: (50\*0,69 J + 75\*0,61 J + n\*0,54 J) ve (75\*0,61 J + 50\*0,69 J + n\*0,54 J) darbe grubunun etkidiği normal numunelerin X.e.v – darbe sayısı grafikleri

İki grafik arasındaki en önemli fark ilk 0,54 J değerli darbenin uygulandığı andaki deformasyon miktarı değerleridir. (50\*0,69 J + 75\*0,61 J + n\*0,54 J) darbe grubunda bu değer 5.5 mm civarında iken (75\*0,61 J + 50\*0,69 J + n\*0,54 J) darbe grubunda bu değer 6.5 mm civarındadır. Bu deformasyon miktarlarındaki farklılık nedeniyle 0.54 J ile gerçekleştirilen tekrarlı darbenin vuruş sayısı değişmektedir.



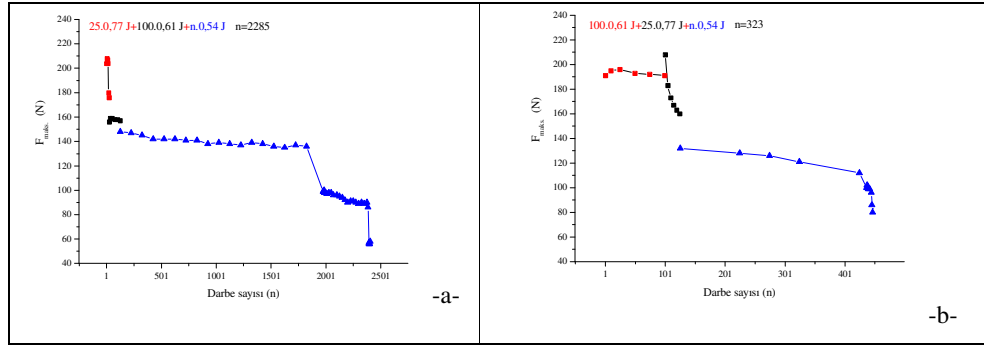
Şekil 4.50: (50\*0,69 J + 75\*0,61 J + n\*0,54 J) ve (75\*0,61 J + 50\*0,69 J + n\*0,54 J) darbe grubunun etkidiği numuneler için çizilen üst üste eğriler

Her iki darbe grubunda da F-t grafiklerindeki eğrilerin simetrisi ilk vuruşlarda bozulmadığı Şekil 4.50-a ve b' de görülmektedir. Yalnız (50\*0,69 J + 75\*0,61 J +

$n \cdot 0,54 \text{ J}$ ) darbe grubunda  $0,69 \text{ J}$  değerli darbe enerjisi,  $(75 \cdot 0,61 \text{ J} + 50 \cdot 0,69 \text{ J} + n \cdot 0,54 \text{ J})$  darbe grubundaki  $0,61 \text{ J}$  değerli darbe enerjisinden yüksek olduğu için daha az darbe sayısında F-t. grafiğinin simetrisi bozulmuştur.

#### 4.4.2. $(25 \cdot 0,77 \text{ J} + 100 \cdot 0,61 \text{ J} + n \cdot 0,54 \text{ J})$ ve $(100 \cdot 0,61 \text{ J} + 25 \cdot 0,77 \text{ J} + n \cdot 0,54 \text{ J})$ Tekrarlı Darbelere Maruz Kalan Numunelerin Darbe Davranışlarının İncelenmesi

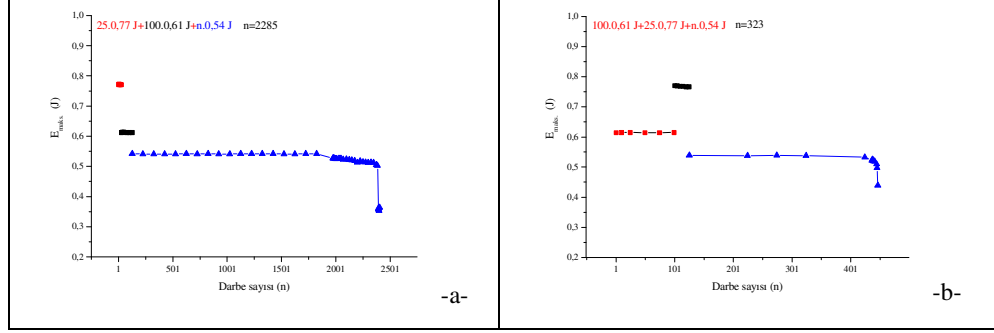
Birbirinden farklı darbe enerji çiftleriyle yapılan darbelere maruz kalan numunelerin darbe davranışlarının incelenmesi için yapılan ikinci deney çifti  $(25 \cdot 0,77 \text{ J} + 100 \cdot 0,61 \text{ J} + n \cdot 0,54 \text{ J})$  ve  $(100 \cdot 0,61 \text{ J} + 25 \cdot 0,77 \text{ J} + n \cdot 0,54 \text{ J})$ 'dir.



Şekil 4.51:  $(25 \cdot 0,77 \text{ J} + 100 \cdot 0,61 \text{ J} + n \cdot 0,54 \text{ J})$  ve  $(100 \cdot 0,61 \text{ J} + 25 \cdot 0,77 \text{ J} + n \cdot 0,54 \text{ J})$  darbe grubunun etkidiği numunelerin  $F_{\text{maks}}$ -darbe sayısı grafikleri

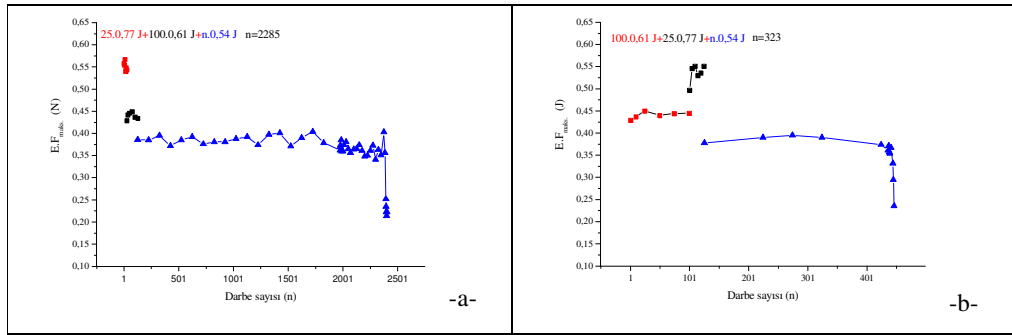
Şekil 4.51'de  $(25 \cdot 0,77 \text{ J} + 100 \cdot 0,61 \text{ J} + n \cdot 0,54 \text{ J})$  ve  $(100 \cdot 0,61 \text{ J} + 25 \cdot 0,77 \text{ J} + n \cdot 0,54 \text{ J})$  darbe grubunun etkidiği numunelerin  $F_{\text{maks}}$ -darbe sayısı grafikleri karşılaştırılmıştır. Şekilden de görüldüğü gibi ilk deneyde numune 2285 darbe sayısında hasara uğrarken ikinci deneyde bu değer 323'e kadar düşmüştür. Numunelerin dayanımları öngörüldüğü gibi azalmaktadır.  $F_{\text{maks}}$  değerleri önceden tahmin edildiği gibi çıkmıştır.  $(25 \cdot 0,77 \text{ J} + 100 \cdot 0,61 \text{ J} + n \cdot 0,54 \text{ J})$  deney grubunda uygulanan darbe enerjisinin giderek azalmasıyla  $F_{\text{maks}}$ -darbe sayısı grafiğindeki  $F_{\text{maks}}$  değerleri düzgün bir şekilde azalmıştır.  $(100 \cdot 0,61 \text{ J} + 25 \cdot 0,77 \text{ J} + n \cdot 0,54 \text{ J})$  deney grubunda ise  $0,61 \text{ J}$  değerli darbelerden sonra  $0,77 \text{ J}$  değerli darbeler ile numuneye darbe uygulandığı için  $F_{\text{maks}}$  değerinde bir artış gözlemlenmektedir. Bu artıştan sonra  $0,61 \text{ J}$  değerli darbelerle zayıflayan numune  $0,77 \text{ J}$  değerli darbelerde dayanımı iyice

azalmıştır. Grafiklerdeki ilk 0,54 J değerli darbelerin  $F_{maks}$  değerlerini karşılaştırırsak, Şekil 4.51-a'da  $F_{maks}$  değeri yaklaşık olarak 150 N çıkarken, Şekil 4.51-b'de  $F_{maks}$  değerinin 130 N olduğu görülmektedir. Bu da ikinci darbe grubunun artan darbe enerjisi nedeniyle numuneyi daha fazla etkilediğini göstermektedir.



Şekil 4.52:  $(25*0,77 J + 100*0,61 J + n*0,54 J)$  ve  $(100*0,61 J + 25*0,77 J + n*0,54 J)$  darbe grubunun etkidiği numunelerin  $E_{maks}$ -darbe sayısı grafikleri

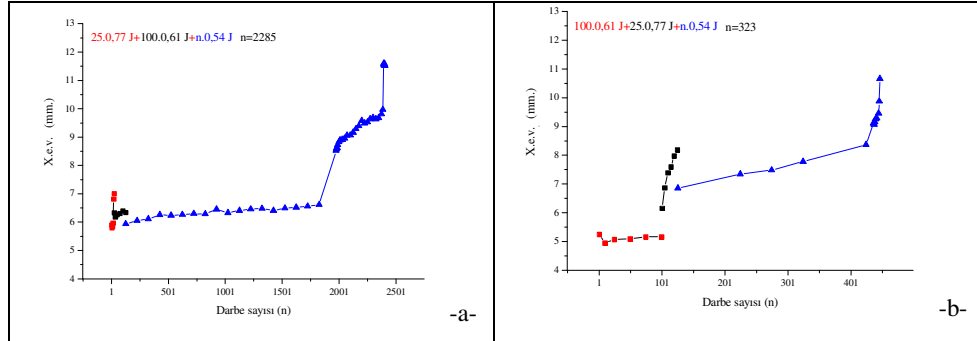
Şekil 4.52'de  $E_{maks}$ -darbe sayısı grafiklerinden azalan veya artan darbe enerjileriyle numunelerin absorbe ettiği enerjinin nasıl değiştiği görülmektedir. Burada en önemli husus 0,54 J değerli darbeyi belirten içi mavi renkle doldurulmuş üçgenlerle ifade edilen eğrideki ani düşüştür. Bu ani düşüş yaklaşık olarak  $F_{maks}$ -darbe sayısı grafiklerindeki 0,54 J değerli darbe bölgesindeki ani düşüşün olduğu yerdir. Bu ani düşüşle birlikte numunelerin hasara uğradığı görülmektedir. Her farklı darbe enerjisi farklı  $E_{maks}$  değerleri içerdiğinden grafiklerde üç ayrı bölge görülmektedir. Bu üç ayrı bölge kendi içerisinde düzgün bir şekilde değişmektedir.



Şekil 4.53:  $(25*0,77 J + 100*0,61 J + n*0,54 J)$  ve  $(100*0,61 J + 25*0,77 J + n*0,54 J)$  darbe grubunun etkidiği numunelerin  $E.F_{maks}$ -darbe sayısı grafikleri

Şekil 4.53’de  $(25*0,77 \text{ J} + 100*0,61 \text{ J} + n*0,54 \text{ J})$  ve  $(100*0,61 \text{ J} + 25*0,77 \text{ J} + n*0,54 \text{ J})$  darbe grubunun etkidiği numunelerin  $E.F_{maks.}$ -darbe sayısı grafikleri gösterilmiştir. Numuneye farklı darbe enerjilerinin etkimesiyle  $E.F_{maks}$  değerleri değişmektedir. Grafiklerde üç farklı bölge oluşmasının nedeni de budur.  $E.F_{maks}$  değerleri Şekil 4.52’de gösterilen  $E_{maks}$  değerlerinin yaklaşık olarak yarısıdır. Görülen başka önemli hususta iki farklı grafikte de 0.54 J değerli darbenin ilk  $E.F_{maks}$  değeri yaklaşık olarak aynıdır.

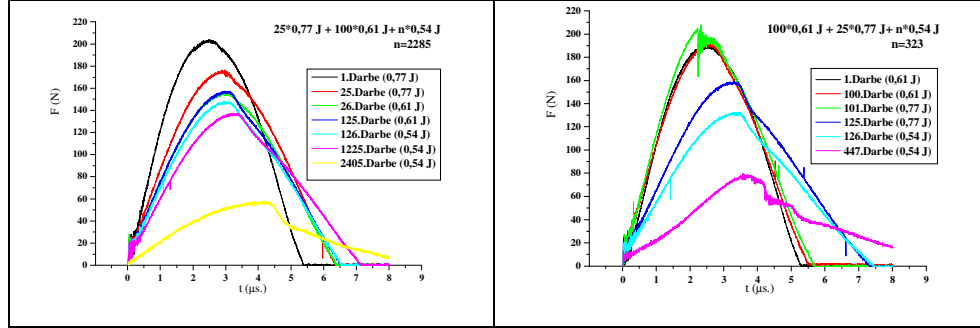
$(25*0,77 \text{ J} + 100*0,61 \text{ J} + n*0,54 \text{ J})$  darbe grubunun X.e.v.-darbe sayısı eğrisinde 0,54 J değerli darbelerin numuneye fazla uygulanması nedeniyle 0,77 ve 0,61 J değerli darbelerin deformasyon miktarına etkisi Şekil 4.54-a’da pek iyi görülememektedir. Şekil 4.54-a ve b’den görülen en önemli fark 0,54 J değerli darbelerin başladığı andaki deformasyon miktarı değerleridir.  $(25*0,77 \text{ J} + 100*0,61 \text{ J} + n*0,54 \text{ J})$  darbe grubunda bu değer 5.5-6 mm iken  $(100*0,61 \text{ J} + 25*0,77 \text{ J} + n*0,54 \text{ J})$  darbe grubunda bu değer 7 mm’dir. Bu deformasyon miktarlarındaki farklılık nedeniyle 0.54 J ile gerçekleştirilen tekrarlı darbenin vuruş sayısı değişmektedir.



Şekil 4.54:  $(25*0,77 \text{ J} + 100*0,61 \text{ J} + n*0,54 \text{ J})$  ve  $(100*0,61 \text{ J} + 25*0,77 \text{ J} + n*0,54 \text{ J})$  darbe grubunun etkidiği numunelerin X.e.v.-darbe sayısı grafikleri

Şekil 4.55’te  $(25*0,77 \text{ J} + 100*0,61 \text{ J} + n*0,54 \text{ J})$  ve  $(100*0,61 \text{ J} + 25*0,77 \text{ J} + n*0,54 \text{ J})$  darbe grubunun etkidiği numuneler için çizilen üst üste eğriler görülmektedir.  $(100*0,61 \text{ J} + 25*0,77 \text{ J} + n*0,54 \text{ J})$  darbe grubunun F-t grafiğindeki eğrilerinin simetrisi ilk vuruşlarda bozulmamıştır. Daha önceki bölümlerde de belirtildiği gibi düşük darbe enerjisiyle başlayıp daha sonra yüksek enerjili darbe

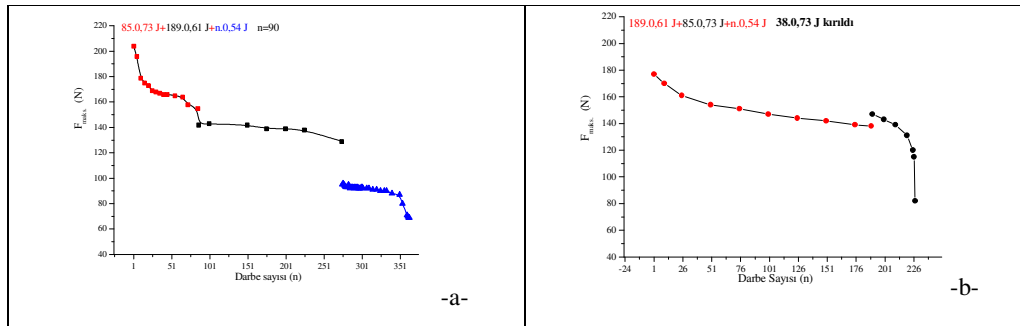
uygulandığında numunede daha fazla hasar oluşmaktadır. İki F-t grafiğine bakıldığında bu açık bir şekilde görülmektedir.



Şekil 4.55:  $(25*0,77 J + 100*0,61 J + n*0,54 J)$  ve  $(100*0,61 J + 25*0,77 J + n*0,54 J)$  darbe grubunun etkideği numuneler için çizilen üst üste eğriler

#### 4.4.3. $(85*0,73 J + 189*0,61 J + n*0,54 J)$ ve $(189*0,61 J + 85*0,73 J + n*0,54 J)$ Tekrarlı Darbelere Maruz Kalan Numunelerin Darbe Davranışlarının İncelenmesi

Birbirinden farklı darbe enerji çiftleriyle yapılan darbelere maruz kalan numunelerin darbe davranışlarının incelenmesi için yapılan son deney çifti  $(85*0,73 J + 189*0,61 J + n*0,54 J)$  ve  $(189*0,61 J + 85*0,73 J + n*0,54 J)$ 'dir. İlk iki darbe enerjisiyle yapılan vuruş sayıları makul ölçüde tutulup numunenin 0,54 J değerli darbelerle hasara uğraması sağlanmıştır. Fakat  $(189*0,61 J + 85*0,73 J + n*0,54 J)$  darbe grubunun etkideği numune 0,54 J değerli darbeler uygulanmadan hasara uğramıştır.

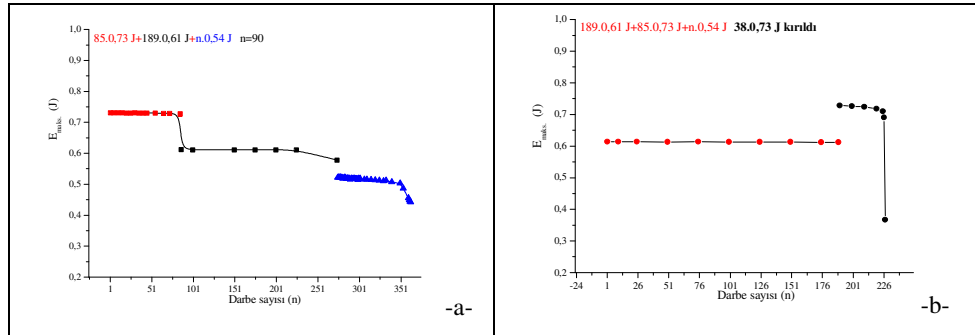


Şekil 4.56:  $(85*0,73 J + 189*0,61 J + n*0,54 J)$  ve  $(189*0,61 J + 85*0,73 J + n*0,54 J)$  darbe grubunun etkideği numunelerin  $F_{maks}$ -darbe sayısı grafikleri

Şekil 4.56'da  $(85*0,73 \text{ J} + 189*0,61 \text{ J} + n*0,54 \text{ J})$  ve  $(189*0,61 \text{ J} + 85*0,73 \text{ J} + n*0,54 \text{ J})$  darbe grubunun etkidiği numunelerin  $F_{\text{maks}}$ -darbe sayısı grafikleri karşılaştırılmıştır. Şekil 4.56-a'dan numunenin 0,54 J değerli darbe ile 90 vuruşta kırıldığı, Şekil 4.56-b'den ise 0,73 J değerli darbenin 0,61 J değerli darbeden sonra fazla gelmesi nedeniyle numunenin 38. 0,73 J değerli darbeye kırıldığı görülmektedir.

Bölüm 4.1'de  $F_{\text{maks}}$ -darbe sayısı grafiklerinde belirtilen ilk iki bölgeye geçildiği görülmektedir. 0,61 J değerli darbeler nedeniyle ikinci bölgede gelişme olmuş ve tabakalar arası bölgede delaminasyonlar artmıştır. 0,54 J değerli darbeler ikinci ve üçüncü bölgelerin ilerlemesini sağlamıştır.

Şekil 4.56-b'de ise numuneye ilk önce 0,61 J değerli darbeler uygulanmıştır. 0,61 J değerli darbenin ilk vuruşunda okunan  $F_{\text{maks}}$  değerinden numunenin zaten dayanımının kötü olduğu görülmektedir. 0,61 J değerli darbelerle birinci ve ikinci bölgelere geçilmiş, daha sonra 0,73 J değerli darbelerin uygulanmasıyla numune dayanamayıp kırılmıştır.

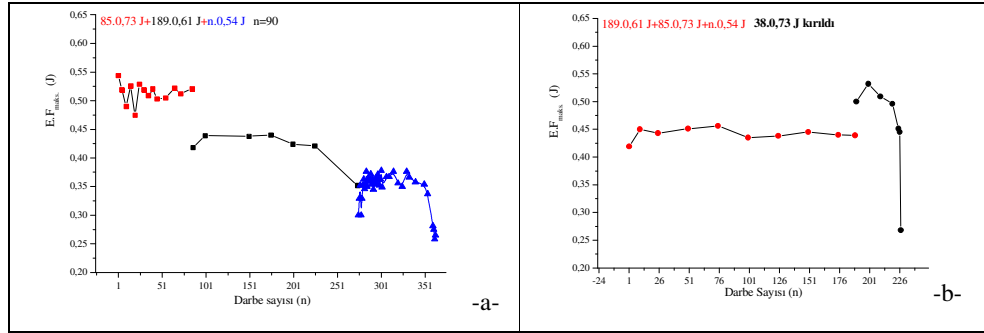


Şekil 4.57:  $(85*0,73 \text{ J} + 189*0,61 \text{ J} + n*0,54 \text{ J})$  ve  $(189*0,61 \text{ J} + 85*0,73 \text{ J} + n*0,54 \text{ J})$  darbe grubunun etkidiği numunelerin  $E_{\text{maks}}$ -darbe sayısı grafikleri

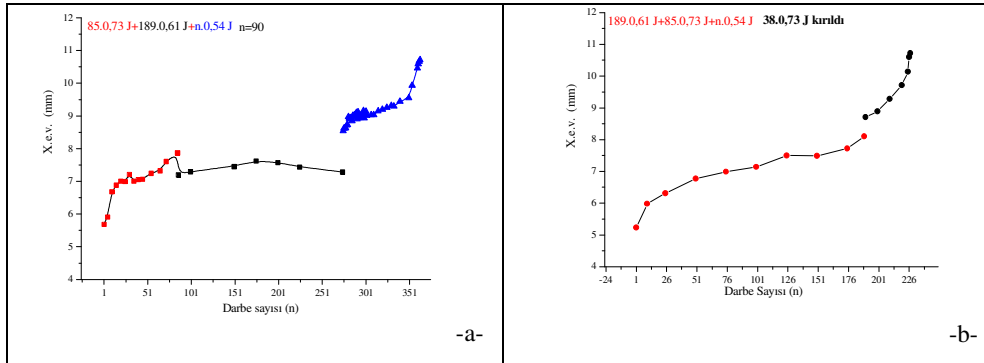
Şekil 4.57-a ve b'deki  $E_{\text{maks}}$ -darbe sayısı grafiklerinden azalan veya artan darbe enerjisiyle numunenin absorbe ettiği enerjinin nasıl değiştiği görülmektedir. Burada en önemli husus 0,54 J değerli darbelerin etki ettiği eğrideki ani düşüştür. Bu ani düşüşle malzemenin hasara uğradığı görülmektedir. Diğer numunede 38. 0,73 J değerli darbeye numune kırıldığı için iki bölge bulunmaktadır.



Şekil 4.58’de  $(85*0,73 J + 189*0,61 J + n*0,54 J)$  ve  $(189*0,61 J + 85*0,73 J + n*0,54 J)$  darbe grubunun etkidiği normal numunelerin  $E.F_{maks}$ -darbe sayısı grafikleri gösterilmiştir. Numuneye farklı darbe enerjilerinin etkimesiyle  $E.F_{maks}$  değerleri değişmektedir. Grafiklerde farklı eğrilerin oluşmasının nedeni de budur.  $E.F_{maks}$  değerleri Şekil 4.57’de gösterilen  $E_{maks}$  değerlerinin yaklaşık olarak yarısıdır.



Şekil 4.58:  $(85*0,73 J + 189*0,61 J + n*0,54 J)$  ve  $(189*0,61 J + 85*0,73 J + n*0,54 J)$  darbe grubunun etkidiği numunelerin  $E.F_{maks}$ -darbe sayısı grafikleri

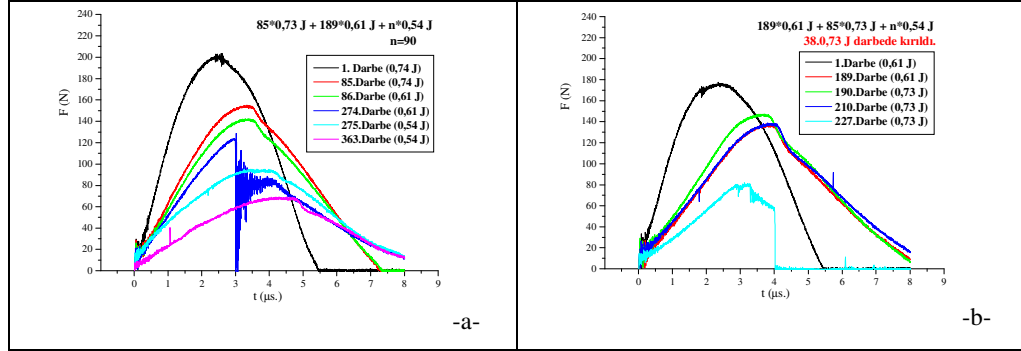


Şekil 4.59:  $(85*0,73 J + 189*0,61 J + n*0,54 J)$  ve  $(189*0,61 J + 85*0,73 J + n*0,54 J)$  darbe grubunun etkidiği numunelerin  $E.F_{maks}$ -darbe sayısı grafikleri

Şekil 4.59’da X.e.v.-darbe sayısı grafiklerinden farklı darbe enerjilerinin numunedeki deformasyon miktarını farklı ölçüde etkilediği görülmektedir.  $(85*0,73 J + 189*0,61 J + n*0,54 J)$  darbe grubunda 0,73 J değerinden sonra 0,61 J değerli darbelerin uygulanmasıyla deformasyon miktarı birden azalmış ama numuneye 189 kez uygulanmasına rağmen 0,73 J değerli darbelerin neden olduğu deformasyon miktarına ulaşamamıştır. Numunelerdeki deformasyon miktarı her darbe enerjisinin

kendi içerisindeki çevriminde hep artmaktadır. Bu da her vuruştan sonra numunenin daha fazla hasara uğradığını göstermektedir.

(189\*0,61 J + 85\*0,73 J + n\*0,54 J) darbe grubunun X.e.v.-darbe sayısı grafiğinde ise iki farklı bölge görülmektedir. Bu grafikte de farklı darbe enerjileri nedeniyle bir anda deformasyon miktarının yükseldiği görülmektedir.



Şekil 4.60: (85\*0,73 J + 189\*0,61 J + n\*0,54 J) ve (189\*0,61 J + 85\*0,73 J + n\*0,54 J) darbe grubunun etkidiği numuneler için çizilen üst üste eğriler

(85\*0,73 J + 189\*0,61 J + n\*0,54 J) ve (189\*0,61 J + 85\*0,73 J + n\*0,54 J) darbe grubunun etkidiği numuneler için çizilen üst üste eğrileri Şekil 4.60'da gösterilmiştir. İlk önce 0,73 J değerli darbelerin uygulanmasıyla numunenin F-t grafiğindeki simetri bozulmuş ve malzemede plastik bölge oluşmuştur. Ayrıca 0,73 J değerli darbelerden sonra 0,61 J değerli darbelerin uygulanmasıyla numunenin F-t eğrisinde 274. darbeye gözle görülür bir değişim görülmüştür. Daha sonra 0,54 J değerli darbelere geçilince numune kendini tekrar toparlamış ve 90. 0,54 J değerli darbeye kırılmıştır. Şekil 4.60-b'de ise 0,73 J değerli darbelerin uygulanmaya başlamasından kısa bir süre sonra numune darbeye dayanamamış ve hasara uğramıştır.

## 5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

### 5.1. Sonuçların Tartışılması

4 farklı başlık altında sürekli karbon fiber takviyeli polieterimid (KF-PEI) kompozit malzemelerin düşük darbeleri tekrarlı yükler altındaki darbe-yorulma davranışları incelenmiştir. Her bölümde elde edilen deney verilerinden çıkan sonuçlar ayrı ayrı ele alınacaktır.

1.Bölüm: Bu çalışmada, sürekli karbon fiber takviyeli Polieterimid (PEI) kompozit malzemelerin enstrumante edilmiş Ceast sarkaç tipli (Resil 25) test cihazı yardımıyla 0,54-0,94 J arasında değişen düşük enerjili darbe-yorulma davranışları incelenmiştir. Kompozit malzemelerin performanslarının uygulanan darbe enerjisine ve darbe tekrar sayısına bağlı olduğu tespit edilmiştir.

$F_{maks}$  değerlerinin artan darbe tekrar sayısı ile 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 sayısı ile 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.

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

2.Bölüm: 2a) Bu çalışmada sayıları 100÷500 arasında değişen 0,54 J değerindeki darbeler uygulanmıştır. Hemen ardından kırılıncaya kadar 0,94 J, 0,85 J, 0,77 J değerli darbeler altındaki darbe-yorulma davranışları incelenmiştir.

2.b) Ayrıca bu bölümde ilk önce sayıları 1÷5 arasında değişen 0,94 J değerli darbeler uygulanmıştır, hemen ardından hasara uğrayıncaya kadar 0,54 J değerli darbeler ile darbe-yorulma davranışları incelenmiştir. Deneyler sonucunda elde edilenler aşağıdaki şekilde açıklanmıştır.

Düşük darbe enerjisi uygulandıktan sonra daha yüksek darbe enerjisiyle numuneyi hasara uğratmak için yaptığımız deney gruplarının sonuçları  $F_{maks}$ ,  $E_{maks}$ ,  $E.F_{maks}$ ,  $X.e.v.$  ve  $F-t$  cinsinden olup, her bir deney için ayrı ayrı çizilmiştir. 0,57 J değerinden sonra vurulan ilk 0,94 J, 0,85 J, 0,77 J değerli darbelerin  $F_{maks}$ ’ları daha yüksek çıkmaktadır. Numuneler artan 0,57 J değerli darbe enerjisiyle yeterli seviyede iç hasarlara sahip olduktan sonra 0,94 J, 0,85 J, 0,77 J değerli darbelerle kırılmıştır.

$E_{maks}$ -vuruş sayısı grafiklerinden  $F_{maks}$ -vuruş sayısı grafiklerindeki gibi 0,57 J değerli darbelerden sonra numuneye uygulanan ilk 0,94 J, 0,85 J, 0,77 J değerli darbelerin  $E_{maks}$  değerleri 0,57 J değerli darbeye göre ani bir şekilde artmaktadır.  $E_{maks}$  değerindeki bu ani artışla malzemenin enerji absorpsiyonu artmış, bu sayede numune daha az vuruş sayısıyla kırılmıştır. Daha öncede belirtildiği gibi 0,57 J değerli darbelerin  $E.F_{maks}$  dağılımı  $E_{maks}$  ve  $F_{maks}$  grafiklerindeki gibi düzgün bir şekilde değişirken, 0,94 J, 0,85 J, 0,77 J değerli darbelerin numuneye uygulanmasıyla  $E.F_{maks}$  değerleri birden artmış ve grafiklerdeki eğrinin düzgün değişimini değiştirmiştir. Numunenin hasara uğraması için gereken deformasyon miktarına yaklaşılmısıyla 0,57 J değerinden sonra uygulanacak olan 0,94 J, 0,85 J, 0,77 J değerli darbelerin numuneyi hasara uğratması için gereken deformasyon aralığı azalmıştır. Yüksek darbe enerjisi uygulandıktan sonra daha düşük darbe enerjisiyle numuneyi hasara uğratmak için yapılan deney grubunda elde edilen sonuçlar  $F_{maks}$ ,  $E_{maks}$ ,  $E.F_{maks}$ ,

X.e.v. ve F-t cinsinden olup, her bir deney için ayrı ayrı çizilmiştir. Bu deneyin amacı düşük enerjiden yüksek enerjiye geçerken malzemede oluşan deformasyon dağılımı değişimlerinin, yüksek enerjiden düşük enerjiye geçerken oluşan deformasyon dağılımı değişimleriyle kıyaslanmasıdır.

0,94 J değerli darbelerin uygulanmasından sonra 0,57 J değerli darbelerin  $F_{maks}$  değerleri daha düşük seviyelerden başlamaktadır.  $E_{maks}$ -vuruş sayısı eğrilerinden, farklı darbe enerji sebebiyle farklı  $E_{maks}$  dağılımı sergiledikleri gözlemlenmiştir.

Artan 0,94 J değerli darbe vuruş sayısı nedeniyle malzemenin absorbe edebileceği enerji azalmış ve daha erken vuruş sayılarında kırılmıştır.  $E.F_{maks}$ -tekrar vuruş sayısı grafiklerindeki  $E.F_{maks}$  değerlerinin bulunan  $E_{maks}$  değerlerinin yaklaşık olarak yarısı kadar olduğu görülmüştür. 0,94 J değerli darbelerden sonra 0,57 J değerli darbelerin uygulanmasıyla deformasyon miktarında ani bir azalma görülmektedir. Darbe enerjisindeki azalma nedeniyle ani bir deformasyon miktarı düşüşü yaşanmıştır. Daha sonra ise artan darbe sayısı ve daha önceden numuneye tatbik edilmiş 0,94 J değerli darbeler nedeniyle numunenin deformasyon miktarı hızlı bir şekilde artmaktadır.

3.Bölüm: Karma darbelere maruz kalan numunelerin darbe davranışlarının incelenmesi bölümünde, 0,54-0,94 J arasında değişen düşük enerjili darbelerle darbe-yorulma davranışları incelenmiştir. Deneyler 3 farklı darbe enerjisi (0,54 J, 0,73 J, 0,94 J), 3 farklı darbe sayılarıyla (250,10,2) gerçekleştirilmiştir. Her grup için toplam vuruş sayısı aynı olup, darbe enerjilerinin sıraları değiştirilmiştir. Üç farklı gruptaki darbeler uygulandıktan sonra hasarlanan malzemeler 2,65 J değerli son bir darbeyle kırılmıştır.

3.a) Bu karma grubunda ( $250 \cdot 0,54 \text{ J} + 10 \cdot 0,73 \text{ J} + 2 \cdot 0,94 \text{ J}$ ) düşük darbe enerjisinden yüksek darbe enerjisine doğru numuneler darbelerle maruz bırakılmıştır. 0,54 J değerli darbelerden sadece 250 kez numuneye vurulduğu için  $F_{maks}$  değerlerinde fazla bir değişim olmamıştır. Daha sonra ise artan darbe enerjisiyle  $F_{maks}$  değerlerinde ani bir artış gözlenmiştir. 0,73 J değerli darbelerden sonra numuneye 0,94 J' lük darbeler uygulanmış ve malzeme hasara uğratılmıştır.

(250\*0,54 J + 10\*0,73 J + 2\*0,94 J) karma darbe grubunun etkidiği numunelerin  $E_{maks}$ -darbe sayısı grafiğine göre, artan darbe enerjisi seviyesiyle  $E_{maks}$  değerlerinin de arttığı görülmüstür. Artan darbe enerjisiyle  $F_{maks}$  değeri artmakta,  $F_{maks}$  değerinin de artmasıyla numunenin  $E.F_{maks}$  değerleri artmıştır. (250\*0,54 J + 10\*0,73 J + 2\*0,94 J) karma darbe grubunun etkidiği numunelerin X.e.v.-darbe sayısı grafiğinden artan darbe enerjisiyle numunede oluşan deformasyon miktarının doğru orantılı olarak arttığı görülmüstür.

3.b) Bu karma grubunda (10\*0,73 J + 250\*0,54 J + 2\*0,94 J) ilk önce yüksek darbe enerjisinden düşük darbe enerjisine daha sonra ise düşük darbe enerjisinden yüksek darbe enerjisine doğru numuneler darbelere maruz bırakılmıştır. (250\*0,54 J + 10\*0,73 J + 2\*0,94 J) karma darbe grubunun etkidiği numunelerin  $F_{maks}$ -darbe sayısı grafiğinden farkı 0,73 J değerli darbelerle başlanmış olup ilk 0,54 J değerli darbeye  $F_{maks}$  değerinin yaklaşık olarak 155-165 N. olduğu görülmüstür. (250\*0,54 J + 10\*0,73 J + 2\*0,94 J) karma darbe grubunun etkidiği numunelerin  $E_{maks}$ -darbe sayısı grafiğinde her bir farklı darbe enerjisinin neden olduğu  $E_{maks}$  değerleriyle, (10\*0,73 J + 250\*0,54 J + 2\*0,94 J) karma darbe grubunun etkidiği numunelerin  $E_{maks}$ -darbe sayısı grafiğindeki her bir farklı darbe enerjisinin neden olduğu  $E_{maks}$  değerleri yaklaşık olarak aynı çıkmıştır. Artan darbe enerjisiyle  $F_{maks}$  değeri artmakta,  $F_{maks}$  değerinin de artmasıyla numunenin  $E.F_{maks}$  değerleri artmaktadır. 0,54 J değerli darbelerin etkimesiyle doğal olarak  $E.F_{maks}$  değerleri dşmstr. Diğer deneylerdeki X.e.v.-darbe sayısı grafiklerinde olduğu gibi dört farklı darbe enerjisi nedeniyle dört farklı deformasyon dağılımı oluşmuştur. Darbe enerjisinin büyüklüğüne ve uygulanış sırasına göre deformasyon dağılımı değişmektedir.

3.c) Bu karma grubunda (2\*0,94 J + 250\*0,54 J + 10\*0,73 J) ilk önce yüksek darbe enerjisinden düşük darbe enerjisine daha sonra ise düşük darbe enerjisinden yüksek darbe enerjisine doğru numuneler darbelere maruz bırakılmıştır. Bu karma deney grubunda ilk önce 0,94 J değerli darbelerle başlanmış ve bu nedenle  $F_{maks}$  değerleri diğer bölümlerde belirtilen  $F_{maks}$ -darbe sayısı grafiklerindeki  $F_{maks}$  değerlerine göre daha yüksek çıkmıştır. İlk nce 0,73 J uygulandığında 170-175 N arasında çıkan  $F_{maks}$  değerleri numuneye daha önce başka darbeler uygulanması nedeniyle yaklaşık olarak 160 N'a kadar dşmstr. Bu da malzemenin içerisinde deformasyonların

oluşturduğunun bir göstergesidir. Bu karma deney grubunda da bir önceki gruptaki ( $10 \cdot 0,73 \text{ J} + 250 \cdot 0,54 \text{ J} + 2 \cdot 0,94 \text{ J}$ ) gibi yüksek enerjiden başlanılıp daha sonra düşük darbe enerjisi ve en sonunda da yüksek darbe enerjisi uygulandığı için benzer bir  $E_{\text{maks}}$  dağılımı göstermiştir. Artan darbe enerjisiyle  $F_{\text{maks}}$  değeri artmakta,  $F_{\text{maks}}$  değerinin de artmasıyla numunenin  $E \cdot F_{\text{maks}}$  değerleri artmaktadır. Diğer deneylerdeki X.e.v.-darbe sayısı grafiklerinde olduğu gibi dört farklı darbe enerjisi nedeniyle dört farklı deformasyon dağılımı oluşmuştur. Darbe enerjisinin büyüklüğüne ve uygulanış sırasına göre deformasyon dağılımı değişmektedir. İlk önce 0,94 J değerli darbeler nedeniyle deformasyon miktarı yüksek çıkmakta, 0,94 J değerli darbelerden hemen sonra 0,54 J değerli darbelerin uygulanmasıyla deformasyon miktarı azalmaktadır.

**4.Bölüm:** Birbirinden farklı darbe enerji çiftleriyle yapılan darbelere maruz kalan numunelerin darbe davranışlarının incelenmesi çalışmasında iki farklı darbe enerjisi seçilip, numuneye birinci darbeden “x” adet ardından ikinci darbeden “y” adet uygulanmıştır. Son olarak da 0,54 J değerli darbelerden “n” adet kırılıncaya kadar uygulanmıştır. Uygulamanın devamında bu iki farklı darbe enerjisi yer değiştirilerek numuneye uygulanmıştır. Yine ardından 0,54 J değerli darbelerden “n” adet kırılıncaya kadar uygulanmıştır.

Her bir deney grubunun  $F_{\text{maks}}$ ,  $E_{\text{maks}}$ ,  $E \cdot F_{\text{maks}}$ , X.e.v. ve F-t grafikleri çizilip yorumlanmıştır. Deney grupları kendi içerisinde “n” tekrarlı darbe sayısı karşılaştırılarak yorumlanmıştır.

Deney gruplarında uygulanan darbe enerjisinin giderek azalmasıyla  $F_{\text{maks}}$ -darbe sayısı grafiğindeki  $F_{\text{maks}}$  değerleri düzgün bir şekilde azalmıştır. Ters uygulamalarda ise darbe enerjilerinin artması nedeniyle  $F_{\text{maks}}$  değerlerinde bir artış gözlenmiştir.  $E_{\text{maks}}$ -darbe sayısı grafiklerinden azalan veya artan darbe enerjisiyle numunenin absorbe ettiği enerjinin nasıl değiştiği görülmüştür.

$E_{\text{maks}}$ -darbe sayısı grafiklerindeki  $E_{\text{maks}}$  değerindeki ani düşüş  $F_{\text{maks}}$ -darbe sayısı grafiklerindeki  $F_{\text{maks}}$  değerinin aniden düştüğü noktada başladığı gözlemlenmiştir. Numuneye farklı darbe enerjilerinin etkimesiyle  $E \cdot F_{\text{maks}}$  değerlerinin değiştiği ve  $E_{\text{maks}}$  değerlerinin yaklaşık olarak yarısı olduğu tespit edilmiştir. Numunelerde oluşan

deformasyon miktarlarının uygulanan darbe enerjisi büyüklüğüne, darbe tekrar sayısına ve uygulanan darbe enerjilerinin sırasına göre değiştiği görülmüştür.

## **5.2. Öneriler**

Bu çalışmada, sürekli karbon fiber takviyeli Polieterimid (KF-PEI) kompozit malzemesi kullanılmıştır. Dolayısı ile farklı fiber yönlendirmelerine sahip karbon fiber takviyeli PEI kompozit malzemelerin darbe-yorulma özellikleri araştırılabilir.

Gerçekleştirilen deneylerde numune boyutları aynı olan numuneler kullanılmıştır. Bundan sonra yapılacak çalışmalarla değişik boyutlara sahip numuneler standartlara uygun olarak seçilip, numunelerin istenilen darbe-yorulma özellikleri elde edilebilir.

Çalışmamızda farklı darbe enerjileri ile numuneye darbe uygulanmış ve darbe-yorulma özellikleri incelenmiştir. Numuneye arka arkaya farklı darbe enerjisi uygulandığında ve bu darbe enerjilerinin numuneye etki ettiği darbe sayısı bilinirse numunenin ne zaman sonra hasara uğrayacağı bulanık mantık yöntemiyle bulunabilir.



## KAYNAKLAR

- ASTM Standard D 4812-06, “Standard test method for Unnotched 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).
- 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 Moraes, 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).
- Go´mez-del Ri´o, T., Zaera, R., Barbero, E., Navarro, C., “Damage in CFRPs due to low velocity impact at low temperature”, *Composites: Part B* **36**, 41–50, (2005).
- Jones, F.R., “Handbook of polymer-fiber composites”, *Longman Scientific and Technical, Polymer science and technology series, ISBN: 0-582-06554-2, England*, (1994).
- 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).
- Pantelakis, Sp., Labeas, G., “Constant and variable amplitude fatigue damage of laminated fibrous composites”, *Applied Composite Materials*, (2001).
- Rakow, J. F., Pettinger, A.M., “Failure analysis of composite structures in aircraft accidents”, *ISASI 2006 Annual Air Safety Seminar, Cancun, Mexico*, 1-27, (2006).
- Roy, R., Sarkar, B.K., Bose, N.R., “Impact fatigue of glass fiber-vinylester resin composites”, *Composites: Part A* **32**, 871-876, (2001).

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”, *Wiley, ISBN: 0-471-62534-5*, (2000).

Shyr, T. W., Pan, Y.H., “Impact resistance and damage characteristics of composite laminates”, *Composite Structures* 62, 193–203, (2003).

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

Sınmazçelik, T., Arıcı, A. 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 S0266-3538, 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).

Yılmaz, T., “Polimer matrisli kompozitlerin pim ile yük taşıma özelliklerinin incelenmesi”, Doktora Tezi, *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kocaeli, 1-52, (2006).

Zhao, G.P., Cho, C.D., “Damage initiation and propagation in composite shells subjected to impact”, *Composite Structures* 78, 91–100, (2007).

[www.tencate.com](http://www.tencate.com) (Ziyaret Tarihi: 10 Nisan 2007).

## KİŞİSEL YAYINLAR

1. 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*, İtalya, Haziran, 2007.

2. Mustafa Özgür BORA, Onur ÇOBAN, Tamer SINMAZÇELİK, İsmail CÜRGÜL, “Farklı Enerjilerde Ardışık Tekrarlı Darbelere Maruz Kalan Polimer Kompozitlerin Darbe Davranışlarının İncelenmesi”, *8.Uluslararası Kırılma Konferansı, İstanbul*, Kasım, 2007 (sunuma kabul edildi).

3. Onur ÇOBAN, Mustafa Özgür BORA, Tamer SINMAZÇELİK, İsmail CÜRGÜL, Volkan GÜNAY, “Tekrarlı Darbelere Maruz Kalan Polimer Kompozitin Kırılma Morfolojisinin Elektron Mikroskobu ile İncelenmesi”, *18. Ulusal Elektronik Mikroskobu Kongresi, Eskişehir*, Ağustos 2007 (sunuma kabul edildi).

4. 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*, İtalya, Haziran, 2007.

5. Onur ÇOBAN, Mustafa Özgür BORA, Tamer SINMAZÇELİK, İsmail CÜRGÜL, “Termal Çevrimlere Maruz Bırakılmış Polimer Kompozitlerin Düşük Enerjili Tekrarlı Darbeler Altındaki Davranışlarının İncelenmesi”, ”, *8.Uluslararası Kırılma Konferansı, İstanbul*, Kasım, 2007 (sunuma kabul edildi).

## ÖZGEÇMİŞ

Ankara'da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini İstanbul'da tamamladı. 2001 yılında girdiği Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü'nden 2005 yılında mezun oldu. 2005'den bu güne Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda öğrenimini sürdürmektedir.

Aralık 2005 yılından beri Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü'nde Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaktadır.



