

**SERAMİK KOMPOZİT ZİRH SİSTEMLERİNİN
DARBE VE BALİSTİK ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ**

Celal EVCİ

**DOKTORA TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**Kasım 2009
ANKARA**

**SERAMİK KOMPOZİT ZIRH SİSTEMLERİNİN
DARBE VE BALİSTİK ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ
(Doktora Tezi)**

Celal EVCİ

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Kasım 2009**

ÖZET

Seramik kompozit zırh sistemleri yüksek balistik koruma sağlayan sistemler olarak gelişmiş zırhlı araçların balistik korumasında yaygın olarak kullanılmaktadır. Ön yüzde kullanılan seramikler, sahip oldukları yüksek sertlik, basma mukavemeti ve aşınma dayanımlarından dolayı mermi üzerinde deforme edici bir gerilme dalgası oluşturmaktadır. Yapısal entegrasyonu temin eden arka katmandaki polimer kompozit ise yüksek enerji sönmleme özelliğiyle mermi veya parçacıkları yakalayıarak penetrasyonu engellemektedir.

Deneysel olarak yürütölen bu tez çalışması kapsamında; seramik kompozit zırh sistemi yapısındaki bileşenlerin ve zırh sisteminin darbe karakteristiği ve darbeye bağılı hasar şekilleri belirlenmiştir. Ağırlık düşürme testleri ile düşük enerjili darbe, atışlı testlerle de yüksek enerjili darbe davranışı ve balistik özellikleri incelenmiştir.

Düşük enerjili darbe testleri, Instron Dynatup markalı üniversal ağırlık düşürme test cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Test sisteminin darbe kuvveti, çarpma hızı ve darbe zamanına ait verileri yüksek hassasiyetle toplamasına bağılı olarak katmanlı yapıdaki kırılma oluşumu ve gelişimi darbe kuvvetine bağılı olarak belirlenmiştir.

Ağırlık düşürme testlerinde E-Cam dokuma, tek yönlü ve aramid dokuma kumaştan üretilen kompozit malzemelerin düşük enerjili darbe hız limitleri bulunmuştur. Kompozit malzemenin darbe davranışında oldukça önemli olan penetrasyon ve perforasyon eşik enerjileri tespit edilmiştir.

Seramik kompozit zırh sisteminin balistik hız limiti ve balistik koruma seviyesi STANAG 4569 ve NIJ standartları doğrultusunda belirlenmiştir. Hacim ve kütle etkinlikleri RHA çeliği referans alınarak bulunmuştur. Balistik darbede kompozit malzemede meydana gelen konik hasar yapısının darbe eksenini etrafında lokalize olduğu, delaminasyon ve matris kırılma alanlarının düşük enerjili darbeye mukayese edildiğinde önemli ölçüde azaldığı görülmüştür.

Bilim Kodu : 914.1.093

Anahtar Kelimeler : Ağırlık düşürme testi, balistik, seramik kompozit zırh, darbe hasarı

Sayfa Adedi : 271

Tez Yöneticisi : Prof.Dr. Müfit GÜLGEÇ

**DETERMINATION OF IMPACT AND BALLISTIC BEHAVIOUR OF
CERAMIC COMPOSITE ARMOUR SYSTEMS**

(Ph.D. Thesis)

Celal EVCİ

**GAZİ UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

November 2009

ABSTRACT

Ceramic composite armour systems are widely used on developed armoured vehicles as high ballistic protection means. Ceramics on the front face of armour system develop stress waves due to their high hardness, compressive strength and wear resistance. With high energy absorption properties, polymer based laminated composites on the back side of armour prevent penetration by holding the bullets and fragments.

This study is an experimental investigation, revealing the impact behaviour and damage pattern in components of ceramic composite armour system. Low energy impact behaviour is studied via drop weight tests while high energy impact behaviour is studied via real ballistic tests.

Low energy impact tests are carried out with an instrumented drop weight impact testing machine, Instron Dynatup. Data accumulation and control system of testing machine precisely gathered the impact loading force, striking velocity of impactor, impact time information to interpret the fracture initiation and development of laminated structure.

Low energy impact penetration velocity limits of laminated composites constructed from unidirectional fibers and woven fabrics of E-Glass and polyester matrix are determined. Two important parameters in impact characterizing of laminated composites, namely penetration and perforation thresholds are found out.

Ballistic limits and protection levels of ceramic composite armour systems are determined according to standard STANAG 4569 and NIJ. Mass and volume efficiencies are calculated with respect to RHA steel. Conical damage structure is localized around impact point in high energy ballistic tests and damage size due to delaminations and fiber fractures are reduced in comparison with low energy drop weight impact tests.

Science Code : 914.1.093
Key Words : Drop weight test, ballistics, ceramic composite armour, impact damage
Page Number : 271
Adviser : Prof.Dr. Müfit GÜLGEÇ

TEŞEKKÜR

Çalıőmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren Prof. Dr. Müfit GÜLGEÇ, Doç.Dr. Tarık BAYKARA, Doç.Dr. Volkan GÜNAY ve Doç.Dr. İbrahim USLAN'a yine kıymetli tecrübelerinden faydalandığım TÜBİTAK MAM'da Baş Uzman Araőtırmacı Alparslan DEMİRURAL ile Kompozit ve Mekanik Test Laboratuarında görevli tüm personele, üzerimde emekleri çok büyük olan annem Medine EVCİ ve babam Naci EVCİ'ye, sabırla beni destekleyen eőim Canan ve kızım Ceyda'ya teőekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xviii
RESİMLERİN LİSTESİ.....	xxiii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xxxii
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	8
2.1. Zırhlı Araçlarda Kullanılan Zırh Çeşitleri.....	9
2.1.1. İnce boşluklu zırh (spaced armour).....	9
2.1.2. Karma (kompozit) zırh.....	10
2.1.3. Patlayıcı reaktif zırh.....	10
2.1.4. Aktif koruma sistemi.....	11
2.2. Mermi-Zırh İlişkisi, Gerilme Dalgaları Etkisi.....	11
2.3. Zırh Çelikleri.....	13
2.4. Kompozit Zırh Sistemleri.....	17
2.4.1. Seramik katmanın özellikleri ve darbe davranışı.....	19
2.4.2. Kompozit malzeme bileşenleri, özellikleri ve yapısı.....	25
2.4.3. Kompozit malzemelerin darbe davranışı ve hasar modları...34	34

Sayfa

2.5. Zırh Sistemi ve Bileşenlerine Ait Darbe Testleri.....	58
2.5.1. Düşük enerjili darbe testleri.....	58
2.5.2. Yüksek enerjili darbe testleri.....	66
2.6. Balistik Test Standartları.....	69
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	70
3.1. Zırh Sistemi Bileşenleri.....	70
3.1.1. Alumina seramik (Al_2O_3).....	70
3.1.2. Bor karbür seramik (B_4C).....	71
3.1.3. Silisyum karbür seramik (SiC).....	73
3.1.4. Kompozit malzeme.....	74
3.1.5. Yüksek mukavemetli homojen haddelenmiş çelik.....	78
3.1.6. Polimer yapıştırıcı.....	79
3.2. Seramik Kompozit Zırh Sistemi Bileşenlerinin Mekanik Testleri.....	79
3.2.1. Üç noktadan eğme testi.....	79
3.2.2. Çekme testi.....	82
3.2.3. Zırh sistemi bileşenlerinin sertlik tarama testleri.....	83
3.3. Darbe Test Düzenegi.....	84
3.4. Balistik Test Düzenegi.....	90
3.4.1. Hız ölçüm ve namlu düzenegi.....	91
3.4.2. Hedef tespit düzenegi.....	93
3.4.3. Balistik testlerde kullanılan mermiler.....	93
3.4.4. Balistik testlerde esas alınan standartlar.....	97
3.5. Zırh Sistemi Hasar Geometrisinin Tespiti.....	102

Sayfa

4. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	105
4.1. Seramik Kompozit Zırh Sistemi Bileşenlerinin Mekanik Testleri....	105
4.1.1. Üç noktadan eğme testi sonuçları.....	105
4.1.2. Çekme testi sonuçları.....	110
4.1.3. Sertlik tarama testi sonuçları.....	110
4.2. Seramik Kompozit Zırh Bileşenlerinin Ağırlık Düşürme Testleri....	113
4.2.1. E-Cam tek yönlü kompozitin (t= 4,00 mm) darbe test sonuçları (Geri sekme, penetrasyon ve perforasyon durumu).....	117
4.2.2. E-Cam düz dokuma kompozitin (t= 3,85 mm) darbe test sonuçları (Geri sekme, penetrasyon ve perforasyon durumu).....	157
4.2.3. Aramid kompozitin (t= 4,00 mm) darbe test sonuçları.....	175
4.2.4. Üç noktadan eğme (statik) ve ağırlık düşürme (dinamik) test sonuçlarının mukayesesi.....	179
4.2.5. Aramid, E-Cam tek yönlü ve dokuma kompozitlerin darbe test sonuçlarının mukayesesi.....	182
4.2.6. Alumina, bor karbür ve silisyum karbür seramik plakaların darbe test sonuçları.....	186
4.3. Seramik Kompozit Zırh Sisteminin Balistik Test Sonuçları.....	210
4.3.1. E-Cam dokuma kumaşla üretilen kompozit malzemenin 7,62 mm NATO FMJ mermi ve 7,62 mm AP mermiyle balistik test sonuçları.....	211
4.3.2. E-Cam ve Aramid (Kevlar) dokuma kumaşla üretilen kompozit malzemenin 7,62 mm FSP mermiyle balistik test sonuçları.....	222
4.3.3. Seramik kompozit zırh sisteminin 7,62 mm AP mermiyle balistik test sonuçları.....	224

	Sayfa
4.4. Homojen Haddelenmiş Yüksek Mukavemetli Çeliğin Balistik Testi.....	250
4.4.1. RHA çeliğinin 7,62 mm AP mermiyle balistik test sonuçları.....	251
4.4.2. RHA çeliğinin balistik darbe altında kırılma davranışı.....	253
4.4.3. RHA çeliklerinin balistik koruma seviyelerinin belirlenmesi.....	256
4.5. Seramik Kompozit Zırh Sistemine Ait Balistik Test Sonuçlarının Değerlendirilmesi ve Referans RHA Çeliğiyle Mukayese Edilmesi.....	256
5. GENEL SONUÇLAR.....	260
KAYNAKLAR.....	264
ÖZGEÇMİŞ.....	271

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Zırh çeliklerinin karşılaştırılması (saç kalınlığı: 25,4 mm).....	15
Çizelge 2.2. Zırh çeliklerinin kimyasal bileşimleri.....	16
Çizelge 2.3. Zırh çeliklerinin mekanik özellikleri.....	16
Çizelge 2.4. Zırh yapımında kullanılan malzeme özellikleri.....	18
Çizelge 2.5. Çeşitli seramiklerin özellikleri.....	22
Çizelge 2.6. Matris, takviye elemanı ve kompozit malzeme yapı tipleri.....	26
Çizelge 2.7. Belli başlı elyafların karşılaştırılması.....	33
Çizelge 2.8. Kinetik enerjili mermilere karşı zırh performansına etki eden faktörler.....	45
Çizelge 2.9. Farklı malzemelerin standart V-çentik, Charpy ve Izod darbe enerjileri.....	59
Çizelge 2.10. NIJ 0101.04 Standardı.....	69
Çizelge 3.1. Alumina seramiğin malzeme özellikleri.....	71
Çizelge 3.2. Aluminanın özgül ağırlık hesabı.....	71
Çizelge 3.3. Bor karbürün özgül ağırlık hesabı.....	72
Çizelge 3.4. Testte kullanılan bor karbürün genel özellikleri.....	72
Çizelge 3.5. Silisyum karbürün özgül ağırlık hesabı.....	73
Çizelge 3.6. Düz dokuma kumaş tekstil özellikleri.....	75
Çizelge 3.7. Polyester reçinenin mekanik özellikleri.....	75
Çizelge 3.8. Dokuma E-Cam kompozit plakaların yapısal özellikleri.....	76
Çizelge 3.9. Tek yönlü E-Cam kompozit plakaların yapısal özellikleri.....	77
Çizelge 3.10. Aramid kumaşın yapısal özellikleri.....	77

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.11. Aramid kumaşla üretilen kompozit plakaların özgül ağırlıkları.....	77
Çizelge 3.12. Homojen haddelenmiş yüksek mukavemetli çeliklerin kimyasal analizleri.....	78
Çizelge 3.13. Homojen haddelenmiş yüksek mukavemetli çeliklerin kimyasal analizleri ve sertlik ölçümü.....	78
Çizelge 3.14. Üç noktadan eğme testi, kompozit deney numune boyutları.....	80
Çizelge 3.15. Çekme test numunesi boyutları.....	83
Çizelge 3.16. Dynatup 9250 ile ASTM standartlarında yapılabilen testler.....	89
Çizelge 3.17. Balistik testlerde kullanılan mermi özellikleri.....	94
Çizelge 3.18. Mermi çekirdek sertlikleri ve kimyasal analizi.....	96
Çizelge 3.19. STANAG 4569'da yer alan balistik koruma seviyeleri.....	98
Çizelge 4.1. E-Cam düz dokuma kompozitin üç noktadan eğme test sonuçları.....	106
Çizelge 4.2. E-Cam tek yönlü kompozitin üç noktadan eğme test sonuçları.....	107
Çizelge 4.3. Aramid düz dokuma kompozitin üç noktadan eğme test sonuçları.....	108
Çizelge 4.4. Seramik malzemelerin sertlik ölçüm sonuçları.....	111
Çizelge 4.5. Kompozit malzemelerin sertlik ölçüm sonuçları.....	112
Çizelge 4.6. Homojen haddelenmiş yüksek mukavemetli çeliğin sertlik ölçüm sonuçları.....	112
Çizelge 4.7. 4,00 mm kalınlıkta E-Cam tek yönlü [0/90] kompozitin ağırlık düşürme ile darbe testlerine ait enerji seviyeleri.....	114
Çizelge 4.8. 3,85 mm kalınlıkta E-Cam dokuma kompozitin ağırlık düşürme ile darbe testlerine ait enerji seviyeleri.....	114

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.9. Düşük enerjili darbe testi uygulanan kompozit malzeme bilgisi ve darbe testlerine ait enerji seviyeleri.....	115
Çizelge 4.10. Düşük enerjili darbe testi uygulanan seramik malzeme bilgisi ve darbe testlerine ait enerji seviyeleri.....	116
Çizelge 4.11. 4 mm E-Cam tek yönlü kompozitin 5 J darbe enerjisinde yükleme ve enerji değerleri.....	118
Çizelge 4.12. 4 mm E-Cam tek yönlü kompozitin 5 J - 27,5 J arası darbe testlerinde bulunan kritik kuvvet değerleri.....	125
Çizelge 4.13. 4 mm E-Cam tek yönlü kompozitin 5 J - 27,5 J enerji aralığında geri sekme karakterli darbe sonuçları.....	127
Çizelge 4.14. 4 mm E-Cam tek yönlü kompozitin 5 J - 27,5 J enerji aralığında geri sekme karakterli darbe hasar yapısı.....	129
Çizelge 4.15. 4 mm E-Cam tek yönlü kompozitin [30-37,5] J enerji aralığında penetrasyon karakterli darbe sonuçları.....	140
Çizelge 4.16. 4 mm E-Cam tek yönlü kompozitin [30-37,5] J enerji aralığında penetrasyon karakterli darbe hasar yapısı.....	141
Çizelge 4.17. 4 mm E-Cam tek yönlü kompozitin [30-37,5] J arası darbe testlerinde bulunan kritik kuvvet değerleri.....	142
Çizelge 4.18. 4 mm E-Cam tek yönlü kompozitin 39 J - 80 J darbe enerjisi aralığında, sürtünmeye bağlı iş hesabı.....	150
Çizelge 4.19. 4 mm E-Cam tek yönlü kompozitin 39 J - 80 J enerji aralığında perforasyonla absorbe edilen enerji değerleri....	150
Çizelge 4.20. 4 mm E-Cam tek yönlü kompozitin [39-80] J darbe enerjisi aralığında perforasyon karakterli darbe sonuçları...	151
Çizelge 4.21. 4 mm E-Cam tek yönlü kompozitin [39-80] J enerji arası darbe testlerinde bulunan kritik kuvvet değerleri.....	151
Çizelge 4.22. 4 mm E-Cam tek yönlü kompozitin [39-80] J enerji aralığında perforasyon karakterli darbe hasar yapısı.....	152
Çizelge 4.23. 3,85 mm E-Cam düz dokuma kompozitin 15 J - 37,5 J arası darbe testlerinde bulunan kritik kuvvet değerleri.....	159

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.24. 3,85 mm E-Cam düz dokuma kompozitin [15-37,5] J ile darbe testlerine ait kritik kuvvet, enerji değerleri ve hasar boyutu	160
Çizelge 4.25. 3,85 mm E-Cam düz dokuma kompozitin [15-37,5] J aralığında geri sekme karakterli darbe hasar yapısı.....	161
Çizelge 4.26. 3,85 mm E-Cam düz dokuma kompozitin 40 J - 47,5 J arası darbe testlerinde bulunan kritik kuvvet değerleri.....	165
Çizelge 4.27. 3,85 mm E-Cam dokuma kompozitin [40-47,5] J arası darbe testlerine ait kritik kuvvet, enerji değerleri ve hasar boyutu.....	167
Çizelge 4.28. 3,85 mm E-Cam düz dokuma kompozitin [50-80] J enerji aralığında darbe testlerinde bulunan kritik kuvvet değerleri	170
Çizelge 4.29. 3,85 mm E-Cam düz dokuma kompozitin [50-80] J arası darbe testlerine ait kritik kuvvet, enerji değerleri ve hasar boyutu.....	172
Çizelge 4.30. 4 mm E-Cam tek yönlü kompozitin 50 J - 80 J darbe enerjisi aralığında, sürtünmeye bağlı iş hesabı	173
Çizelge 4.31. 4 mm E-Cam tek yönlü kompozitin 50 J - 80 J darbe enerjisi aralığında perforasyon sonucu absorbe edilen enerji değerleri	173
Çizelge 4.32. E-Cam düz dokuma kompozitin üç noktadan eğme test sonuçları.....	181
Çizelge 4.33. 3,85 mm E-Cam dokuma ile 4 mm tek yönlü kompozitin penetrasyon, perforasyon ve kritik kuvvet değerleri.....	183
Çizelge 4.34. Ağırlık düşürme testlerine ait V_{50} hızları.....	184
Çizelge 4.35. 12 mm Alumina seramiğin $E_d = [3:60]$ J darbe enerjisi ile ağırlık düşürme testlerinde oluşan kırılma uzunluk ve yüzey alanları.....	196
Çizelge 4.36. Birim alan başına düşen enerji miktarları.....	197
Çizelge 4.37. Seramik ön ve arka yüzünde oluşan kırılma alanı büyüklükleri.....	205

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.38. 10 mm E-Cam kompozitin 7,62 kalibre mermi ile V ₅₀ hesabı.....	212
Çizelge 4.39. 15 mm E-Cam kompozitin 7,62 mm NATO FMJ mermi ile V ₅₀ hesabı.....	219
Çizelge 4.40. 40 mm E-Cam kompozitin 7,62 mm NATO FMJ mermi ile balistik testi.....	220
Çizelge 4.41. 40 mm E-Cam kompozitin 0,30 kalibre AP zırh delici mermi ile balistik testleri.....	221
Çizelge 4.42. 15 mm E-Cam kompozitin 7,62 mm FSP mermiyle V ₅₀ hesabı.....	222
Çizelge 4.43. 7,5 mm Aramid kompozitin 7,62 mm FSP mermiyle V ₅₀ hesabı.....	223
Çizelge 4.44. Aramid ve E-Cam kompozit malzemenin karşılaştırmalı hacim ve kütle etkinlikleri.....	224
Çizelge 4.45. Atışlı testler için hazırlanan seramik katmanlı numuneler...	226
Çizelge 4.46. Atışlı testler için hazırlanan numunelerin alansal yoğunlukları.....	226
Çizelge 4.47. 8,3 mm RHA çeliğinin 7,62 mm AP mermi ile balistik testi..	251
Çizelge 4.48. 15 mm RHA çeliğinin 7,62 mm AP mermi ile balistik testi...	252
Çizelge 4.49. E-Cam kompozitin kütle ve hacim etkinliği (7,62 mm AP tehdidi, MIL-A-12560 RHA zırh çeliği referanslı).....	257
Çizelge 4.50. Zırh sistemlerinin kütle ve hacim etkinliği (7,62 mm AP tehdidi, MIL-A-46100D RHA zırh çeliği referanslı).....	258

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Seramik kompozit zırh dizaynı.....	3
Şekil 2.1. Tahrip plastik mermilerinin hedefte hasar meydana getirme mekanizması.....	13
Şekil 2.2. Seramik kompozit zırhın darbe enerjisini sönmleme süreci.....	23
Şekil 2.3. Seramik kompozit zırha etki eden penetrasyon mekanizması....	24
Şekil 2.4. VARTM ve RTM proses yöntemi şematik gösterimi.....	39
Şekil 2.5. Alüminyum'un statik ve dinamik yük altındaki davranışı.....	41
Şekil 2.6. Kompozit plakada balistik darbe sonucu oluşan hasar yapısı....	42
Şekil 2.7. Merminin kompozit yapı içerisinde meydana getirdiği gerilmeler ve liflerdeki deformasyon.....	44
Şekil 2.8. Zırh arkasında parçacık tutucu kompozitin fonksiyonelliği.....	46
Şekil 2.9. Darbe sonucu kompozit malzemede oluşan hasar çeşitleri.....	50
Şekil 2.10. Matris kırılması ve delaminasyon hasar oluşumu.....	52
Şekil 2.11. Penetrasyon oluşmamış numunelerde kuvvet-zaman ve enerji-zaman gelişimi.....	64
Şekil 2.12. Kompozit tabakada darbe sonucu oluşan kırılmaların şematik gösterimi.....	66
Şekil 2.13. Balistik test düzeneği.....	67
Şekil 2.14. Split Hopkinson test düzeneğinin şematik gösterimi.....	68
Şekil 3.1. Üç noktadan eğme testi serbest cisim diyagramı.....	81
Şekil 3.2. Çekme test numunesi şekli.....	83
Şekil 3.3. Balistik test düzeneği.....	90
Şekil 3.4. Kalibre 0,22 parçacık benzetimli mermi.....	97

Şekil	Sayfa
Şekil 3.5. Kalibre 0,30 parçacık benzetimli mermi	97
Şekil 4.1. E-Cam düz dokuma kompozitin üç noktadan eğme testine ait gerilme & eğilme grafiği.....	105
Şekil 4.2. E-Cam tek yönlü kompozitin üç noktadan eğme testine ait gerilme & eğilme grafiği	106
Şekil 4.3. Aramid dokuma kompozitin üç noktadan eğme testine ait gerilme & eğilme grafiği.....	107
Şekil 4.4. Alumina seramiğin üç noktadan eğme testine ait gerilme & şekil değiştirme grafiği.....	108
Şekil 4.5. Silisyum karbür seramiğin üç noktadan eğme testine ait gerilme & şekil değiştirme (eğilme) grafiği.....	109
Şekil 4.6. Homojen haddelenmiş yüksek mukavemetli çeliğin gerilme & şekil değiştirme grafikleri.....	110
Şekil 4.7. Ağırlık düşürme testinde serbest kenarlara destek sağlamak için tasarlanan tutucu aparat.....	117
Şekil 4.8. 4 mm E-Cam tek yönlü kompozitin 5 J enerji ile ağırlık düşürme testinde bulunan kuvvet/enerji & zaman grafikleri.....	118
Şekil 4.9. 4 mm E-Cam tek yönlü kompozitin 5 J enerji ile ağırlık düşürme testine ait kuvvet/hız & yer değiştirme grafikleri.....	120
Şekil 4.10. 4 mm E-Cam tek yönlü kompozitin 5-27,5 J enerji ile ağırlık düşürme testlerine ait kuvvet/enerji & zaman grafikleri.....	122
Şekil 4.11. 4 mm E-Cam tek yönlü kompozitin 5-27,5 J enerji ile ağırlık düşürme testine ait kuvvet/enerji & yer değiştirme grafikleri....	122
Şekil 4.12. 4 mm E-Cam tek yönlü kompozitin 5-27,5 J enerji ile ağırlık düşürme testine ait yer değiştirme/hız & zaman grafikleri.....	123
Şekil 4.13. 4 mm E-Cam tek yönlü kompozitin 5-27,5 J enerji ile ağırlık düşürme testlerine ait enerji & zaman grafikleri.....	124
Şekil 4.14. 4 mm E-Cam tek yönlü kompozitin 5-27,5 J enerji ile ağırlık düşürme testlerine ait kuvvet & zaman grafikleri.....	125

Şekil	Sayfa
Şekil 4.15. 4 mm E-Cam tek yönlü kompozitin geri sekme karakterli düşük hızlı darbe testine ait kuvvet&yer değiştirme grafikleri...	127
Şekil 4.16. 4 mm E-Cam tek yönlü kompozitin geri sekme karakterli düşük hızlı darbe testinde arka yüzünde meydana gelen yer fıstığı şeklindeki delaminasyon hasar yapısı.....	128
Şekil 4.17. 4 mm E-Cam tek yönlü kompozitin geri sekme karakterli düşük hızlı darbe testine ait kuvvet & zaman grafikleri.....	132
Şekil 4.18. 4 mm E-Cam tek yönlü kompozitin geri sekme karakterli düşük hızlı darbe testine ait kuvvet/enerji & zaman grafikleri...	132
Şekil 4.19. 4 mm E-Cam tek yönlü kompozitin 30-37,5 J enerji ile ağırlık düşürme testine ait kuvvet/enerji & zaman grafikleri.....	138
Şekil 4.20. 4 mm E-Cam tek yönlü kompozitin 30-37,5 J enerji ile ağırlık düşürme testine ait yer değiştirme/hız & zaman grafikleri.....	139
Şekil 4.21. 4 mm E-Cam tek yönlü kompozitin 30-37,5 J enerji ile ağırlık düşürme testine ait kuvvet/enerji & yer değiştirme grafikleri.....	140
Şekil 4.22. 4 mm E-Cam tek yönlü kompozitin 39 J enerji ile ağırlık düşürme testine ait kuvvet/hız & zaman grafikleri.....	144
Şekil 4.23. 4 mm E-Cam tek yönlü kompozitin 39-80 J enerji aralığında ağırlık düşürme testlerine ait kuvvet/enerji & zaman grafikleri..	147
Şekil 4.24. 4 mm E-Cam tek yönlü kompozitin 39-80 J aralığında ağırlık düşürme testlerine ait kuvvet/enerji & yer değiştirme grafikleri.	148
Şekil 4.25. 4 mm E-Cam tek yönlü kompozitin 39 J enerji ile ağırlık düşürme testine ait kuvvet/hız & zaman grafikleri.....	149
Şekil 4.26. 4 mm E-Cam tek yönlü kompozitin 39 J enerji ile ağırlık düşürme testine ait kuvvet/hız & yer değiştirme grafikleri.....	149
Şekil 4.27. 4 mm E-Cam tek yönlü kompozitin düşük hızlarda darbe testlerine ait enerji dağılımı ve kritik enerji eşikleri.....	154
Şekil 4.28. 4 mm E-Cam tek yönlü kompozitin geri sekme, penetrasyon ve perforasyon karakterli darbe testleri.....	156
Şekil 4.29. 3,85 mm E-Cam düz dokuma kompozitin 15-37,5 J enerji ile ağırlık düşürme testine ait kuvvet/enerji&zaman grafikleri.....	158

Şekil	Sayfa
Şekil 4.30. E-Cam dokuma kompozitin ($t=3,85$ mm) 15-37,5 J enerji ile ağırlık düşürme testine ait kuvvet & yer değiştirme grafikleri....	158
Şekil 4.31. E-Cam düz dokuma kompozitin 15-37,5 J enerji ile ağırlık düşürme testlerine ait yer değiştirme/hız & zaman grafikleri....	159
Şekil 4.32. 3,85 mm E-Cam düz dokuma kompozitin 40-47,5 J enerji ile ağırlık düşürme testine ait kuvvet/enerji & zaman grafikleri.....	164
Şekil 4.33. 3,85 mm E-Cam düz dokuma kompozitin 40-47,5 J enerji ile ağırlık düşürme testine ait kuvvet & yer değiştirme grafikleri....	165
Şekil 4.34. 3,85 mm E-Cam dokuma kompozitin 50-80 J enerji aralığında ağırlık düşürme testlerine ait kuvvet/enerji & zaman grafikleri...	169
Şekil 4.35. 3,85 mm E-Cam dokuma kompozitin 50-80 J enerji aralığında ağırlık düşürme testine ait kuvvet & yer değiştirme grafikleri....	169
Şekil 4.36. 3,85 mm E-Cam dokuma kompozitin düşük hızlarda darbe testine ait enerji dağılımı ve kritik enerji eşikleri.....	174
Şekil 4.37. 3,85 mm E-Cam dokuma kompozitin geri sekme, penetrasyon ve perforasyon karakterli darbe testleri.....	175
Şekil 4.38. 4 mm kalınlığındaki Aramid kompozitin darbe testlerine ait kuvvet/enerji & zaman grafikleri.....	176
Şekil 4.39. 4 mm kalınlığındaki Aramid kompozitin darbe testlerine ait kuvvet & yer değiştirme grafikleri.....	176
Şekil 4.40. 4 mm kalınlığındaki Aramid kompozitin darbe testlerine ait yer değiştirme/hız & zaman grafikleri.....	177
Şekil 4.41. 3,85 mm E-Cam dokuma kompozitin statik yükleme grafiği.....	180
Şekil 4.42. 3,85 mm E-Cam dokuma kompozitin dinamik yükleme grafiği..	180
Şekil 4.43. 4 mm Aramid kompozitin statik üç noktadan eğme testleri.....	182
Şekil 4.44. 12 mm alumina seramik plakanın ağırlık düşürme testlerine ait kuvvet/enerji & zaman grafikleri ($E_d=5$ J).....	190
Şekil 4.45. 12 mm kalınlığındaki alumina seramik plakanın ağırlık düşürme testlerine ait kuvvet/enerji & yer değiştirme grafikleri ($E_d=5$ J).....	191

Şekil	Sayfa
Şekil 4.46. 12 mm kalınlığında alumina seramik plakanın ağırlık düşürme testlerine ait kuvvet/enerji & zaman grafikleri.....	195
Şekil 4.47. 12 mm kalınlığında alumina seramik plakanın ağırlık düşürme testlerine ait kuvvet/enerji & yer değiştirme grafikleri.....	195
Şekil 4.48. Kenarları destekli 12 mm alumina plakanın 10 J darbe enerjisi ile ağırlık düşürme testine ait kuvvet/enerji & zaman grafikleri.....	200
Şekil 4.49. Kenarları desteksiz 12 mm alumina plakanın 10 J darbe enerjisi ile ağırlık düşürme testine ait kuvvet/enerji & zaman grafikleri.....	200
Şekil 4.50. 10 mm kalınlıktaki seramiklerin 10 J darbe enerjisi ile testine ait kuvvet/enerji & zaman grafikleri, a) alumina, b) bor karbür, c) silisyum karbür.....	206
Şekil 4.51. Darbe sonucu kırılan seramik parçalarının koniklik açısı.....	207
Şekil 4.52. Al ₂ O ₃ - RHA çeliği zırh sistemine ilk atışın isabet noktası.....	227

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. Reaktif zırh modüllerinin pasif zırh üzerine monte edilmesi.....	10
Resim 2.2. Seramik ve polimer kompozitden oluşan çok katmanlı zırh koruma sistemi: seramik tabakanın mermiyi deforme etmesi ve konik kırılması.....	20
Resim 2.3. Seramik kompozit, çok katmanlı zırh sistemi.....	20
Resim 2.4. Elyaf dokuma çeşitleri.....	30
Resim 2.5. Cam elyafı üretimi.....	31
Resim 2.6. Karbon elyaf örnekleri.....	32
Resim 2.7. Parçacık tutucu kompozit panellerin araç içi uygulaması.....	46
Resim 2.8. Darbe testlerinde kullanılan farklı geometriye sahip uçlar.....	61
Resim 2.9. Darbe sonrasında oluşan hasar yapılarının fotoğrafları.....	63
Resim 2.10. Darbe almış katmanların kesit alanlarının fotoğrafları.....	65
Resim 2.11. Split Hopkinson test düzeneği.....	68
Resim 3.1. Alumina plakaların sertliklerinin bulunması.....	70
Resim 3.2. Alumina plakaların ağırlıklarının ölçümü.....	71
Resim 3.3. Bor karbür plakanın ağırlık ölçümü.....	72
Resim 3.4. Bor karbürün taramalı elektron mikroskop görüntüleri.....	73
Resim 3.5. Silisyum karbür plakanın ağırlık ölçümü.....	73
Resim 3.6. 800 g/m ² ağırlığındaki düz dokuma E-Cam kumaşı.....	74
Resim 3.7. 500 g/m ² ağırlığındaki tek yönlü E-Cam kumaşı.....	75
Resim 3.8. Dokuma E-Cam kompozit plakaların ağırlık ölçümü.....	76

Resim	Sayfa
Resim 3.9. Bor karbürlerin polimer yapıştırıcı ile kompozite yapıştırılması.....	79
Resim 3.10. Üç noktadan eğme test cihazı, mesnetler ve yük uygulama ucu.....	80
Resim 3.11. Üç noktadan eğme testinde kullanılan kompozit numuneler...	81
Resim 3.12. Zwick marka çekme test tezgahı.....	83
Resim 3.13. EMCO sertlik ölçüm cihazı.....	84
Resim 3.14. Zwick/ZHV 10 mikro sertlik ölçüm cihazı.....	84
Resim 3.15. INSTRON Dynatup 9250 ağırlık düşürme test düzeneği.....	85
Resim 3.16. Dynatup 9250 test düzeneğinin yapısal bölüm ve elemanları..	86
Resim 3.17. Dynatup 9250 test düzeneği pnömatik destek fikstürü.....	87
Resim 3.18. Dynatup 9250 yazılım kontrol paneli ve test kontrol parametreleri.....	88
Resim 3.19. Dynatup 9250 ile kullanılan değişik darbe uçları.....	88
Resim 3.20. Mermi hızını ölçmek için kullanılan perde sistemi.....	91
Resim 3.21. Balistik testlerde kullanılan sabit namlu düzeneği ve namlular.....	92
Resim 3.22. Hedef tespit düzeneği (Test numunesi ve şahit plaka bağlantısı).....	93
Resim 3.23. MKEK yapımı 7,62 x 51 mm zırh delici mermi resimleri.....	95
Resim 3.24. A.B.D. yapımı 7,62 x 63 mm AP M2 zırh delici mermi çekirdeğinin ağırlık ve uzunluk ölçümü.....	95
Resim 3.25. MKEK yapımı 7,62 x 51 mm NATO FMJ mermi çekirdeğinin ağırlık ve uzunluk ölçümü.....	96
Resim 3.26. SEM JEOL JXA-840A taramalı elektron mikroskobu.....	102
Resim 3.27. Stereo mikroskop (ZEISS Stemi SV –6).	103

Resim	Sayfa
Resim 3.28. Ultrasonik daldırma tekniği - PAC ULTRAPAC-II.....	104
Resim 3.29. Mikrodalga tomografi cihazı.....	104
Resim 4.1. Sertlik ölçümü yapılan alumina parçaları.....	111
Resim 4.2. Bor karbür ve alumina seramik mikro yapılarına ait 1000 büyütme SEM görüntüleri.....	111
Resim 4.3. 4 mm E-Cam tek yönlü [90/0] ₉ kompozitin 5 J ile darbe testi sonrası ön yüzünde meydana gelen hasar.....	121
Resim 4.4. 4 mm E-Cam tek yönlü [90/0] ₉ kompozitin 5–27,5 J enerji ile geri sekme durumuna ait ön ve arka yüzlerinde oluşan hasar.....	130
Resim 4.5. 4 mm E-Cam tek yönlü [90/0] ₉ kompozitin 15 J ile darbe testi sonrası ön yüzünde meydana gelen hasar yapısı.....	133
Resim 4.6. 4 mm E-Cam tek yönlü [90/0] ₉ kompozitin 15 J darbe enerjisi ile ağırlık düşürme testine ait arka yüzünde oluşan hasar.....	134
Resim 4.7. 4 mm E-Cam tek yönlü [90/0] ₉ kompozitin 20 J darbe enerjisi ile ağırlık düşürme testine ait, (a) ön yüzde, (b) arka yüzde oluşan hasar.....	134
Resim 4.8. 4 mm E-Cam tek yönlü [90/0] ₉ kompozitin 25 J ile darbe testi sonrası arka yüzünde meydana gelen hasar yapısı.....	135
Resim 4.9. 4 mm E-Cam tek yönlü [90/0] ₉ kompozitin 30 J ile darbe testi sonrası ön yüzünde meydana gelen hasar yapısı.....	136
Resim 4.10. 4 mm E-Cam tek yönlü [90/0] ₉ kompozitin 30 J ile darbe testi sonrası arka yüzünde meydana gelen hasar yapısı.....	137
Resim 4.11. 4 mm E-Cam tek yönlü [90/0] ₉ kompozitin 30 J - 37,5 J enerji ile penetrasyon durumuna ait ön ve arka yüzlerinde oluşan hasar.....	142
Resim 4.12. 4 mm E-Cam tek yönlü [90/0] ₉ kompozitin 39 J enerji ile perforasyonu (Ağırlık düşürme test düzeneği fotoğrafı)....	145

Resim	Sayfa
Resim 4.13. 4 mm E-Cam tek yönlü [90/0] ₉ kompozitin 39 J enerji ile perforasyonu (Kompozit arka yüz hasar görüntüsü).....	145
Resim 4.14. 4 mm E-Cam tek yönlü [90/0] ₉ kompozitin 39 J ile darbe testi sonrası ön yüzünde oluşan perforasyon hasarı.....	146
Resim 4.15. 4 mm E-Cam tek yönlü [90/0] ₉ kompozitin 39 J ile darbe testi sonrası arka yüzünde oluşan perforasyon hasarı.....	146
Resim 4.16. 4 mm E-Cam tek yönlü [90/0] ₉ kompozitin 39 J - 80 J enerji ile perforasyon durumuna ait ön ve arka yüzlerinde oluşan hasar.....	153
Resim 4.17. 3,85 mm E-Cam düz dokuma kompozitin 15-37,5 J enerji ile geri sekme durumuna ait ön ve arka yüzlerinde oluşan hasar.....	162
Resim 4.18. 3,85 mm E-Cam düz dokuma kompozitin 30 J ile darbe testinde arka yüzünde oluşan delaminasyon ve fiber kırılmaları.....	163
Resim 4.19. 3,85 mm E-Cam düz dokuma kompozitin 40 J - 47,5 J enerji ile penetrasyon durumuna ait ön ve arka yüzlerinde oluşan hasar.....	166
Resim 4.20. 3,85 mm E-Cam düz dokuma kompozitin 40 J ve 42,5 J enerji ile darbe testlerinde arka yüzlerinde oluşan delaminasyon hasarı.....	168
Resim 4.21. 3,85 mm E-Cam düz dokuma kompozitin [50-80] J enerji ile perforasyon durumuna ait ön ve arka yüzlerinde oluşan hasar	171
Resim 4.22. 3,85 mm E-Cam düz dokuma kompozitin 65 J enerji ile darbe testlerinde arka yüzünde oluşan delaminasyon hasarı.....	172
Resim 4.23. 4 mm kalınlığındaki Aramid kompozitin darbe testlerinde ön yüzünde meydana gelen deformasyon fotoğrafları.....	178
Resim 4.24. 4 mm kalınlığındaki Aramid kompozitin darbe testlerinde arka yüzünde meydana gelen deformasyon fotoğrafları.....	179
Resim 4.25. 12 mm Aluminanın 3-60 J darbe enerjileriyle ağırlık düşürme testlerine ait seramik ön yüz fotoğrafları.....	188

Resim	Sayfa
Resim 4.26. 12 mm Aluminanın 3-60 J darbe enerjileriyle ağırlık düşürme testlerine ait seramik arka yüz fotoğrafları.....	189
Resim 4.27. 12 mm kalınlıkta Alumina seramiğın 5 J darbe enerjisi ile yüklenmesi neticesinde oluşan kırılmalar.....	191
Resim 4.28. 12 mm Aluminanın [5:60] J enerji aralığında ön yüzünde oluşan çentik/penetrasyon hasar çaplarının ölçümü.....	192
Resim 4.29. 12 mm Alumina seramiğın [3:60] J darbe enerjisi aralığında arka yüzünde oluşan hasar alanı büyüklükleri.....	193
Resim 4.30. 12 mm Alumina seramiğın 10 J ve 60 J ile darbe testlerinde arka yüzünde oluşan konik kırılma fotoğrafları.....	194
Resim 4.31. 12 mm Alumina seramiğın 60 J ile darbe testinde darbe kuvvetinin ön ve arka yüzlerdeki etki alanı.....	194
Resim 4.32. Alumina seramiğın ağırlık düşürme testlerine ait fotoğrafları (a) Kenar desteksiz bağlama, (b) Kenar destekli bağlama.....	198
Resim 4.33. Alumina seramiğın kenar desteksiz ağırlık düşürme testlerinde plaka kenarlarında oluşan kırılma ve kopmalar....	198
Resim 4.34. Alumina seramiğın özel aparatla kenar destekli ağırlık düşürme testlerinde plaka kenarlarında oluşan kırılmalar.....	199
Resim 4.35. 10 mm Aluminanın 10 J darbe enerjisi ile ağırlık düşürme testinde, (a) Ön yüzde oluşan kırılmalar, (b) Arka yüzde oluşan konik kırılma havuzu, (c) Konik kırılma yapısı.....	201
Resim 4.36. 10 mm kalınlıkta silisyum karbür seramiğın 10 J darbe enerjisi ile ağırlık düşürme testine ait, (a) Ön yüzünde, (b) Arka yüzünde oluşan kırılma, (c) Konik kırılma yapısı, (d) Kopan kırık parçaları.....	202
Resim 4.37. 10 mm kalınlıkta bor karbür seramiğın 10 J darbe enerjisi ile ağırlık düşürme testine ait, (a), (c) Ön yüzünde, (b), (d) Arka yüzünde oluşan kırılmalar, (e), (f) Konik kırılma yapısı, (g) Kopan kırık parçaları.....	203
Resim 4.38. 10 mm kalınlıkta alumina, silisyum karbür ve bor karbür seramiğın 10 J darbe enerjisi ile ağırlık düşürme testinde arka tarafta oluşan (a) Konik kırılma havuzu, (b) Konik kırılma yapısının karşılaştırılması.....	204

Resim	Sayfa
Resim 4.39. Ağırlık düşürme testinde darbe ile oluşan konik kırılma yapısına ait koniklik açısının profil projeksiyon cihazı ile bulunması.....	208
Resim 4.40. 10 mm kalınlıkta bor karbürün 10 J enerji ile ağırlık düşürme testinde darbe ucu altında kırılan parçaya ait SEM görüntüleri	208
Resim 4.41. Bor karbürde 10 J darbe enerjisi altında kırılan parçanın (a) 50, (b) 100, (c) 1000 ve (d) 5000 büyütme SEM görüntüleri.....	210
Resim 4.42. E-Cam kompozitin hedef düzeneğine bağlanması.....	211
Resim 4.43. 7,62 mm NATO FMJ mermi ile 10 mm kalınlıktaki E-Cam kompozitin balistik testlerinde hedef arkası şahit plaka.....	212
Resim 4.44. 7,62 mm NATO FMJ mermi ile 10 mm kalınlıktaki E-Cam kompozitin balistik testleri.....	213
Resim 4.45. 10 mm kalınlıktaki E-Cam kompozitden 1 ve 2 nolu atışa ait delik merkezlerinden geçecek şekilde alınan kesit.....	214
Resim 4.46. E-Cam kompozitin 1-2 kesitinde 2 nolu atışa ait hasar yapısı.....	215
Resim 4.47. E-Cam kompozitin 1 ve 2 nolu atışlarına ait delik merkezlerinden geçen 1-2 kesitinde 2 nolu atışa ait kesit fotoğrafları.....	216
Resim 4.48. E-Cam kompozitin 1-2 kesitinde 2 nolu atışta oluşan fiber kırılmalarına ait kesit görüntüleri.....	217
Resim 4.49. E-Cam kompozitin 7-8 kesitindeki balistik hasar yapısı.....	218
Resim 4.50. 15 mm E-Cam kompozitin V ₅₀ testine ait 6 adet atış fotoğrafı.....	219
Resim 4.51. 40 mm E-Cam kompozitin balistik testlerine ait ön ve arka yüz fotoğrafları.....	220
Resim 4.52. 40 mm E-Cam kompozitin balistik testlerinde hedefteki macun tutucuda yakalanan mermi fotoğrafları.....	221
Resim 4.53. STANAG 2920'ye uygun 0,30 kalibre, 2,851 g FSP mermi....	222

Resim	Sayfa
Resim 4.54. 7,5 mm Aramid ve 15 mm E-Cam kompozitin 0,30 kalibre FSP mermi ile V_{50} balistik hız limitlerinin bulunması.....	223
Resim 4.55. Seramik kompozit zırh sisteminde kullanılan bor karbür plakalar.....	225
Resim 4.56. Seramik kompozit zırh sisteminde kullanılan alumina plakalar.....	225
Resim 4.57. Al_2O_3 - RHA çeliği zırh sistemine ilk atış fotoğrafları.....	227
Resim 4.58. Zırh delici merminin seramik tabaka içinde kırılma yapısı.....	228
Resim 4.59. Al_2O_3 - RHA çeliğinde 1 nolu atışta oluşan konik kırılma yapısı.....	229
Resim 4.60. Al_2O_3 - Alüminyum T2024 zırh sisteminde oluşan kırılma yapısı.....	229
Resim 4.61. Al_2O_3 - RHA çeliği zırh sisteminde alumina plakalarda kırılmalar.....	230
Resim 4.62. Al_2O_3 - RHA zırh sistemi arka yüzünün atış sonrası fotoğrafları.....	231
Resim 4.63. Al_2O_3 - RHA çeliği zırh sistemine ikinci atış fotoğrafları.....	232
Resim 4.64. Al_2O_3 - RHA zırh sisteminde ikinci atışta kırılma etki alanı.....	233
Resim 4.65. B_4C - RHA çeliği zırh sistemine ilk atış fotoğrafları.....	234
Resim 4.66. B_4C - RHA zırh sisteminde birinci atışta kırılma etki alanı.....	235
Resim 4.67. B_4C - RHA sisteminde birinci atışta meydana gelen konik kırılma alanı ve krater yapı oluşumu.....	236
Resim 4.68. B_4C - RHA sisteminde birinci atışta meydana gelen kırılma krater yapısı.....	237
Resim 4.69. B_4C - RHA zırh sisteminde atışların kırılma etki alanı.....	238
Resim 4.70. B_4C - E-Cam kompozit zırh sistemine ilk atış fotoğrafları.....	239

Resim	Sayfa
Resim 4.71. B ₄ C - kompozit sistemin ilk atış sonrası kırılma alanı fotoğrafları.....	240
Resim 4.72. B ₄ C - kompozit sistemde seramikte gelişen teğetsel kırılmalar.....	241
Resim 4.73. B ₄ C - kompozit sisteminin ilk atış sonrası arka yüz fotoğrafları.....	241
Resim 4.74. B ₄ C - kompozit zırh sisteminde ikinci atışta oluşan kırılma yapısı.....	242
Resim 4.75. B ₄ C - kompozit zırh sisteminde atışların kırılma etki alanı.....	243
Resim 4.76. B ₄ C - kompozit zırh sisteminde ikinci atışın kompozit yüzeyde meydana getirdiği hasar (delaminasyon ve fiber kopması).....	243
Resim 4.77. Al ₂ O ₃ - kompozit zırh sistemine ilk atışın fotoğrafları.....	244
Resim 4.78. Al ₂ O ₃ - kompozit zırh sisteminde ilk atış sonrası oluşan kırılmalar.....	245
Resim 4.79. Al ₂ O ₃ - kompozit zırh sisteminde ilk atış sonrası hasar yapısı.....	246
Resim 4.80. Al ₂ O ₃ - kompozit zırh sisteminin birinci atış sonrası arka yüzü fotoğrafları ve oluşan çöküntünün ölçülmesi.....	246
Resim 4.81. Al ₂ O ₃ - kompozit zırh sistemine ikinci atışın fotoğrafları.....	247
Resim 4.82. Al ₂ O ₃ - kompozit sistemde ikinci atışta meydana gelen kırılmalar.....	248
Resim 4.83. Al ₂ O ₃ - kompozit sistemde meydana gelen kırılmalar.....	248
Resim 4.84. Al ₂ O ₃ - kompozit sistemde balistik darbe sonucu aşınma ve kırılmaya uğrayan sert çelik çekirdekli mermiler.....	249
Resim 4.85. Al ₂ O ₃ - kompozit zırh sisteminin ikinci atış sonrası arka yüzü fotoğrafları ve oluşan çöküntünün ölçülmesi.....	249
Resim 4.86. 300X900X8,3 mm RHA çeliğinin 7,62 mm AP mermiyle V ₅₀ balistik limitinin bulunmasına yönelik yapılan atışlar.....	251

Resim	Sayfa
Resim 4.87. 15 mm RHA eliğinin 7,62 mm AP mermiyle balistik testi.....	252
Resim 4.88. Perforasyon neticesinde zırhtan kopan parçalar (plug).....	253
Resim 4.89. RHA eliğinin n yüzünde kısmi penetrasyon neticesinde kalınlık boyunca kayarak arka yüzde çıkıntı oluşturan parça.....	254
Resim 4.90. RHA eliğine 14.5 mm RUS B32 mermisi ile yapılan atışa ait fotoğraflar (0° çarpma açısı).....	255
Resim 4.91. RHA eliğine 14.5 mm RUS B32 mermisi ile yapılan atışın hedef arkası fotoğrafları (0° çarpma açısı).....	255

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
Al_2O_3	Alumina
B_4C	Bor karbür
SiC	Silisyum karbür
c	Gerilme dalgalarının hızı
d_{max}	En büyük kuvvete karşılık gelen yer değiştirme
d_{top}	Darbe altındaki toplam yer değiştirme
E	Elastisite modülü
E_a	Malzeme tarafından absorbe edilen enerji
E_d	Darbe enerjisi
E_H	Hertz kontak kuvvetine karşılık gelen enerji
E_{max}	En büyük kuvvete karşılık gelen enerji
E_{pen}	Penetrasyon enerjisi
E_{per}	Perforasyon enerjisi
F_H	Hertz kontak kuvveti
F_{max}	Darbe sonucu ölçülen en büyük kuvvet
F_{max}	Maksimum eğme kuvveti
m	Mermi kütlesi
P	Üç noktadan eğme testinde uygulanan kuvvet
ρ	Malzeme yoğunluğu
σ	Normal gerilme (kesite etki eden)
V_d	Çarpma (başlangıç darbe hızı) hızı
V	Merminin hedefe çarpma hızı
t_{top}	Toplam darbe zamanı

Kısaltmalar	Açıklama
AP	Zırh delici
FMJ	Bakır gömlek kaplı (mermi)
FSP	Parçacık benzetimli mermi
HEP	Tahrip plastik mermi
HEAT	Yüksek tahrip güçlü anti tank mermisi
MKEK	Makina Kimya Endüstrisi Kurumu
NIJ	A.B.D. Araştırma ve Doğrulama Enstitüsü
RHA	Homojen haddelenmiş zırh çeliği
RTM	Reçine Transfer Metodu
SABOT	Zırh delici kinetik enerjili mermi
SEM	Elektron Mikroskop Tarama
STANAG	NATO Standart Anlaşması
TÜBİTAK MAM	Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu Marmara Araştırma Merkezi
VARTM	Vakum Altında Reçine Transfer Metodu
ZPT	Zırhlı Personel Taşıyıcı

1. GİRİŞ

Mermi ve zırh sistemleri üzerinde yoğunlaşan bilimsel çalışmalar ve hızla gelişen teknolojinin savunma sistemleri üzerinde uygulama bulmasıyla zırhlı araçlardaki zırh konsepti taktik ve teknik olarak sürekli gelişmektedir. Yeni malzeme arayışları ve değişik mekanik özelliklere sahip malzemelerin birlikte kullanılmasıyla, gelişen tehditler karşısında daha etkin koruma sağlayacak zırh sistemlerinin tasarım ve imalatı giderek önem kazanmaktadır. Zırhlı araç tasarımında, amaçlanan belli bir balistik koruma seviyesi için, ağırlık ve hacim parametreleri aracın performansını etkileyen önemli unsurlar arasında yer almaktadır. Geleceğin savunma uygulamalarına yönelik olarak, performanstan ve hareket kabiliyetinden taviz vermeden balistik koruma seviyesini artırmak için zırh sistemlerinin ağırlıklarının azaltılmasına yönelik yeni yaklaşımlar geliştirilmekte; kütle ve hacim etkinliği yüksek olan zırh çeşitleri tercih edilmektedir.

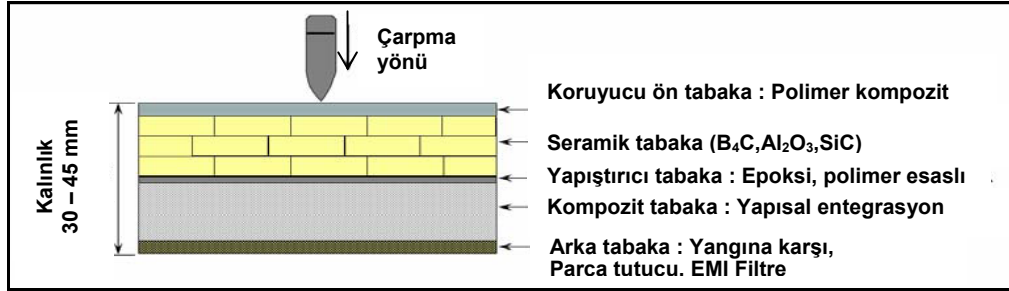
Amerikan askeri standartları arasında yer alan MIL-A-12560H ve MIL-A-46100D'ye göre homojen haddelenmiş zırh çeliklerinin birim alandaki kütle etkinlik değeri "bir" olarak kabul edilmektedir [1]. Alüminyum, kompozit ve seramik malzemelerden üretilen zırhların kütle etkinlik değerlerinin daha yüksek olduğu bilinmektedir. Seramik malzemeler yüksek sertlik ve basma dayanımına rağmen tek başına zırh malzemesi olarak kullanılamamakta, merminin delici ucunu deforme eden ön tabaka olarak zırh sistemi yapısında yer almaktadır. Enerjiyi absorbe ederek merminin durdurulmasını sağlayan arka destek plakalar ise, kompozit ve zırhlı araçların ana yapısında kullanılan alüminyum veya zırh çeliği gibi malzemedan oluşmaktadır. Seramik tabakanın hemen arkasında yer alan fiber takviyeli polimer esaslı kompozit zırh delinse bile parçacık tutucu özelliği ile hedef arkası etkiyi önemli oranda sınırlamaktadır. Bu özellikleriyle seramik ön yüzlü kompozit zırh sistemi, zırhlı araçların ana yapısında ilave 'add on' zırh sistemi olarak (modüler zırh sistemi) kullanıldığında, zırh delici mermi isabet etse dahi zırhlı araç ana yapısı çok az zarar görmektedir [1].

Seramik kompozit zırh sistemleri yüksek balistik koruma sağlayan yeni sistemler olarak dikkat çekmektedir. Ön yüzde kullanılan seramikler, sahip oldukları yüksek sertlik, basma mukavemeti ve aşınma dayanımlarından dolayı, zırh yüzeyine yüksek hızla çarpan mermi ya da parçacıkları körleştirmekte; darbe neticesinde oluşan şok dalgalarının basma ve çekme gerilmeleri şeklinde tesir etmesi ve etkileşimi neticesinde merminin kırılması görevini üstlenmektedir. Yapısal entegrasyonu temin eden arka katmandaki polimer kompozit ise yüksek enerji sönümlenme özelliğiyle darbe sırasında tahrip olan ancak belli kalıcı hıza sahip mermi veya parçacıkları tutarak perforasyonu engelleyebilmektedir [2-5].

Fiberlerle takviye edilmek suretiyle mukavemeti artırılmış polimer esaslı kompozit malzemeler otomotiv, denizcilik ve inşaat sektöründe yaygın bir uygulama alanı bulduğu gibi balistik performanslarıyla savunma sanayinde de gelişen tehditler karşısında giderek artan bir kullanım alanına sahip olmaktadır. Polimer esaslı zırh malzemeleri seramiklerle birlikte kullanıldığında, balistik dayanımı yüksek, hasar toleransı oldukça iyi olan, hafif ve modüler çözümler üretmektedir. Zırh sisteminin makro yapısını oluşturan katmanlı yapı ve katmanların dizilişi ile her katmandaki malzeme mikro yapısı birlikte zırhın darbe davranışını ve balistik performansını belirler.

Kompozitler, darbe enerjisini değişik hasar mekanizmaları üzerinden hızlı bir biçimde sönümlenme özelliklerinden dolayı yüksek balistik dayanıma sahip olabilmektedir [2-5]. Çeşitli zırh sistemleri içinde, Şekil 1.1'de görülen seramik kompozit zırh sistemleri yüksek balistik koruma sağlayan sistemler olarak dikkat çekmektedir. Çok katmanlı ve çok fonksiyonlu özellik içeren bu sistemlerde; 1) En dışta koruyucu kılıf olarak polimer kompozit, 2) Balistik koruma için yüksek sertlikte seramik tabaka, 3) Epoksi veya polimer esaslı yapıştırıcı, 4) Enerji sönümlenme kabiliyetine sahip, yapısal entegrasyonu sağlayan yük taşıyıcı özellikte polimer kompozit katmanları yer almaktadır. Bunun yanında, elektromanyetik engelleme ve koruma amaçlı olarak tasarlanan elektromanyetik karıştırma ağı (EMI) ve yanma dayanımı

sağlamak amacı ile de fenolik esaslı kompozit katmanlar yapıya ilave edilebilmektedir.



Şekil 1.1. Seramik kompozit zırh dizaynı [6]

Kompozit malzemelerin darbe etkisine maruz kaldığı ortamların laboratuvar koşullarında simülasyonu için birçok deney yöntemi geliştirilmiştir. Bu deney yöntemleri çarpan cismin hızına göre düşük, orta ve yüksek hızlı darbe deneyleri olarak üç ayrı kategoride incelenebilir. Düşük darbe hızları 100 m/s'den düşük hızlarda yapılmaktadır. Orta hızlar çeşitli mermilerin de içinde bulunduğu 100-1000 m/s'lik hız aralığını kapsamaktadır. Yüksek hızlı deneyler ise genellikle 1-5 km/s gibi çok yüksek sayılabilecek hızlarda gerçekleştirilmektedir [7, 8].

Düşük hızlı darbe deneyleri için Charpy deneyi ve İzod deneyi gibi çentikli darbe deneyleri ve çekiç düşürme deneyleri gerçekleştirilmektedir. Orta ve yüksek hızlarda ise gaz tabancaları, Hopkinson basınç çubuğu ve gerçek mermiler kullanılmaktadır [8, 9].

Düşük hızlı darbeler çarpışma temas anında malzemenin iç yapısında deformasyon oluşturan darbelerdir. Düşük hızlı darbe, düşük enerjili darbe olarak da ifade edilebilir. Darbe sonucu oluşan hasar, malzeme dış yüzeyinde belirgin olmayabilir. Düşük hızlı darbede, malzemenin iç yapısında darbeye karşı cevap verebilmek için gerekli olan temas süresi yeterlidir ve sonuç olarak daha fazla enerji elastik olarak absorbe edilir [6-9].

Düşük hızlı darbe olayında çarpan kütle ile zırh malzemesi arasındaki etkileşim zamanı yeterince uzundur. Bu nedenle darbe süresince malzemede kuvvet-zaman gelişimi, ilk hasarın oluşması, hasarın gelişmesi ve kırılma ile ilgili önemli bilgiler açığa çıkmaktadır. Kompozit malzemede kuvvetin ilk düşüm noktası ilk hasar oluşumuna işaret etmektedir ki bu hasar Hertz yüzey teması (kontak) hasarı olarak tanımlanmaktadır. Darbe ile malzeme içerisindeki kuvvetin maksimum değerine ulaşması sonucunda malzemede ana hasar meydana gelir. Söz konusu hasar fiber kırılmalarına neden olur ve oldukça kritiktir [6-10].

Düşük hızlı darbeye ait hasar modları içerisinde özellikle tabakalar arası ayrışmalar (delaminasyon), fiber takviyeli polimer kompozitlere has bir hasar yapısı olarak malzeme mukavemetini etkileyen önemli bir faktördür. Kompozitin yük altında yapısal bütünlüğünün bozulmasına sebebiyet veren delaminasyonlar düşük enerjili darbelerde gözle görülmediğinden oldukça tehlikelidir. Kompozit malzeme içerisinde delaminasyon oluşumu ve gelişmesi ağırlık düşürme testinden elde edilen kuvvet & zaman grafiğinden kolay bir şekilde anlaşılmaktadır. Bu nedendir ki, belli bir amaç ve uygulamaya yönelik olarak üretilen kompozit malzemelerin belirgin bir hasar oluşumu meydana gelmeden dayanabileceği darbe enerji sınırının (eşik enerjisi) tespiti ve bu sınırın geçilmesi durumunda hasar modlarının gelişimi ve etkisinin belirlenmesi büyük önem taşımaktadır.

Malzemenin yüksek hızlı darbe davranışında malzeme boyunca yayılan gerilme dalgaları hakimdir. Bu durumda malzeme darbeye karşı cevap verebilecek yeterli zamanı bulamaz, küçük bir bölgede hasar oluşur [10, 11]. Balistik testlerde ve daha yüksek hızlarda gerçekleştirilen darbelerde delaminasyon ve kırılma oluşumu makroskopik boyutlarda görülmektedir.

Bu tez kapsamında darbe karakteristiği incelenen modüler zırh sistemi; Şekil 1.1'deki kompozit yapıya benzer şekilde seramik ön yüzü, polimer esaslı kompozit veya homojen haddelenmiş zırh çeliği ile takviyelendirilmiş

konfigürasyona sahiptir. Seramik malzeme olarak bor karbür (B_4C), alumina (Al_2O_3), silisyum karbür (SiC); polimer esaslı kompozit takviye malzemesi olarak E tipi cam elyafı ve aramid kumaşlar, matris malzemesi olarak ise polyester reçine kullanılmıştır.

Deneysel olarak yürütülen bu tez çalışması kapsamında:

(1) Seramik kompozit zırh sistemi yapısındaki bileşenlerin ve zırh sisteminin darbe karakteristiği, darbe enerjisini sönmleme şekli ve darbe hasar şekilleri belirlenmiştir. Ağırlık düşürme testleri ile düşük enerjili darbe, atışlı testlerle de yüksek enerjili darbe davranışı ve balistik özellikleri incelenmiştir. Darbe sürecinde ağırlık düşürmede darbe ucunun, balistik testte ise merminin kompozit, seramik ve seramik kompozit zırh sistemine nüfuziyeti (penetrasyonu), malzemede mikro ve makro seviyede meydana gelen hasar biçimleri tespit edilmiştir. Balistik darbe sonucunda zırh sisteminde seramik katman, matris ve fiber yapılar da meydana gelen hasar modları bulunmuştur.

(2) Darbe testlerinde kullanılan üniversal ağırlık düşürme test cihazı klasik darbe test cihazlarından farklı olup klasik darbe test cihazlarına göre daha yüksek hızlı (20 m/s) ve yüksek enerjili (45 kJ) darbe testlerine olanak sağlamaktadır. TÜBİTAK MAM'da kurulumu 2008 yılında gerçekleştirilen Instron Dynatup 8150 serisi ve 9250HV serisi test cihazları ile düşük ve yüksek enerjili darbe testlerinin yapılması planlanmıştır. Tez kapsamındaki testler 9250HV modeliyle (1.6 kJ, 20 m/s) yürütülmüş, penetrasyon testlerine yönelik olarak darbe uçlarının henüz temin edilmemiş olması nedeniyle yüksek enerjili 8150 modeliyle (45 kJ, 7 m/s) test yapılamamıştır.

(3) Ağırlık düşürme test cihazı ile zamana bağlı olarak hız ve kuvvet verileri kaydedilerek sistem yazılımıyla ivme-zaman, deformasyon-zaman, enerji-zaman, kuvvet-deformasyon gibi bağıntıların bulunması sağlanarak test numunelerine ait tabakalarda meydana gelen darbe hasarı, etkin olan kırılma

mekanizmaları, malzemenin darbe direnci ve enerji sönümleyebilme özellikleri belirlenmiştir.

(4) Tek başına polimer esaslı kompozit malzemenin ağırlık düşürme testlerinde düşük enerjili darbe testlerine ait enerji dağılımı bulunmuş, kompozit malzemenin darbe davranışını belirleyen kritik eşik enerjileri tespit edilmiştir. Penetrasyon (kısmi nüfuziyet) ve perforasyon (tam nüfuziyet) eşik enerjileri öncesi ve sonrasında malzeme tarafından absorbe edilen enerjinin başlangıç darbe enerjisiyle olan bağlantısı, değişik enerji seviyelerinde kompozit yapıda oluşan hasar ve kırılma yapısı belirlenmiştir. E-Cam dokuma, E-Cam tek yönlü ([0/90] dizilişe sahip) ve aramid kumaştan üretilen kompozit malzemelerin düşük enerjili darbe hız limitleri bulunmuştur. Darbe testlerinde kullanılan E-Cam takviyeli kompozit malzeme yapısında kullanılan kumaşlar Şişe Cam'dan tedarik edilmiş ve Gebze'de üretilmiştir. Aramid kumaşlar ise yurt dışı kaynaklı olup prepreg (reçine emdirilmiş formda) şeklinde kullanılmıştır.

(5) Seramik kompozit zırh sisteminin diğer bir bileşeni olan seramiğin düşük enerjili darbe testlerinde üç farklı malzeme ile çalışılmıştır. Seramik malzeme olarak alumina (Al_2O_3) plakalar TÜBİTAK MAM'da üretilmiş; bor karbür (B_4C) ve silisyum karbür (SiC) yurt dışından tedarik edilmiştir. Seramik malzemenin ağırlık düşürme testlerinde kompozit malzemeye benzer şekilde darbe enerjisi ve darbe kuvvetine bağlı olarak gelişen düşük enerjili hasar yapısı ortaya konmuştur.

(6) Balistik testler, 8'inci Ana Bakım Merkezi Komutanlığı/Afyon ve FNSS Savunma Sistemleri A.Ş./Ankara'da yapılmıştır. Balistik testlerde 7,62 mm NATO Normal FMJ (bakır ceket kaplı kurşun) mermi, 7,62 mm FSP (parçacık benzetimli) mermi, 7,62 mm AP (zırh delici) mermi kullanılmıştır. Atışların gerçekleştirildiği balistik laboratuvarlarda mermi hızları testler sırasında barut hakkını değiştirmek suretiyle ayarlanmış ve atış düzeneğine ait sensör sistemi ile mermi hızı ölçülmüştür. Zırh sisteminin balistik hız limiti ve balistik

koruma seviyesi STANAG 4569 ve NIJ standartları doğrultusunda belirlenmiştir. Atış sonrasında zırh sisteminde balistik darbe neticesinde meydana gelen hasar yapısı incelenmiş, düşük enerjili darbe testi hasar yapısıyla mukayese edilmiştir.

(7) Ağırlık düşürme ve balistik testleri birlikte değerlendirilerek sonuçlar malzeme tarafından absorbe edilen enerji, oluşan deformasyonlar ve kırılma mekanizmaları açısından incelenmiş ve mukayese edilmiştir.

(8) Balistik testler sonucunda seramik kompozit zırh sisteminin balistik koruma seviyesi ile kütle ve hacim etkinlikleri MIL-A-12560 ve MIL-A-46100D standartlarına göre üretilen homojen haddelenmiş zırh çeliği referans alınarak hesaplanmış ve balistik korumaya yönelik olarak muharebe araçlarındaki kullanım şekli değerlendirilmiştir.

Literatürde yer alan makale ve tez çalışmalarında kompozit malzeme ve seramiklerin darbe davranışı tek başına düşük enerjili ağırlık düşürme testleriyle, yüksek enerjili balistik testleriyle veya yüksek enerjili Split Hopkinson Test metoduyla incelenmiştir. Bu tez kapsamında yürütülen çalışmada zırh sistemi ve bileşenlerinin darbe testleri düşük enerjili ağırlık düşürme testleriyle ve yüksek enerjili balistik testlerle yapılmak suretiyle darbe yükleme hızına bağlı olarak malzemenin darbe davranışı ve oluşan hasar yapısı incelenmiş ve sonuçlar mukayese edilmiştir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Gelişen teknoloji, yeni malzeme arayışları ve üretim yöntemlerine bağlı olarak tahrip gücü ve etki alanı giderek artan kinetik ve kimyasal enerjili mermi tehditlerine karşı zırh konsepti ve araç üstü uygulamaları sürekli gelişim göstermektedir. Koruyucu başlık ve yelek gibi personel korumaya yönelik uygulamalarda, havacılık ve uzay çalışmalarında hafiflik, çevre şartlarına karşı yüksek direnç, yüksek mukavemet, darbe dayanımı ve balistik koruma gerektiren çalışmalarda kullanım sahası, fonksiyonelliği ve kullanım amacına uygun performansı daha iyi malzeme üretmek için endüstriyel ve savunma alanında pek çok çalışma yürütülmektedir. Bu kapsamda geliştirilen malzemeler ilgili standartlar çerçevesinde laboratuvar ortamında test edilmekte, zırh sisteminin ana platform üzerindeki fonksiyonu ve kullanım yerine uygun olarak düşük ve yüksek hızlı darbe testlerine tabi tutulmaktadır.

Üzerinde kullanılacağı platforma ve kullanım yerindeki fonksiyonelliğine bağlı olarak geliştirilen zırh sistemlerinde çelik, alüminyum, seramik, kompozit gibi birçok bileşen kullanılabilir. İşletme ve bakım esasları dikkate alınarak bir zırh sisteminin çeşitli darbe unsurlarına ve muharebe sırasında balistik tehditlerin platforma isabeti, patlaması ve parça tesirlerine karşı göstermesi gereken dayanım düşük ve yüksek enerjili darbe testleriyle ölçülebilmektedir.

Kompozit sistemler; helikopter ve uçak gibi hava araçlarında yapısal eleman olarak kullanılmakta, aynı zamanda helikopter veya uçak tabanında pilotun korunması amacıyla zırhlandırma görevini yerine getirmektedir. Bu alanda kullanılan kompozit sistemler; bakım çalışmalarında alet ve avadanlık düşmesi sonucu düşük hızlı ve enerjili darbelere, araç hareket halinde iken tekerleklerden veya çevreden fırlayan taş, parçacık gibi cisimlerin çarpması neticesinde orta hızlı ve enerjili darbelere, değişik kalibreli mermilerin, roket ve füzelerin isabet etmesi durumunda ise yüksek hızlı ve enerjili darbelere maruz kalabilmektedir.

2.1. Zırhlı Araçlarda Kullanılan Zırh Çeşitleri

Kara ve deniz araçlarında zırh, ana yapıda veya ana yapıya ilave olarak kullanılmaktadır. Ağırlığın önemli bir kısıt oluşturduğu hava araçlarında ise ana yapıda alaşımlı alüminyum ve balistik darbelere karşı enerji sönümlenme özellikleri oldukça iyi olan kompozit malzemeler ile ana yapıya ilave olarak aracın kritik bölümlerinde balistik koruma amaçlı seramik kompozit zırh panelleri kullanılmaktadır.

Zırhlı kara araçlarının ana yapıları çoğunlukla sertleştirilmiş homojen zırh çeliği ve alüminyum alaşımlarından üretilmektedir. Zırhlı aracın muharebe sahasındaki taktik kullanım alanı ve rolüne bağlı olarak ihtiyaç duyacağı balistik koruma seviyesi optimum performans-ağırlık dengesi gözetilerek tasarlanmalıdır. Bu kapsamda görerek ateş eden yakın muharebe vasıtası bir tank ile görmeyerek ateş eden ve muharebe sahası derinliklerine ateş desteği sağlayan bir obüsün zırhlandırılması ihtiyaç duyulan balistik koruma seviyesi itibarıyla aynı değildir.

Muhtemel tüm tehditler karşısında belli bir platformun tüm yönlerde her açıdan korunmasını sağlayacak bir zırh sistemi çok ağır olacak ve uygulama alanı bulamayacaktır. Zırh sistemleri karşılaşılan tehdidin kinetik enerjili veya kimyasal enerjili olmasına, çoklu vuruş ihtimaline, zırh malzemesinin tedarik, maliyet ve üretim yöntemi özelliklerine bağlı olarak farklı yapı ve şekillerde tasarlanabilirler [1].

2.1.1. İnce boşluklu zırh (Spaced armour)

İki veya daha fazla levhanın aralarında boşluk bırakılarak oluşturdukları zırh yapısıdır. Özellikle çukur imla haklı mermilerde delici jetin bütünlüğü levhalar arası boşlukta belli oranda bozulmaktadır. Kinetik enerjili mermilerde ise öncelikle zırh eğimine bağlı olarak ilk çarpmada enerjisi bir miktar azalan mermi boşluklu yapıda her ayrı tabakada sapmaya uğrayarak yön

değiştirmekte, deformasyona uğrayarak enerjisi sönümlenmektedir. I. Dünya Savaşından itibaren bu zırh kullanım alanı bulmuştur. II. Dünya Savaşının ilk zamanlarında özellikle Alman tanklarında kullanılan bu zırh kalın zırhların aksine tanksavar mermilerine karşı daha başarılı olmuştur.

2.1.2. Karma (kompozit) zırh

Birbirlerinin zayıf yönlerini destekleyerek daha üstün özellikler elde etmek amacıyla bir araya getirilmiş değişik tür malzemelerden oluşan zırh sistemidir. Kompozit zırh sistemi yapısında fiber takviyeli polimer yapıya ilave olarak seramik ve çelik plakalar eklenmektedir. İlk kullanımı İngiliz Chobham zırhında gerçekteşmiştir. Geleceğin muharebe araçlarında kompozit ve seramik esaslı zırh çözümü üzerinde yoğun çalışmalar sürdürölmektedir. Amerika Birleşik Devletlerinin “Kompozit Zırhlı Araç” projesi kapsamında sahra şartlarında statik ve dinamik yüklemeye dayanıklı, balistik koruma seviyesi yüksek seramik/kompozit sistemler büyük önem kazanmıştır [10].

2.1.3. Patlayıcı reaktif zırh

Bu zırh Alman kaşif Manfred Held tarafından İsrail’deki çalışmaları sırasında bulunmuştur. İki çelik plaka arasına yerleştirilen yüksek patlayıcıdan oluşan



Resim 2.1. Reaktif zırh modüllerinin pasif zırh üzerine monte edilmesi [1]

bir yapıya sahiptir (Resim 2.1). Patlayıcı, tanka isabet eden merminin tankın ana zırhına tesir edemeden infilak etmesini sağlamaktadır. Bu zırh HEAT türü yüksek patlayıcı taşıyan mermilere karşı oldukça etkili iken kinetik enerjili mermilerde etkisiz kalmaktadır [1].

2.1.4. Aktif koruma sistemi

Aktif korunma sistemleri, güdümlü füzelerin hassasiyetinin ve delme kabiliyetlerinin artması, akıllı top mühimmatının geliştirilmesi ve zırhlı araca üstten tesir eden füze sistemlerinin etkin hale gelmesi neticesinde; reaktif zırh veya ilave zırh sistemlerinin getirmiş olduğu ağırlık dezavantajını da ortadan kaldırmak amacıyla geliştirilmiş sistemlerdir [1]. Aktif korunma sistemleri;

- Yaklaşmakta olan füzeyi veya mermiyi tespit ve takip edebilecek bir radar sisteminden,
- Gerekli hesaplamaları otomatik olarak yapıp uygun lançeri 150 mikro saniye gibi kısa bir sürede aktifleştirecek bir komuta kontrol ünitesinden,
- Yaklaşan tehdidi lançerden fırlatılan mermi ile araca 100 - 150 metre civarı mesafede saf dışı edecek yakın savunma mühimmatından oluşmaktadır.

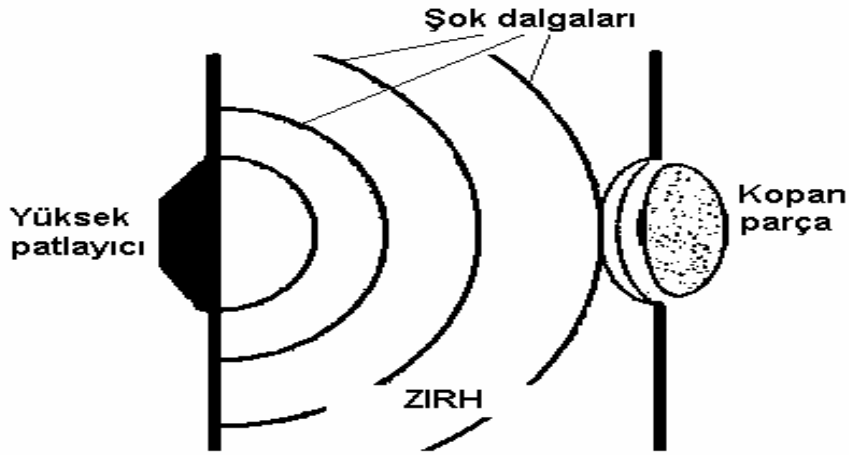
2.2. Mermi-Zırh İlişkisi, Gerilme Dalgaları Etkisi

Modern tekerlekli ve paletli muharebe araçlarında zırh sistemleri kinetik ve kimyasal enerjili tehditlere karşı yeterli koruma sağlayacak yapıya sahiptirler. Kinetik enerjili mermilerde delici çubuk hedefe çarptığında zırh içinde şok dalgaları yayılırken aynı zamanda çubuk içinde de geriye doğru ilerleyen şok dalgaları oluşmaktadır. Çarpma ile birlikte gerek hedefte gerekse delici çubukta basma gerilmeleri meydana gelir. Bu şok dalgaları yoğun metal malzeme içindeki ses hızında (4000 m/s civarı) yayılmaktadır. Çubuk içinde çarpma ve delme sürecinde basma gerilmesi şeklinde oluşan ve arka ucundan yansıyarak çekme gerilmesi şeklinde geri dönen gerilmelerin etkileşimi sonucunda toplam büyüklüğü çubuk metalinin kırılma

mukavemetini aşarsa, delici çubuk parçalanıp kırılmaktadır. Bu olayın bir çok kere tekrarlanmasına imkan tanıdıklarından ve şok transferini kısmen engellediklerinden dolayı, çok katmanlı veya boşluklu zırhlar uzun delici çubukları etkisizleştirmede daha iyi performans göstermektedir [1, 11].

Çok katmanlı pasif kompozit zırhlar çukur imla haklı mermilerin delme mekanizması olan jetin bütünlüğünü bozarak etkisiz hale getirebilmektedir. Özellikle kompozit zırhlar içinde bulunan seramik katmanlar metal esaslı katmanlara göre jet tarafından daha ince bir delik halinde delinebilmekte, bu da takip eden jet kısımlarının delik yanlarına sürtünerek etkisini daha çabuk yitirmesine neden olmaktadır. Ayrıca zırhlı araç içine parçacık etkisini sınırlamak için nispeten hafif olan fiber takviyeli polimer esaslı kompozit zırh levhaları monte edilmektedir. Yanmaya karşı dirençli olan bu levhalar, parçacık tutma özellikleriyle zırh arkası öldürücü etkiyi kontrol altına almakta, böylece zırhlı aracın atış kontrol ve elektronik sistemleri ile mürettebatının korunmasında çok önemli rol oynamaktadır [1, 12].

Tahrip Plastik (HESH/HEP) mermilerinde plastik olarak şekil değiştirebilen nitra penta veya benzeri güçlü patlayıcı maddeler bulunmaktadır. Merminin hedefe çarpmasıyla birlikte patlayıcı madde zırh üzerine bir hamur gibi yayılmaktadır. Patlama sonucu zırh içerisinde gerilme dalgaları meydana gelmekte ve hızla ilerlemektedir. Gerilme dalgaları zırh ön yüzünde basma karakterli iken zırhın arka tarafında geri yansıyarak çekme gerilmelerine dönüşür. Zırh kalınlığı boyunca basma yönlü ilerleyen gerilme dalgaları arka taraftan geri yansıyan çekme gerilmeleri ile karşılaşmaktadır (Şekil 2.1). Zırhın arka yüzünde meydana gelen çekme gerilmeleri değerinin zırh plakasının kırılma mukavemetini aşması durumunda zırh plakasından küçük parça kopmaları meydana gelmektedir. Gerilmelerin zırh arkasından yansıması ve kopma oluşumu zırh malzemesinin mukavemetine bağlı olarak gerilme dalgaları sönmümleninceye kadar devam etmektedir. Zırh arkasından kopan parçalar, araç içinde bulunan personelde can kaybı ile kritik sistemlere ait malzemede ciddi hasar oluşturabilmektedir [1, 13].



Şekil 2.1. Tahrip plastik mermilerin hedefte hasar meydana getirme mekanizması [1]

Boşluklu ve kompozit zırh sistemleri HESH/HEP mermilerine karşı oldukça iyi balistik koruma sağlamaktadır. Patlama sonucu oluşan gerilme dalgalarının zırh malzemesi içerisindeki ilerlemesi, çekme ve basma gerilmelerinin darbe süresince kalınlık ve yüzey boyunca etkileşimi sonucu bileşke gerilmelerin hasar etkisi zırh yapısındaki ara boşluklar sayesinde etkili olarak zırhın arka yüzeyine ulaşamayacaktır. Kompozit sistemlerin katmanlı yapısında ise gerilme dalgaları farklı katman ara yüzlerine ulaştığında bir kısmı kalınlık boyunca ileri iletilecek, bir kısmı ise geri yansıtacaktır. Zırhlı araçların gövde ve kule ana yapısına ait iç duvarların parçacık tutucu fiber takviyeli polimer esaslı kompozit levhaları ile kaplanması, HESH/HEP mühimmatının patlaması ile oluşan parçacıkların araç içinde tutulmasını sağlayacak ve söz konusu mühimmatın tahrip etkisini azaltacaktır [1].

2.3. Zırh Çelikleri

Zırhlı araçlarda gövde ve kulede kullanılan yapısal zırh çeliğinin yüksek ve düşük enerjili darbelere karşı etkin koruma sağlaması, mürettebatın, atış kontrol sisteminin ve gövde-kule sistemlerinin zarar görmemesi ve fonksiyonelliğini devam ettirmesi muharebe sahasındaki başarı için oldukça

önemlidir. Tehdit unsurunun etki gücü, özellikleri ve aracın taktik ve teknik performans kriterleri dikkate alınarak kütle ve hacim etkinliği yüksek farklı zırh tasarımları geliştirilmektedir. Kara aracı uygulamalarında ana yapıda zırh çelikleri yoğun olarak kullanılırken hava araçlarında kompozit ve alüminyum malzemelerin ön planda olduğu görülmektedir.

Kara araçlarında kullanılan yapısal zırh çelikleri alaşımlı çelikler olup yüksek kalitede homojen bir mikroyapı içermektedirler. Homojen zırh çelikleri olarak adlandırılan bu çelikler yüksek mukavemetli, sertliği oldukça yüksek bununla birlikte tokluk değeri de yüksek özelliğe sahiptir. Balistik darbelere ve zırhın tam delinmesine (perforasyon) karşı yüksek direnç, kesme ve kaynak gibi imalat işlemlerinde kolaylık ve yüksek yorulma dayanımı gibi özellikler yapısal zırh çeliklerinin karakteristik özellikleri arasında yer almaktadır [14].

Zırh çeliğinin darbelere ve kısmi delinmeye (penetrasyon) karşı dirençli olması için yüksek mukavemete ve sertliğe sahip olması istenir. Ancak 600 HV üzeri yüksek sertlikler çeliği kırılğan yapacağından malzeme darbe altında gevrek kırılacaktır. Dolayısı ile zırh çeliklerinin kimyasal kompozisyonu ve ısıt işlemleri (östenitleştirme, su verme ve temperleme) çok önemlidir. Balistik darbelere karşı direnç yüksek toklukla sağlanabileceğinden zırh çeliklerinin yüksek darbe tokluğuna sahip olması oldukça önemlidir [14].

Çizelge 2.1'de yoğun olarak kullanılan zırh çeliklerinin kimyasal özellikleri (alaşım değerleri ve karbon eşdeğeri), mekanik özellikleri ile balistik performansları karşılaştırmalı olarak verilmiştir. MIL-A-12560 standardına uygun Sınıf I tipi çelikler kinetik enerjili mermi tehditine karşı kullanılan standart zırh çelikleri olup araç uygulamalarında ana yapıda kullanılır. Sınıf II tipi çelikler benzer kimyaya sahiptir, ancak penetrasyondan ziyade patlama şokunun (blast) önemli olduğu, kimyasal enerjili tehditler için daha yüksek sıcaklıkta temperlenmek suretiyle geliştirilmiştir. Standart zırh çeliği ile karşılaştırıldığında; MIL-A-46100 standardına uygun yüksek sertlikteki zırh çeliklerinin balistik performansının % 20 daha yüksek olduğu, MIL-A-113596

standardındaki döküm malzemenin ise % 13 daha düşük olduğu görülmektedir [14].

Çizelge 2.1. Zırh çeliklerinin karşılaştırılması (saç kalınlığı: 25,4 mm) [14]

Zırh çeliği türü	Sertlik HR _C	Tokluk 40 °C'de J (enine min.)	Balistik Performans 14.5 mm delici	Alaşım Kimyası	Karbon Eşdeğeri (CE)
Sınıf I (MIL-A-12560)	34-40	21.6	1.00	Mn-Mo-B	0.64
Sınıf II (MIL-A-12560)	29-34	28	şok direnç	Mn-Mo-B	0.64
Yük. Sertlikte Plaka (MIL-A-46100)	50-53	13.5	1.20	Cr-Ni-Mo	0.85
Döküm (MIL-A-113596)	32-38	16.3	0.87	Cr-Ni-Mo	0.78

Çizelge 2.2'de değişik zırh çeliklerinin kimyasal kompozisyonları verilmiştir. Bu çeliklerin mekanik özellikleri ise Çizelge 2.3'de görülmektedir. MIL-A-12560 çeliği bir çok uygulamada kullanılan standart zırh çeliğidir. MIL-A-46100 çeliği daha sert ve balistik performansı daha yüksek bir çeliktir. Çizelge 2.2'de verilen temel alaşım elementlerin yanısıra bu tür zırh çelikleri, vanadyum, titanyum, niobyum, alüminyum, bor gibi mikroalaşım elementleri de içerir [14].

Alüminyum alaşımlı zırhlar, zırh çeliğinden daha hafif olmaları, düşük kalibreli mermilere ve şarapnel parçacıklarına karşı istenen seviyede balistik koruma sağlamaları sebebiyle özellikle zırhlı personel taşıyıcı (ZPT), taktik ve tekerlekli araç imalatında kullanılmaktadır. Alüminyum alaşımlı zırhların dış yüzeyi yüksek sertlikte çelik levha veya seramik malzemelerle desteklenerek balistik koruma seviyesi artırılmaktadır.

Çizelge 2.2. Zırh çeliklerinin kimyasal bileşimleri [14]

Kimyasal Bileşim (%)	MIL-A-12560 (Mars 190)	MIL-A-46100 (Mars 240)	MIL 46173 (Mars 270)	Mars 300	XH 129	Armox 440 T
Karbon	< 0.30	< 0.30	0.37 maks.	0.45-0.55	0.26-0.32	0.21
Mangan	1.20	0.95	0.90	0.3-0.7	0.1-0.4	1.2
Kükürt	0.005	0.005	0.005	0.005	≤0.01	0.01
Fosfor	0.012	0.012	0.012	0.012	≤0.015	0.01
Silisyum	0.2-0.4	0.2-0.4	0.2-0.4	0.6-1.0	0.1-0.4	0.1-0.5
Nikel	1.80 maks.	1.85 maks.	3.00 min	4.5 maks.	-	2.5
Krom	1.00	1.6	1.90 maks.	0.4 maks.	1.0-1.5	1.00
Molibden	0.3-0.5	0.5	0.3-0.5	0.3-0.5	0.1-0.5	0.7

Çizelge 2.3 Zırh çeliklerinin mekanik özellikleri [14]

Özellik	MIL-A-12560 (Mars 190)	MIL-A-46100 (Mars 240)	MIL 46173 (Mars 270)	Mars 300	XH129*		Armox 440 T
Sertlik (HB)	277-388	477-534	477-601	578-655	400-450	480-530	420-480
Akma dayanımı (MPa)	1150	≥ 1100	≥ 1100	≥ 1300	1200	1300	≥ 1100
Çekme dayanımı (MPa)	1250	≥ 1600	≥ 1700	≥ 2000	1375	1600	≥ 1300-1500
Uzama (%)	≥ 10	≥ 9	≥ 8	≥ 6	10	9	≥ 10
Darbe çentik -40°C (J/cm ²)	60	30 - 40	30	15	16	14	30

Titanyum alaşımları çelik ve alüminyum alaşımlarından yapılan zırhlara göre daha yüksek kütle etkinliğine sahiptirler. Çoklu atışlara karşı balistik

performansı iyidir. Yüksek dayanım/ağırlık oranına ve mükemmel korozyon direncine sahiptirler [15].

2.4. Kompozit Zırh Sistemleri

Savunma sanayi alanında, zırhlı araçlar ve mürettebatı ile muharebe veya operasyonlara katılan personelin balistik korunmasına yönelik olarak geliştirilen malzemelerin (zırhlı ana yapı, modüler zırh panelleri, ilave zırh paketleri, balistik yelek ve balistik başlık) ağırlıklarının azaltılmasına oldukça büyük ihtiyaç vardır. Modern zırhlı araçlarda güç/ağırlık ihtiyacının 20 ve üzeri olması aracın muharebe sahasındaki manevra kabiliyeti ve bekasını etkileyen önemli bir kriterdir. Muharebe aracında istenen balistik koruma seviyesini sağlamak için aracın ana yapısında kullanılan zırh çelikleri veya üzerine eklenecek olan zırh modüllerinin tasarımında zırh sisteminin araç üzerine getirdiği ağırlığın kısıtlanması arzu edilen güç/ağırlık kriteri sebebiyle önemli bir zorunluluk olmaktadır. Bu maksatla polimer esaslı hafif, çok fonksiyonlu zırh malzemeleri yeni teknolojik ürünler olarak daha fazla önem kazanmaktadır.

Geleceğin zırhlı araçlarında hareket kabiliyetinden ve performanstan taviz vermeden, arzu edilen balistik korumanın sağlanabilmesi için farklı mekanik özellikteki malzemelerin modüler bir yapıda kullanımı gün geçtikçe yaygınlık kazanmaktadır. Tüm metalik zırhlardan daha sert ve hafif olan seramikler, eğilme gerilmelerine karşı zayıf yapısını destekleyen kompozit malzemelerle birlikte zırh sistemlerinde kütleli etkinliği yüksek çözümler üretmektedir [16].

Mühimmat konusundaki hızlı gelişme zırhlı araç korumasında tek başına çelik esaslı zırh yapısının yeterli olamayacağı gerçeğini ortaya koymuştur. Zırh uygulamalarına yönelik yeni malzeme arayışında düşük yoğunluklu, yüksek sertlikte, yüksek mukavemete sahip ve yüksek ısı direnci gösteren malzemeler ön plana çıkmakta, düşük maliyet ve imalat yöntemlerinin kolay

uygulanabilirliği ile araç üstüne entegrasyon edilebilme yeteneği tercih sebebi olmaktadır.

Yeni malzeme arayışlarına yönelik olarak savunma platformlarında uygulanan malzemelerden en önemlileri Çizelge 2.4'de karşılaştırmalı olarak görölmektedir [17]. RHA zırh çeliği en ucuz çözüm olarak gözökmekle birlikte zırh sistemlerinde hacim ve kütle etkinliği önemli parametreler olduğundan; hafif ve sert yapıya sahip zırh çözümünde bor karbür, mukavemeti ve ısıya dayanımı yüksek zırh çözümünde ise titanyum diborür uygun malzeme özellikleriyle dikkat çekmektedir.

Çizelge 2.4. Zırh yapımında kullanılan malzeme özellikleri [17]

Malzeme	Yoğunluk (g/cm ³)	Sertlik (VHN)	Elastisite Modülü (GPa)	Erime Noktası (°C)	Fiyat Sıra
Zırh Çeliği (RHA)	7.9	<670	180	1600	1
Alumina (Al ₂ O ₃)	3.9	2000	350	1800	2
Bor Karbür (B ₄ C)	2.5	3700	450	2450	4
Silisyum Karbür (SiC)	3.2	2600	390	2100	3
Titanyum Diborür (TiB ₂)	4.5	2600	575	2980	5

Polimer esaslı kompozit malzemeler ve seramik malzemeler birlikte veya zırh çeliği ve alüminyum ile kullanılmak suretiyle hafif ancak balistik dayanımı oldukça iyi olan, çoklu vuruşlara karşı etkili zırh sistemleri üretiminde giderek yaygın bir yer bulmaktadır. Kompozit malzemeler, yüksek performans gerektiren ve ağırlıktan tasarruf etme potansiyelinin önemli olduğu havacılık, uzay ve savunma uygulamalarında yüksek özgül mukavemet ve rijitlikleri ile aranan malzemeler haline gelmiştir [18-20].

Mevcut zırhlı askeri araçların çeşitli tehditlere karşı dayanımının artırılması, zırh koruma seviyelerinin yükseltilmesi ihtiyacı, parçacık kalkanı veya destek

tabakası olarak kompozit zırh plakalarının kullanımını her geçen gün artırmaktadır [21]. Cam, karbon ve aramid takviyeli kompozit malzemeler yüksek performanslarıyla endüstrinin birçok kolunda yoğun kullanım alanı bulmaktadır. Farklı malzeme ve mekanik özelliklere sahip fiber ve matris yapı arasında en iyi birleşmeyi sağlayacak yüzey işlemleri ve üretim yöntemleri bugün hala gelişmeye açıktır [22]. Aramid, S2-cam ve HPPE (Yüksek performanslı polietilen) takviyeli kompozitler ve yüksek saflıkta alumina, borkarbür, silikon karbür seramikler tabakalı olarak kullanıldıklarında küçük kalibreli zırh delici mermi tehditlerine karşı oldukça etkili olmaktadır [23].

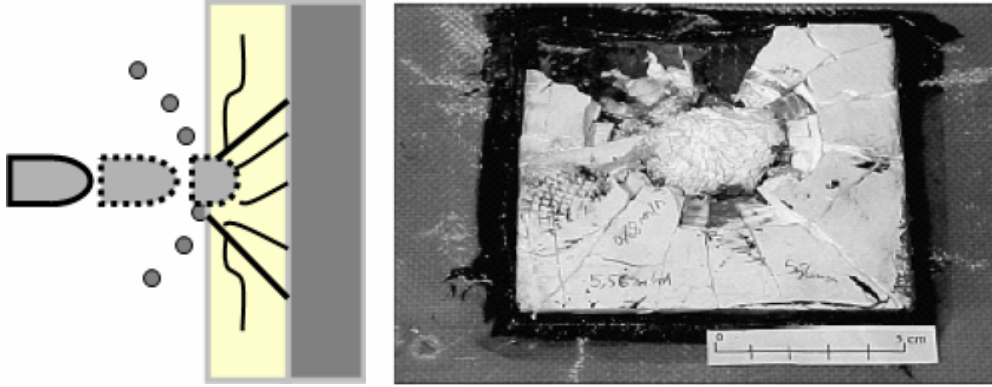
2.4.1. Seramik katmanın özellikleri ve darbe davranışı

Çok katmanlı yapılarda, her bir tabakada yer alan farklı özelliklerdeki malzemelerin kompozit yapı içerisinde belli bir kurguda sıralanışı ve optimum kalınlıklarda kullanılması, tek bir tabakadaki herhangi bir malzemenin tek başına sağlayamayacağı balistik koruma özelliklerini birleşik yapıya kazandırmaktadır. Bu katmanlar içerisinde yer alan seramik malzeme, balistik darbe sırasında kırılma mekanizması üzerinden merminin kinetik enerjisinin sönmelenmesinde rol almaktadır. Aynı zamanda, çok sert olan seramik merminin sivri olan ucunu körelteceği için uç kısımda kalınlaşma meydana gelmekte; darbe boyunca yüzeyi büyüyen merminin penetrasyon gücünü yitirmesi sağlanmaktadır.

Seramik malzemelerdeki kırılma davranışı; sertlik, yapısal kompozisyon (yoğunluk gibi), tane boyut dağılımı, presleme ve sinterleme yöntemi gibi üretim parametreleri üzerinden kontrol edilebilmektedir [24].

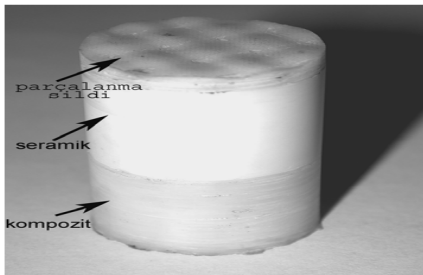
Çok katmanlı yapıda ön yüzde kullanılan seramik tabaka, darbe esnasında Resim 2.2'de görüldüğü gibi konik şekilde kırılarak arkadaki daha yumuşak tabaka üzerinde oluşan basma kuvvetini geniş bir alana yaymakta, basıncı ve yerel deformasyonu azaltmaktadır [25]. Seramiğin arkasında bulunan destek tabakası kompozit veya metal malzemedir. Seramiğe göre daha yumuşak ve

tok olan bu tabaka merminin seramik malzemeyi geçtikten sonra arta kalan kinetik enerjisini sönümleme ve mermi ile seramik parçacıklarını tutma görevini yerine getirmektedir.



Resim 2.2. Seramik ve polimer kompozitden oluşan çok katmanlı zırh koruma sistemi: seramik tabakanın mermiyi deforme etmesi ve konik kırılması [25]

Çok katmanlı zırh sistemlerinde seramik ve polimer esaslı kompozit yapı içerisinde seramiğin önünde (zırh sisteminin ön dış yüzü) ve arkasında (polimer esaslı kompozit tabakanın önünde) ilave tabakalar bulunmaktadır. Seramik tabakasının önüne yerleştirilen ince bir polimer kompozit tabakası kırılan ve tabakadan ayrılan seramik parçalarının fırlamasını, seramik ve yumuşak malzeme tabakası arasında yerleştirilen lastik ise kırılan seramiklerin yumuşak tabakaya yapışık kalmasını sağlamaktadır (Resim 2.3). Bu tabaka, çoklu vuruşlarda zırh özelliğinin korunmasını sağlamaktadır [25].



Resim 2.3. Seramik kompozit, çok katmanlı zırh sistemi [25]

Seramik kompozit zırh sistemlerinin mermiyi durdurmasında etkili olan birçok mekanizma bulunmaktadır. Merminin doğrultusunun saptırılması, merminin aşınması, hedefin hasar gelişimi, mermi ve hedef içindeki şok dalgalarının ilerlemesi, yansıması ve etkileşimi ile çatlak oluşumu, ilerlemesi ve birleşmesi bu mekanizmaların özünü oluşturmaktadır [26]. Bir seramik zırha mermi isabet ettiğinde yüksek sertliğe sahip seramik plaka mermiyi deforme etmekte ve erozyon aşınmasına maruz bırakmaktadır. Merminin enerjisinin çok küçük bir kısmı (~%0.2) seramiği kırmak için harcanırken, enerjinin önemli bir kısmı (%20-40) sünek art plaka tarafından soğurulmaktadır. Geri kalan enerji ise merminin köretilmesi (%10-15) ve seramik parçacıklarının saçılmasına (~%45) harcanmaktadır [27].

Çarpma esnasında seramik kompozit zırhın kalınlığı boyunca bir şok dalgası yayılır. Basma yönlü bu gerilme dalgası zırhın arkasındaki serbest yüzeye ulaştığında bu yüzeyden çekme dalgası olarak geri yansır. Çekme dalgaları malzemenin dinamik akma dayanımının aşıldığı noktalarda kırılmalara neden olur [28]. Bu gerilme dalgalarının yayılmasında mekanik empedansın önemli bir rolünün olduğu belirtilmektedir. Bu nedenle zırh oluşturulurken mekanik empedansları mümkün olduğunca birbirine yakın malzemelerin seçilmesi gerekmektedir [29].

Seramiğin kırılması sonucunda mermi önünde çok sayıda toz halinde seramik parçacık oluşmaktadır. Bu seramik parçacıklarının mermiyi durdurmada büyük etkiye sahip olduğu belirtilmektedir. Parçacıkların saçılmasını engellemek için seramiğin ön ve yan yüzeylerinden metal plakalarla hapsedilmesinin zırh performansını artırdığı birçok çalışmada bulunmuştur [30, 31]. Hatta son yıllarda seramiklerin alaşımlarla kuşatılması için bazı özel döküm teknikleri de geliştirilmiştir. Bu yöntemler, seramik zırhın birden fazla darbeye dayanabilmesini de sağlamaktadır. Bu yöntemlere ilaveten seramiklerin ön yüzünün polimer esaslı kompozitlerle kaplanması ve tehdidin özelliklerine bağlı olarak çarpma durumunda zırh malzemesinde hasarı en az bir alana indirgeyecek büyüklükteki seramiklerin küçük plakalar

halinde (tercihen altıgenler biçiminde) zırhlı aracın üzerine entegre edilmesi de çoklu darbelere karşı dayanımı artırmaktadır [32].

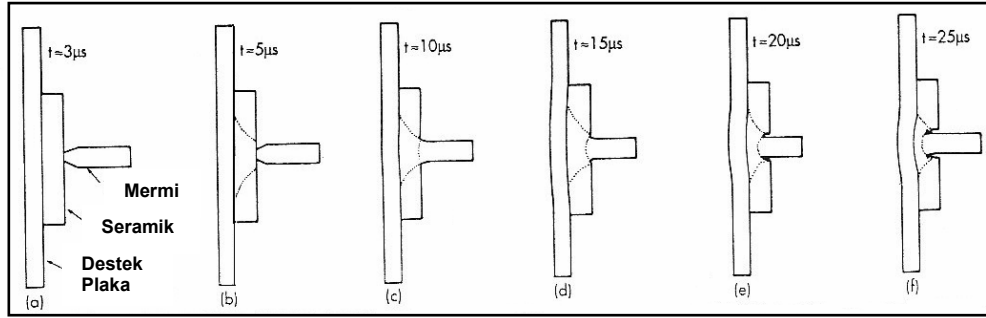
Seramik kompozit zırh sistemlerinde en yaygın kullanıma sahip seramiklerin başında alümina (Al_2O_3), silisyum karbür (SiC), ve bor karbür (B_4C) gelmektedir. Çizelge 2.5'de bazı zırh seramiklerinin özellikleri listelenmiştir. Bu seramiklerden en yüksek sertliğe ve en düşük yoğunluğa sahip olan B_4C 'ün yerli imkanlarla da üretilebiliyor olması, dünya üzerindeki hammadde rezervinin yaklaşık %85' inin Türkiye'de bulunması bu konuda bilimsel çalışmaların, test ve kalifikasyon işlemlerinin bir an önce yürütülmesini ve sanayiye kazandırılmasını zorunlu kılmaktadır [33].

Çizelge 2.5. Çeşitli seramiklerin özellikleri [33]

Malzeme	Yoğunluk (kg/m^3)	Maks. Sertlik (VHN)
Al_2O_3	3900	2000
SiC	3150	2600
B_4C	2500	3700

Balistik uygulamalarda seramiğin yoğunluğu kadar seramik tozlarının bir arada bulunmasının dahi etkili olduğu ifade edilmiştir [34]. Bir kum torbasının 1500 m/s hıza sahip darbelere dayanabileceği belirtilmektedir [35].

Seramik zırhlarda darbe enerjisinin sönmelenmesi ve hasar oluşumu yaklaşık 30 μs lik bir zamanda meydana gelir. İlk 10 μs içinde merminin sivri ucu parçalanarak düzleşir. Bu arada seramikte çarpma ile çatlak oluşumu, gelişmesi ve kırılmalar meydana gelmektedir. 10 μs 'den sonra arka destek tabakasında deformasyon başlar (Şekil 2.2). 10-15 μs arasında ucu kütleşen mermi, kırılan sert seramik parçacıkları ile etkileşimi neticesinde kırılmaya uğramakta ve parçalanmaktadır. 15 μs ye kadar kırılma ve aşınma ile enerjinin %40'ı sönmelenir. 15-30 μs arasındaki safhada merminin enerjisinin %60'ı arka taraftaki kompozit veya metal tabaka tarafından sönmelenir [36].

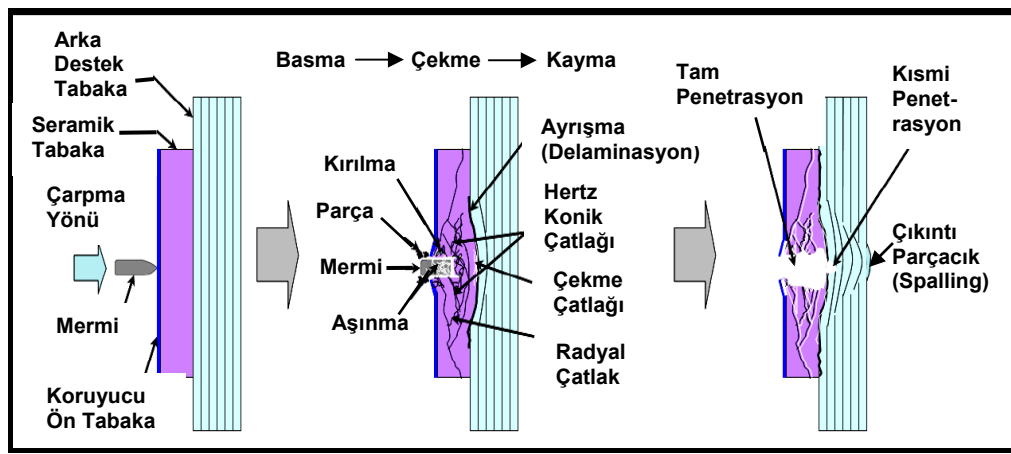


Şekil 2.2. Seramik kompozit zırhın darbe enerjisini sönümleme süreci [36]

Seramik kompozit zırh sistemi küçük kalibreli mermileri üç aşamada durdurmaktadır [37]: 1. Kırılma ve parçalanma, 2. Aşınma, 3. Yakalama. Kırılma ve parçalanma aşamasında merminin seramiğe çarpması ile birlikte seramiğin yüksek sertliği ve basma mukavemeti merminin kırılmasına ve parçalanmasına neden olmaktadır. Birinci aşamayı takiben; çarpma sonrasında oluşan basma gerilmelerinin geri yansiyarak çekme gerilmesi olarak seramiğe etki etmesi ve çarpma kuvvetinin seramik ve kompozit malzemeyi eğmeye zorlayarak seramikte çatlaklar oluşturması ile başlayan aşınma mekanizması görülmektedir. Son aşamada (Yakalama) ise seramik mukavemetini büyük ölçüde yitirir, parçalanır ve çok küçük parçacıklara ayrılır ancak seramik parçaları ile birlikte arka destek plakası momentum transfer mekanizmaları ile mermiyi durdurur.

Zırh delici Sabot mermileri, 1.3-1.6 km/s arasındaki namlu ağız çıkış hızları, yoğun ve uzun delici çubukları ile küçük kalibreli zırh delici mermilerden çok daha etkilidirler. Uzunluk/çap oranı 30:1 civarında, yüksek sertlik ve yoğunluğa sahip (18 g/cm^3 civarı), sinterlenmiş tungsten alaşımı veya seyreltilmiş uranyumdan imal edilmekte ve toklukları iyi seviyededir. Bu nedenle küçük kalibreli, sert çelik çekirdekli mermilerdeki kırılma ve parçalanma aşaması bu tip delici çubuklarda yaşanmaz. Bu tip mermilere karşı geliştirilen zırh sistemlerinde etkin kırılma mekanizması aşınmadır (Aşama 2). Çarpma sonrası oluşan basınç hem mermi hem de zırh malzemesinin akma dayanımlarının oldukça üzerindedir. Yüksek basınçlara

maruz kalan delici çubuk ve zırh malzemeleri sıvı gibi davranmaktadır. Zırh içinde ilerleme sürecinde, delici çubuğun boyu erime sonucu devamlı olarak kısalmaktadır. Bu delme süreci hidrodinamik bir rejime sahiptir. Zırh delici merminin zırhı komple delemeyen kısmi nüfuz etmesi bile, yarattığı şok dalgaları vasıtasıyla zırh arkası bölgeden parçacıkların kopmasına neden olarak hedef arkasında ciddi tahribat meydana getirebilmektedir [1].



Şekil 2.3. Seramik kompozit zırha etki eden penetrasyon mekanizması [6]

Şekil 2.3'de üç tabakalı (koruyucu ön tabaka, seramik tabaka ve takviye kompozit tabaka) yapıya sahip seramik kompozit zırh sisteminde penetrasyon mekanizması görülmektedir. Koruyucu ön tabaka çarpma anında seramik parçacıklarını tuttuğu gibi seramik ön yüzde oluşan çatlakları sınırlar ve darbe enerjisini azaltır. Mermi seramiğe ulaşır ve takviye plakasına doğru ilerlerken aşınmaya uğrar. Seramik plakanın kalınlığı boyunca Hertz konik çatlak ve radyal çatlak gelişimi görülür. Çarpmaya bağlı olarak oluşan basma gerilmesinin geri yansımaları ve zırh plakasının diğer ucunda çekme gerilmesine dönüşmesi, seramik yapıda tam penetrasyonun meydana gelmesi ve takviye plakasının ön tarafında kısmi penetrasyon oluşumu, delaminasyon, matris ve fiber kırılmaları hasar mekanizmalarının tipik aşamalarıdır [6, 38].

2.4.2. Kompozit malzeme bileşenleri, özellikleri ve yapısı

Tek başlarına kullanılmaları durumunda kullanım yeri ve yükleme şartlarını karşılayamayan ve yeterli dayanım gösteremeyen değişik malzeme veya fazların birbirlerinin zayıf yönlerini destekleyerek daha üstün özellikler elde etmek amacıyla makro düzeyde birleştirilmeleriyle oluşan malzeme sistemine kompozit malzeme denir [15].

Kompozit malzemeler; hafifliği, korozyona ve kimyasallara karşı dirençlerinin iyi olması, yüksek mukavemet ve darbe dayanımı gibi özellikleriyle ön plana çıkmaktadır.

Kompozit malzeme takviye elemanı olarak adlandırılan fiberler ile bağlayıcı olan ve ana yapıyı oluşturan matris fazından oluşmaktadır. Fiberlerin mukavemeti kompozit yapının mukavemeti açısından çok önemlidir. Kompozit yapıda yer alan fiber malzeme, kompozit malzemenin mukavemet ve yük taşıma özelliğini belirlerken matris malzeme ise fiber malzemeleri yük altında bir arada tutma ve yükü lifler arasında homojen olarak dağıtma rolünü üstlenmektedir. Kompozit yapının mukavemetinde önemli olan diğer bir unsur ise elyaf ile matris arasındaki bağın yapısıdır. Matris yapıdaki boşluklar söz konusu elyaflarla matris arasındaki temasın azalmasına neden olacaktır. Nem absorpsiyonu da elyaf ile matris arasındaki bağı bozan olumsuz bir özelliktir [39-41].

Matris yapı içerisindeki elyaf yönlenmesi ve elyaf hacim oranı kompozit malzemenin mukavemetini doğrudan etkileyen unsurlar arasında yer almaktadır. Elyafların tek yönlü yerleştirilmesiyle üretilen kompozit malzeme, elyaf doğrultusunda yüksek mukavemet gösterirken elyafa dik doğrultuda düşük mukavemete sahiptir. İki boyutlu [0/90] dizilişe sahip elyaf takviyelerle imal edilen kompozit malzemedeki fiber yönünde ve fiberlere dik yönde eşit mukavemet elde edilebilmektedir [39-41].

Matris malzemeleri

Kompozit yapılarda matrisin üç temel fonksiyonu vardır. Bunlar, elyafları bir arada tutmak, yükü elyaflara dağıtmak ve elyafları çevresel etkilerden korumaktır. İdeal bir matris malzemesi başlangıçta düşük viskoziteli bir yapıda iken daha sonra elyafları sağlam ve uygun bir şekilde çevreleyebilecek katı forma kolaylıkla geçebilmelidir [41].

Kompozit yapılarda yükü taşıyan elyafların fonksiyonlarını yerine getirmeleri açısından matrisin mekanik özelliklerinin rolü çok büyüktür. Matris, yükün tüm elyaflara eşit olarak dağılımını sağlamaktadır. Kayma gerilmelerine dayanımın yüksek olması için elyaflarla matris arasındaki yapıştırıcının bağlayıcılığının çok iyi ve matrisin kayma mukavemetinin yüksek olması gerekmektedir. Elyaf yönlenmelerine dik doğrultuda, matrisin mekanik özellikleri ve elyaf ile matris arasındaki bağ kuvvetleri, kompozit yapının mukavemetini belirleyici önemli hususlardır [39, 41].

Kompozit malzemelerde kullanılan matrisler; polimerler (termosetler ve termoplastikler), metal ve seramiklerden oluşmaktadır. Polimerler düşük yoğunluklu göreceli olarak düşük dayanıklılıktadır. Başlıca polimer matris malzemeleri polyester, epoksi, fenol ve vinil esterdir [15, 41]. Kompozit malzeme yapısını oluşturan bileşenler Çizelge 2.6'da görülmektedir.

Çizelge 2.6. Matris, takviye elemanı ve kompozit malzeme yapı tipleri [40]

Matris Malzemeleri	Takviye Elemanları	Kompozit Yapının Şekli
Polimerler	Lifler	Tabakalar
Metaller	Granül	Kaplamalar
Seramikler	Whiskers	Film-Folya
	Pudra	Honey-Combs (Bal peteği)
	Yonga	Filaman Sarılmış Yapılar

Polimer matrisler

Polimerler; termosetler ve termoplastikler diye ikiye ayrılırlar. Termosetler sertleştikten sonra tekrar şekillendirilemezler. Termoplastikler ise ısıtılarak tekrar şekillendirilebilirler. Kompozit yapımında en çok kullanılan reçineler epoksi reçineler, polyester reçineler, fenolik reçineler ve termoplastik reçinelerdir [15, 41].

Epoksi Reçineleri

Epoksi reçineleri sertleştirici (katalist) ile karıştırıldığında düşük sıcaklıkta veya fırınlama ile (70-90 °C) belli bir sürede kimyasal polimerizasyon sonucu sertleşir ve plastik görünümü alır. Sıvı veya katı hallerde bulunabilmektedir. Elektrik, ısı ve kimyasal dirençleri oldukça iyi, mekanik özellikleri de oldukça yüksektir [15, 41].

Epoksi reçineler 1,11 - 1,14 gr/cm³ özgül ağırlığa sahiptir. Çekme, basma ve darbe dayanımları oldukça yüksektir. Epoksi reçineler aşınmaya karşı çok dayanıklıdır. Yapışma özelliği, yüzeyin düzgünlük ve dokusuna bağlı olmaksızın çok iyi seviyededir. Epoksi reçinelerin kür esnasında çekme payı diğer termoset reçinelere göre çok azdır. Viskozitesi çok düşüktür, oda sıcaklığında katılaşabilirler [41].

Polyesterler

Polyesterler katı veya sıvı halde bulunur. Sıvı polyesterler, katalist ve hızlandırıcı kullanılarak kür edilirler. Sertlikleri oldukça iyi olup, kimyasal maddelere ve çevresel etkilere karşı direnci yüksektir. Kompozit üretim yöntemleri içerisinde ıslak yatırma ile daha çok kullanılan bir reçine çeşididir. Polyester reçinelerin katılma süresi oldukça kısadır, ilave maddelerle farklı sertlikler elde etmek mümkündür. Darbe dayanımı oldukça iyidir [15, 41].

Fenolik Reçineler

Fenol ve formaldehit ürünü olup, katı ve sıvı türleri vardır. Bu reçinelerin polimerleşme prosesinde yüksek basınca ihtiyaç duyulması önemli bir dezavantajdır [15].

Termoplastik Reçineler

Molekül yapısında yan zincirler ve gruplar ihtiva etmesi ve moleküller üç boyutlu bir yapı oluşturamadıkları için rijit bir yapıya sahip değildirler. Isı altında çok çabuk yumuşarlar. Isıtılmak suretiyle tekrar kullanılabilen ve yeniden şekillendirilebilmektedir. Toz ve granül halde bulunurlar [15].

Metal matrisler

Matris yapıda, polimer malzemelerin dışında metaller de kullanılmaktadır. Wolfram ve Molibden gibi yüksek mukavemetli metal fiberlerin bakır, alüminyum gibi metal matrislerle birlikte kullanılmasıyla üretilen kompozitlerin mukavemeti, deformasyon özelliği, tokluğu ve darbe dayanımı, matris yapıda bulunan metale göre oldukça daha yüksek ve iyi bir seviyeye ulaştırılmış olur.

Matris yapı içerisindeki takviye fiberlerin çapları, fiber-matris ara yüz yapışma özelliği, yüzeysel boşluklar metal matrisli kompozit malzemenin mukavemetini etkileyen faktörlerdir. Fiber takviyesi matris yapı içerisinde sürekli lifler şeklinde olabileceği gibi kırılmış lifler veya toz şeklinde de kullanılabilir. Metal matris içerisinde seramik tozlarının yer almasıyla daha sert bir yapıda aşınmalara karşı daha dayanıklı, ısı direnci yüksek kompozit üretimi de oldukça yaygındır [41-43].

Seramik matrisler

Seramik kompozitler, aşınmaya maruz ve yüksek sıcaklık uygulamalarında

mükemmel dayanıma sahip olmaları nedeniyle ön plana çıkan malzemelerdir. Çok yüksek basma dayanımı ve rijitliğe sahip olmalarına rağmen kırılğan yapıya sahiptirler [37, 38].

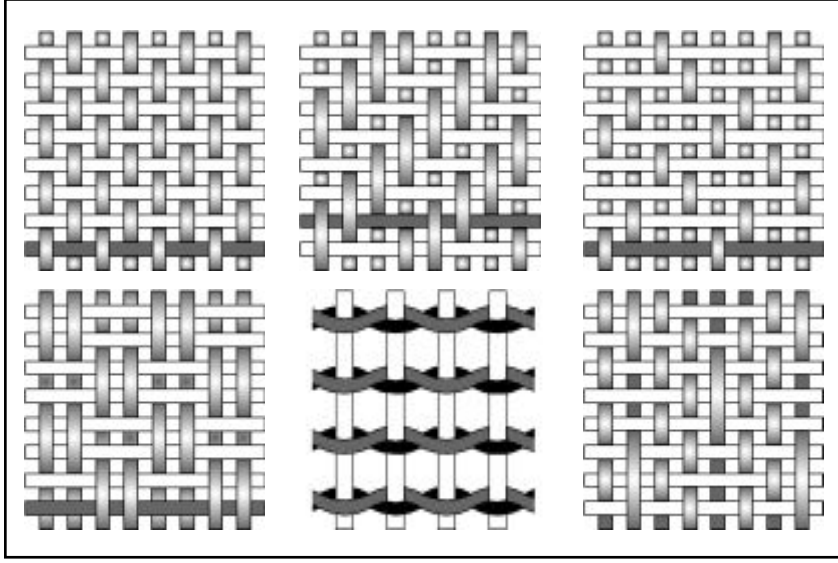
Seramik kompozitler; farklı bileşen yapısıyla seramik-seramik sistem, seramik-cam sistem ve seramik-metal sistem olmak üzere üç farklı şekilde kullanılabilir [42-44]. Seramikle metal malzemelerin iç içe belli bir derecelendirmeye kullanıldığı Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemeler (Functionally Graded Materials) seramiğin sert yapısıyla aşınmalara ve yüksek sıcaklıklara karşı iyi dayanım gösterirken, metalin yüksek tokluğuyla da mekanik özellikleri geliştirilmiş çözümler üretmektedir [42].

Takviye elemanları (Elyaf)

Kompozit malzemenin mukavemetini büyük ölçüde matris malzeme içinde yer alan takviye elemanlarının (elyaf) özellikleri belirler. Elyafın genel özellikleri düşük yoğunluklu, yüksek elastisite modülü ve sertliğe sahip, çekme dayanımı oldukça iyi ve kimyasal korozyona karşı direncinin yüksek olmasıdır [15, 39, 41].

Cam elyaf geçmiştten beri en çok kullanılan elyaf tipleridir. E-Camı ve S-Camı yoğun kullanım alanlarına sahiptir. Para aramid elyaf içerisinde yer alan Kevlar ve Twaron ile polietilen elyaf grubunda yer alan Dyneema ve Spectra elyafının balistik uygulamalarda önemli bir yeri vardır [15].

Malzemenin dayanımını artırmak, tüm yönlerde eşit mukavemet elde etmek için elyaf kumaş olarak dokunmaktadır. Resim 2.4'de bazı elyaf dokuma türleri görülmektedir. Dokuma çeşitleri, dokuma yapısı ve şekli, atkı ve örgülerin sıklığı, dokuma hücresi büyüklüğüne bağlı olarak farklı mekanik özelliklere sahip olabilmektedir.



Resim 2.4. Elyaf dokuma çeşitleri

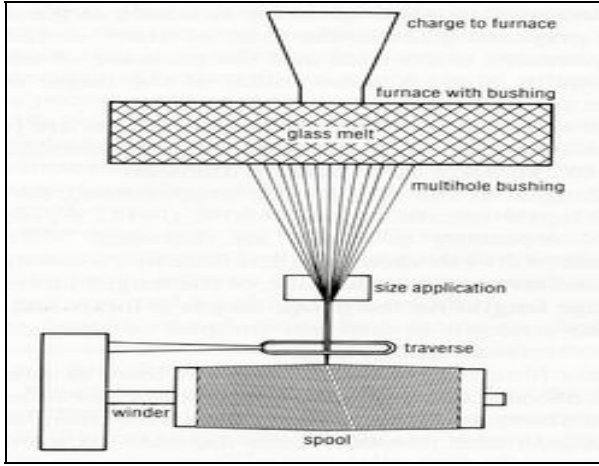
Kompozit yapımında kullanılan elyaf çeşitleri aşağıda verilmiştir:

Cam elyaflar

Cam elyafı, elyaf takviyeli kompozitler arasında en bilinen ve kullanılanıdır. Cam elyafı özel olarak tasarlanmış ve dibinde küçük deliklerin bulunduğu özel bir ocaktan eritilmiş camın itilmesiyle üretilir (Resim 2.5). Bu ince lifler soğutulduktan sonra makaralara sarılırlar. Özellikle cam elyafı ile matris arası yapışma gücünü arttıran "silan" bazlı ve elyaf üzerinde ince film oluşturan kimyasalların uygulanması sonrası kullanım sahaları artmıştır [43].

Cam elyaflarının çekme mukavemeti yüksektir. Elyaf kumaşları genellikle sürekli cam elyafının lifleri ile üretilmektedir. İşlemler sırasında değişik kimyasalların eklenmesi ve bazı özel üretim yöntemleri ile farklı türde cam elyafı üretilebilmektedir. E-Cam, takviye elyaflarının üretiminde en çok kullanılan cam türüdür. Türkiye'de Şişe Cam Grubuna bağlı olan Cam Elyaf Sanayii A.Ş. tarafından E-Cam elyafı üretilmektedir. S + R camı yüksek maliyetli ve yüksek performanslı bir malzemedir. Çekme mukavemeti E-

Cama oranla %33 daha yüksektir. Ayrıca yüksek sıcaklıklarda oldukça iyi bir yorulma direncine sahiptir. Bu özellikleri nedeniyle havacılıkta ve uzay endüstrisinde tercih edilir. S camı elyafı, balistik uygulamalarda araç içinde parça tutucu olarak da kullanılmaktadır.

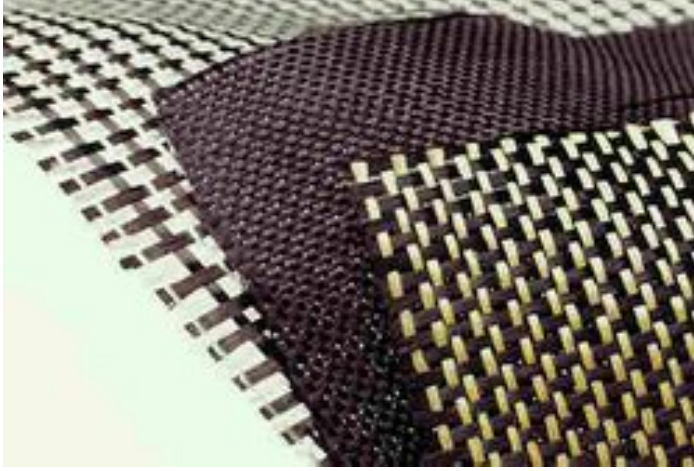


Resim 2.5. Cam elyafı üretimi [43]

Karbon elyaflar

Cam elyafı en çok kullanılan takviye malzemesi olmasına rağmen gelişmiş kompozit malzemelerde karbon elyaf sıklıkla kullanılmaktadır. Karbon elyaf cam elyafa oranla daha güçlü ve hafiftir. Bununla birlikte üretim maliyeti daha yüksektir.

Karbon elyaflar düşük yoğunluğa sahip olmakla birlikte mukavemeti oldukça yüksek, toklukları da iyi seviyededir. Aşınma ve yorulma mukavemetleri oldukça iyidir. Bu nedenle havacılıkta uçak ve helikopterler yapılarının değişik bölümlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Karbon elyaflar çeşitli plastik matrislerle ve yaygın olarak epoksi reçinelerle kullanılırlar. Karbon elyafları alüminyum, magnezyum gibi metal matris yapı içerisinde de takviye elemanı olarak kullanılmaktadır [41]. Resim 2.6'da çeşitli karbon elyaf örnekleri görülmektedir.



Resim 2.6. Karbon elyaf örnekleri

Aramid elyaflar

Aramid "aromatik polyamid" in kısaltılmış adıdır. Polyamidler uzun zincirli polimerlerdir. İki farklı tip aramid elyaf mevcuttur. Bunlar Du Pont firması tarafından geliştirilen Kevlar 29 ve Kevlar 49'dur. Aramid elyaflar düşük ağırlık, yüksek çekme mukavemeti özelliklerine sahiptir. Darbe direnci yüksektir [15, 41].

Kevlar elyafın yoğunluğu cam ve grafit elyafların yoğunluklarından daha düşüktür. Darbe dayanımının çok iyi olması sebebiyle balistik koruma uygulamalarında, kompozit başlık (kask) ve balistik yelek (kurşun geçirmez yelek) yapımında kullanılırlar.

Bor elyaflar

Bor elyaflar çekirdek olarak adlandırılan ince tungsten flamanın üzerine bor kaplanarak imal edilirler. Tungsten çekirdek yerine karbon çekirdek de kullanılabilir. Bor-Tungsten elyaf yapısında bor elyaflar değişik çaplarda üretilebilirler (0.05mm ila 0.2mm), tungsten çekirdek ise 0.01 mm çapında üretilir [43, 44].

Silisyum karbür elyaflar

Bor elyaflarda olduğu gibi tungsten çekirdek üzerine silisyum karbürün kaplanmasıyla üretilirler. Silisyum karbür elyafları 0.1 ile 0.14 mm çaplarında üretilirler. Yüksek sıcaklıklardaki özellikleri bor elyaflardan daha iyidir. Bu elyaflar genellikle titanyum matrisle kullanılırlar. Jet motor parçalarında titanyum, alüminyum ve vanadyum alaşımlı matris ile kullanılırlar [43, 44].

Alumina elyaflar

Elyaf formundaki alumina, 0.02 mm çapındaki alumina flamanın silisyum dioksit (SiO_2) kaplanması ile elde edilir. Alumina elyafların çekme mukavemetleri yeterince yüksek değildir, ancak basma mukavemetleri yüksektir. Yüksek sıcaklık dayanımları nedeniyle uçak motorlarında kullanılmaktadırlar [43, 44].

Çizelge 2.7'de belli başlı elyafların yoğunluk, çekme dayanımı ve elastisite modülü mukayesesi görülmektedir.

Çizelge 2.7. Belli başlı elyafların karşılaştırılması [44]

Malzeme	Fiber Çapı (μm)	Yoğunluk (kg/cm^3)	Çekme Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)
E-Cam	10	2,60	3400	80
Alümina	20	3.90	1500	380
Karbon	11	1,90	1400 - 3100	160 - 380
Spectra 900	27 - 38	1,00	2600 - 3300	117 - 172
Kevlar 49	12	1.40	3400 - 3600	83 - 186

2.4.3. Kompozit malzemelerin darbe davranışı ve hasar modları

Metal ve metal alaşımlarında malzemenin darbeye karşı cevabı; elastik uzama ve plastik şekil değiştirme şeklinde meydana gelir. Darbe hasarı, çarpma yüzeyinde kolay bir şekilde tespit edilebilir. Darbe hasarı, metal malzemelerde genellikle bir tehlike işareti olarak kabul edilmez, çünkü metaller plastik şekil değiştirebilme kabiliyetlerinden dolayı, büyük miktarda enerjiyi absorbe edebilirler. Oluşacak kopmalar ani ve beklenmedik olmaz.

Metallerle kompozitlerin tamamen farklı malzeme yapısı, kimyasal ve fiziksel özellikleri sebebiyle bu malzemelerden oluşan yapıların darbe davranışları da farklı olmaktadır. Metallerin çarpma yüzeyinde darbe etkisine bağlı olarak gelişen gözle görülebilir hasar meydana gelirken kompozit yapılarda özellikle düşük hızlı darbe durumunda yüzeyde belirgin bir deformasyon meydana gelmeksizin iç yapıda hasar oluşması ve malzemenin zayıflaması mümkün olmaktadır. Üretim safhasında, bakım veya onarım sırasında meydana gelen darbeler ya da küçük parçacıkların kompozit cisme çarpması sonucu oluşan ve gözle tespit edilemeyen bu hasar yapısı malzemenin mukavemetinin önemli oranda azalmasına sebebiyet vermektedir [45].

Kompozit malzemelerde darbe sonucunda oluşan hasar, çarpmanın türüne göre darbeye maruz kalmayan yüzeyde meydana gelebilir. Darbe hasarı iç yapıda oluşan delaminasyonlar (tabakalar arası ayrışma) şeklinde başlayabilir [4]. Metallerde darbeye bağlı olarak meydana gelen plastik şekil değiştirmenin sonucunda kopma şeklinde hasar görülmesine rağmen, kompozitler çok değişik modlarda hasara uğrayabilirler ve bu hasar modlarında darbe enerjisine bağlı olarak parçanın yapısal bütünlüğünde ciddi bir değişiklik meydana gelmeyebilir [39]. Genellikle gözle görülmeyen veya çok zayıf bir şekilde görülebilen hasarlar oluşabilir.

Darbeye bağlı hasar ve kırılma hadisesi kompleks bir yapıya sahip olup genellikle üç değişik yönüyle dikkat çeker. Birincisi darbeye bağlı kırılma;

matris yapıdaki çatlak, kompozit plakaların ayrışması ve fiber yapıda kırılma veya bunların birlikte oluşumu ile gelişen kırılma mekanizmaları sonucu oluşur. Kırılmaya neden olan yüklemeler sonucunda ortaya çıkan gerilme bileşenleri etkileşim içerisinde ve bunlardan biri veya birkaçı kırılmada etkin rol oynar. İkincisi bu kırılma mekanizmalarının oluşumunu ve karakteristik özelliklerini ortaya koyan hiçbir hasarsız muayene metodu standardının bulunmayışıdır. Üçüncüsü de kırılma mekanizmalarının doğal yapısını, şeklini ve şiddetini belirleyen çarpan kütlenin burun şekli, ağırlığı, çarpma hızı, kompozit malzeme içerisindeki matris ve fiber yapısı, fiberlerin hacim yüzdesi, diziliş şekli, katmanlar arası bağlayıcı özellikleri ve ön gerilme gibi birçok parametrenin bulunmasıdır [46].

Plastik matrisli kompozit malzemelerin hemen tamamı kırılıgandır, bu nedenle enerjiyi sadece elastik deformasyon ve bazı hasar mekanizmaları (matris kırılması, delaminasyon, fiber kopması v.b) sayesinde absorbe edebilirler, diğeri bir deyişle enerjiyi absorbe etmede plastik deformasyonun katkısı hemen hemen hiç yoktur [27].

Tabakalı kompozit malzemedede, eğer kalınlık boyunca bir takviye söz konusu değıl ise, en büyük darbe hasarı enine doğırtuda oluşacaktır. Bunun en önemli nedenlerinden birisi, enine doğırtudaki malzeme elastik özelliğinin (tabakalar arası enine yönde bağlayıcı madde özelliklerine bağılı olarak) düşük olmasıdır. Bu nedenle bir kompozit malzemenin enine hasar direnci nispeten zayıftır. Kompozit malzeme içerisinde oluşan kayma gerilmeleri ile normal gerilmelere bağılı olarak tabakalar arası mukavemetin düşük olmasından dolayı kayma gerilmelerinin etkili olduğı tabakalar arası ayrışma, çekme etkisi altında ise fiberlerde kırılma ve kopmalar meydana gelmektedir. Darbe esnasında kompozit malzemeye aktarılacak enerjinin miktarı, malzemenin bu enerjiyi sönümleyebilmesi için oluşacak hasar modlarını belirleyecektir. Bu nedenle tabakalı bir kompozit malzemedede darbenin oluşturacağı hasarı tahmin etmek için darbe enerjisi ve hızının belirlenmesi çok büyük bir öneme sahiptir [28].

Ceyhun ve Turan (2003) darbe türünün belirlenmesinde ölçü olarak hız ve enerji miktarlarının kullanılmasının yanı sıra hasar çeşidinin de sınıflandırmada önemli olduğunu belirtmişlerdir. Düşük hızlı darbeler, oluşan hasar bakımından küçük ölçekte matris kırılması, delaminasyon oluşumu ve fiber kopmalarının görüldüğü darbeler olarak, yüksek hızdaki darbeler ise çarpan cismin kompozit malzemeye tamamen nüfuziyetinin söz konusu olduğu darbeler olarak sınıflandırılmıştır. Kompozit malzemelerin darbe davranışının tespitinde kullanılan test düzenek ve yöntemleri ile ilgili henüz uluslararası bir standart olmamasına karşın Izod, Charpy, ağırlık düşürme ve balistik deneylerin yaygın olarak kullanıldığı da çalışmada belirtilen önemli tespitler arasında yer almaktadır [47].

Übeyli ve ark. (2005) çalışmalarında, alumina/aluminyum tabakalı kompozit zırh malzemesinin düşük hızlı darbe durumunda malzeme yapısındaki makro ve mikro seviyedeki yapısal değişimler ve darbe olayına bağlı gelişen penetrasyon veya perforasyon oluşumunda etkili olan kırılma mekanizmalarını incelenmişlerdir. Yapılan deneyler ön yüzde seramik arka destek tarafında ise yaşlandırılmış aluminyum alaşımlı yapının düşük hızlı darbe için en iyi balistik davranışı sağladığını göstermiştir [48].

Zhou (1998) çalışmasında, kurulan bir ağırlık düşürme test düzeneği ile düşük hızlardaki darbeye bağlı kırılma mekanizmasını darbe kuvvetine bağlı olarak açıklamıştır. Hedef malzemesi olarak E-Cam/Polyester ve S-Cam/Fenolik tabakalı kompozit yapıların kullanıldığı çalışmada üç ayrı amaç aynı anda gerçekleştirilmiştir. Birincisi, ağırlık düşürme test düzeneğinin temel tasarım kriterlerinin araştırılması ve fiber takviyeli kompozit malzemelerin darbe davranışının incelenmesidir. İkincisi, Ultrasonik C tarama ve malzemede kesit taraması yapmak suretiyle etkin olan kırılma mekanizması ve temel özelliklerinin belirlenmesidir. Üçüncüsü ise darbe sonucu hasara uğramış kompozitlerde darbe enerjisine bağlı olarak hasar ölçümünün yapılmasıdır [49].

Aydinel ve ark. (2005) çalışmalarında, 7,62 mm çelik çekirdekli zırh delici mermi tehdidine karşı ön tarafta mermi ucunu kırıp kütleştirmek ve ilk darbe kuvvetini daha geniş bir alana yaymak amacıyla, değişik kalınlıklarda, sert alümina seramik ön plaka malzemesi ile arka tarafta kalan mermi enerjisini sönmölemek üzere destekleyici tabaka olarak 6,5 mm sabit kalınlıkta Cam Elyafı Takviyeli Polyester (CTP) kompozit malzemedenden oluşan zırh sisteminin balistik performansını incelemiştir. Seramik kompozit zırh sistemlerinde; seramik kalınlığı ile kompozit arka plaka kalınlığının balistik limite etkisi incelendiğinde her iki malzeme için de, limit durumunda yüksek kalınlıklara ihtiyaç duyulduğu görölmüştür. Çok ince arka takviye plakası için kalın seramik, çok ince seramik ön plaka için de kalın kompozit plaka seçilmesi gerektiği, balistik limit açısından, seramik plakanın daha etkili olduğu sonucuna varılmıştır. Seramik ve kompozit malzemedenden yapılacak en hafif zırh sistemi için, belli bir tehlide karşı balistik koruma sağlayacak en iyi konfigürasyonun tespitinde malzeme kalınlığıyla değişen alan yoğunluğunun optimum değerinin bulunmasının önemine vurgu yapılmıştır [50].

Şenel ve ark. (2005) çalışmalarında, 7,62 mm. zırh delici mermi tehdidine karşı %98 saflıkta alumina ve 400-600 HB sertlikte zırh çeliği kullanılarak geliştirilen zırhın tasarımında kullanılan sayısal analiz yöntemleri, gerçekleştirilen analiz ile balistik darbe test sonuçlarını sunmuşlardır [51]. LS-Dyna yazılımı kullanılarak gerçekleştirilen sayısal analizlerde, zırh delici mermi ve zırh çeliği Johnson-Cook malzeme modeli ile [52], seramik ise Johnson-Holmquist malzeme modeli ile tanımlanmıştır.

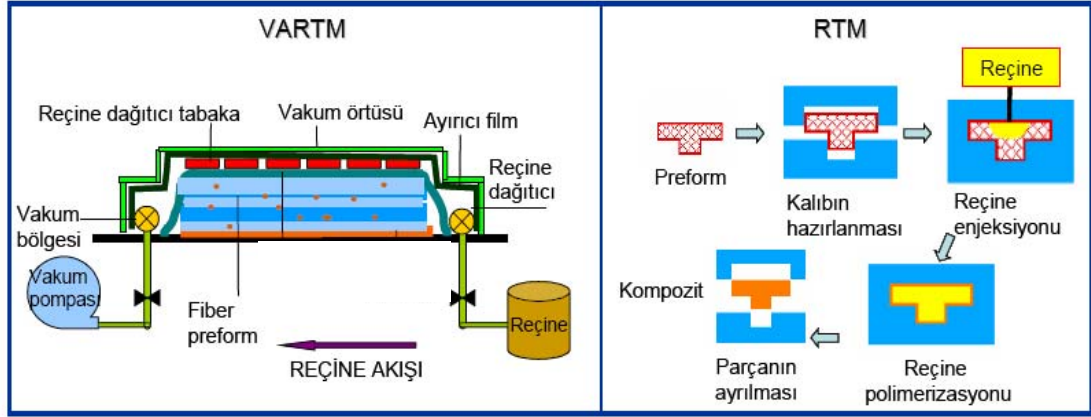
Hosur ve ark. (2005) çalışmalarında, Dynatup model 8210 test düzeneğini kullanarak hibrit yapıdaki kompozit malzemelerin düşük hızlı darbe davranışını incelemiştir. Hibrit şekilde üst yüzeyde karbon elyafı kumaşı, alt yüzeyde S2 cam elyafı kumaşı, iç tabakada ise aynı yönlü karbon elyaflarla takviye edilmiş epoksi reçine ile bağlanmış olan kompozit yapının, cam elyaf/epoksi reçine ve karbon elyaf/epoksi reçine sistemlerinden daha iyi darbe direncine sahip olduğu görölmüştür. Kuvvet/zaman, enerji/zaman ve

kuvvet-deformasyon grafikleri 10-40 J aralığında uygulanan darbe enerjileri için elde edilerek her seviyedeki kırılma mekanizmaları bulunmuştur [53].

Tanoğlu ve ark. (2005), polimer kompozit ve tabakalı kompozit/seramik ve kompozit/metal yapıların geliştirilmesi için Reçine Transfer Metodu (RTM) ve Vakum Altında Reçine Transfer Metodu (VARTM) yöntemlerinin etkin teknikler arasında yer aldığını belirtmişlerdir. Yaptıkları çalışmada termoplastik bağlayıcıların kullanımı ile geliştirilen preform konsolidasyon tekniğinin kompozit prosesi için uygun ve verimli olduğunu ortaya koymuşlardır. Bağlayıcı malzemenin kompozit laminalar arası bölge özellikleri ile kompozitin mekanik ve balistik performans özelliklerini optimize etme potansiyeline sahip olduğu görülmüştür. Tabakalı kompozitler üzerinde 1,1 g parçacık tesirli mermi ile gerçekleştirilen balistik testler sonucu kompozitlerde sadece kısmi penetrasyonların gerçekleştiği belirlenmiştir. Sonuçlar, polimer kompozitlerin özellikle 7,62 mm FSP mermi karşısında balistik dayanım sahibi olduğunu göstermiştir. Buna ilave olarak, polimer kompozit/seramik tabakalı yapıların belli hızlara kadar Zırh Delici (AP: Armour Piercing) ve test edilen tüm hızlarda 7,62 mm FSP mermi ve 7,62 mm yarı küresel (ball) uçlu mermi karşısında balistik koruma sağladığı görülmüştür. Şekil 2.4'de VARTM ve RTM proses adımları şematik olarak gösterilmiştir. RTM yöntemi, yüksek fiber hacim oranlı kompozitlerin kontrol edilebilir mikro yapı özellikleri ile daha kısa çevrim zamanları ve karmaşık şekillerde de üretilebilmesi için avantajlar sunmaktadır [54].

RTM yönteminde çift yüzlü bir kalıp, VARTM tekniğinde ise tek yüzlü bir kalıp ve vakum torbalama sistemi ile üretim gerçekleştirilebilmektedir. Bu sistemlerde işlem adımlarını; kalıbın hazırlanması, dokuma biçimindeki elyaflar ya da preformun (ön şekilli fiber) kalıp boşluğuna yerleştirilmesi, değişik seviyelerde seçilebilen basınç ya da vakumun yardımı ile reçinenin kalıp boşluğuna enjeksiyonu, reçinenin polimerleşmesi ve üretilen parçanın kalıptan ayrılması oluşturur. Ayrıca, dokuma biçiminde elyafların ayrı ayrı işlenmesi yerine üretilecek parçanın şekil ve boyutlarına sahip preformun

direkt olarak işlemede uygulanması kompozitten daha yüksek elyaf hacim oranlarının elde edilmesi, prosesin kolaylaştırılması, zaman ve maliyet gibi avantajlar sunmaktadır [54].



Şekil 2.4. VARTM ve RTM proses yöntemi şematik gösterimi [54]

Seramik kompozit zırh sistemi ilk olarak 1970'li yılların başında İngiltere tarafından geliştirilmiştir. İngiltere Tank Araştırma Merkezi "Chobham Common" tarafından geliştirildiğinden "Chobham" Zırhı olarak da bilinir. Bugün gelişmiş ülkelerde seramik kompozit zırh sistemlerinin modüler, ilave zırh sistemi olarak kullanımıyla birlikte zırhlı araçların ana yapısında kullanımına yönelik çalışmalar da hızla sürdürülmektedir [38]. Araç ana yapısında veya ilave korumada hem statik yükleme durumunda hem de balistik darbenin dinamik etkisi karşısında etkili çözümlerin üretilmesi için kompozitlerin darbe davranışı üzerinde yoğun çalışmalar devam etmektedir.

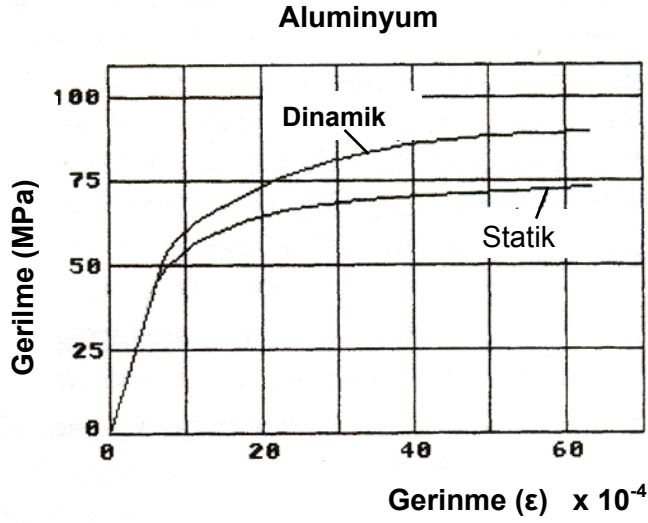
Kompozit malzemede hasarın başlaması, gelişmesi ile malzemenin yük taşıyamayacak şekilde kırılması ile sonuçlanan sürecin basamaklarında iç içe girmiş hasar modlarının kırılma mekaniği ve malzeme özellikleri itibarıyla mikro seviyeden makro düzeye doğru incelenmesi gerekmektedir. Balistik uygulamalara yönelik malzeme seçiminde malzemenin enerji sönmüleme karakteristiği ile hasar davranışı bu çerçevede oldukça önemlidir. Kompozit malzemenin yüksek hızlarda yüklenmesi (yüksek şekil değiştirme hızlarında)

durumunda darbe davranışı ve statik yüklemeye farklı olarak gelişen hasar modları bugün hala tüm yönleriyle açık değildir ve üzerinde çalışmalar yapılmaktadır.

Malzemenin yüksek hızlı darbe davranışı

Mühendislik uygulamalarında malzemelerin mekanik özelliklerinin bilinmesinde statik yükleme durumunda elde edilen gerilme-şekil değiştirme diyagramı kullanılır. Ancak bu diyagramlar yüksek gerinim (şekil değiştirme) hızlarındaki malzemeler için geçerli değildir. Statik yükleme durumunda plastik deformasyona uğrayan bir malzeme bazen büyük değerlerdeki dinamik yüklere zarar görmeden dayanabilir. Yüksek hızlı darbe etkisinin incelenmesi için malzemelerin büyük gerinim hızlarındaki mekanik davranışlarının bilinmesi gerekir [4]. Malzemelerin statik ve dinamik yükleme altında farklı davrandığı, gerinim hızının farklı davranışa etki eden en önemli parametre olduğu yapılan çalışmalar ve testlerle ortaya konmuştur. Şekil 2.5'de Campbell'in 1952 yılında yaptığı çalışmasından alüminyum için dinamik ve statik yükler altında malzeme davranışına bir örnek verilmiştir [55]. Bu şekilden de görüldüğü gibi malzemelerin yüksek gerinim hızlarındaki akma ve çekme gerilme değerleri artmakta, statik yükleme durumunda akmaya sebebiyet veren gerilme hali dinamik yükleme durumunda (yüksek gerinim hızlarında) akmaya neden olmamaktadır.

Malzemelerin statik ve dinamik yüklerde farklı mekanik özellikler göstermesi özellikle askeri alanda yüksek gerinim hızına maruz alanlarda önem kazanmaktadır. Zırhlı araçlar için ana yapıda kullanılan homojen haddelenmiş zırh çeliği (RHA) ve balistik koruma seviyesinin artırılması için kullanılan modüler ilave zırh sistemlerinin tasarımında malzemelerin yüksek gerinim hızlarında davranışlarının bilinmesi oldukça önemlidir. Bu maksatla geliştirilen Split Hopkinson deney düzeneği ile yürütülen güncel birçok çalışma bulunmaktadır.



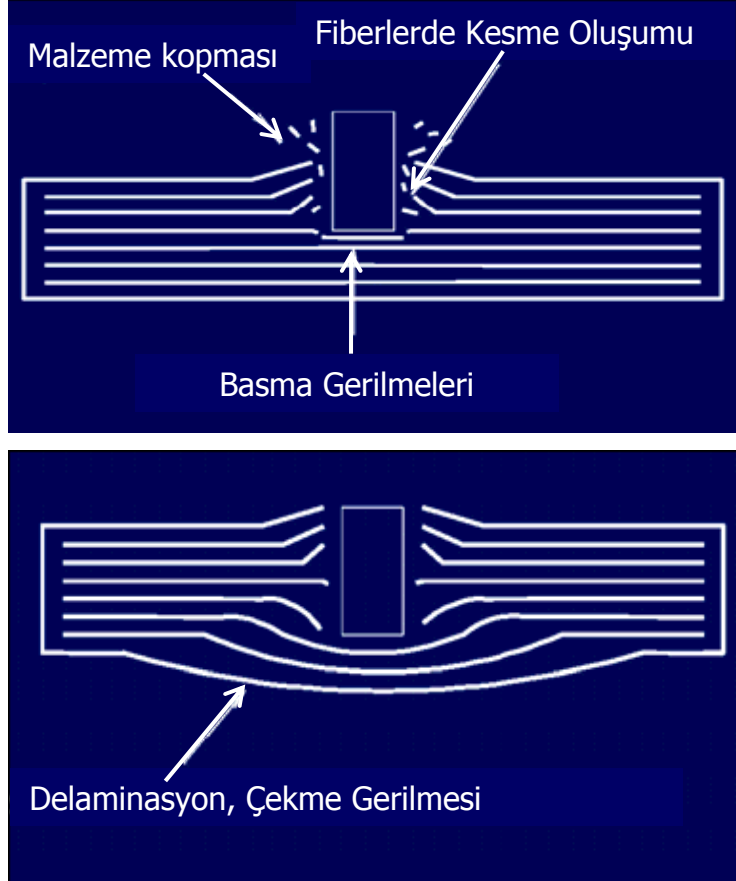
Şekil 2.5. Alüminyum'un statik ve dinamik yük altındaki davranışı [55]

Şekil 2.6'da kompozit bir plakada balistik darbe sonucu oluşan hasar yapısı görülmektedir. Balistik darbeye maruz kalan kompozit malzemede hasar oluşumu iki safhada meydana gelmektedir [56]:

1. Mermi hedefe yüksek hızla çarpması sonucunda hedef dinamik olarak yüklenirken penetrasyon sürecinde yeterli enerjiye sahip olan mermi, temas bölgesi altındaki fiberleri mermi çapına eşit büyüklükte keserek ilerler, kesilen fiberlerin altında kalan kısımda ise basma gerilmeleri meydana gelir.
2. İlerleyen merminin yavaşlaması ile birlikte hedefin deformasyon davranışı düşük hızlardaki yükleme (statik yüklemeye yakın) modeline benzemekte ve hedef eğilmeye başlamaktadır. Çekme gerilmeleri altında delaminasyon ve fiberlerde uzama meydana gelmektedir.

Mermi kompozit malzemeye çarptığında darbe tesiri altındaki her bir lif merminin enerjisini absorbe etmekte ve diğer liflere ilerlemektedir. Böylece çarpma enerjisi yayılarak diğer katmanlara iletilmekte ve merminin darbe enerjisi yayılarak etkisi azaltılmaktadır. Kompozit malzemenin delinmesi, elyaf iplik özelliklerine, kumaş yapısına, merminin hız ve geometrisine, katların birbiri ile etkileşimine ve geometrik dizilişine, ipliklerin birbirleriyle

sürtünme durumu ve ipliklerin mermi ile sürtünme parametrelerine bağlıdır [15].



Şekil 2.6. Kompozit plakada balistik darbe sonucu oluşan hasar yapısı [56]

Merminin zırh malzemesine isabet etmesiyle birlikte malzeme içerisinde elastik ve plastik gerilme dalgaları meydana gelmektedir. Elastik gerilme dalgaları malzeme içerisinde sesin boşluktaki hızından çok daha hızlı bir şekilde yayılmaktadır. Gerilme dalgalarının malzeme içerisindeki yayılma hızı

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2.1)$$

eşitliğiyle hesaplanmaktadır. Bu eşitlikte yer alan:

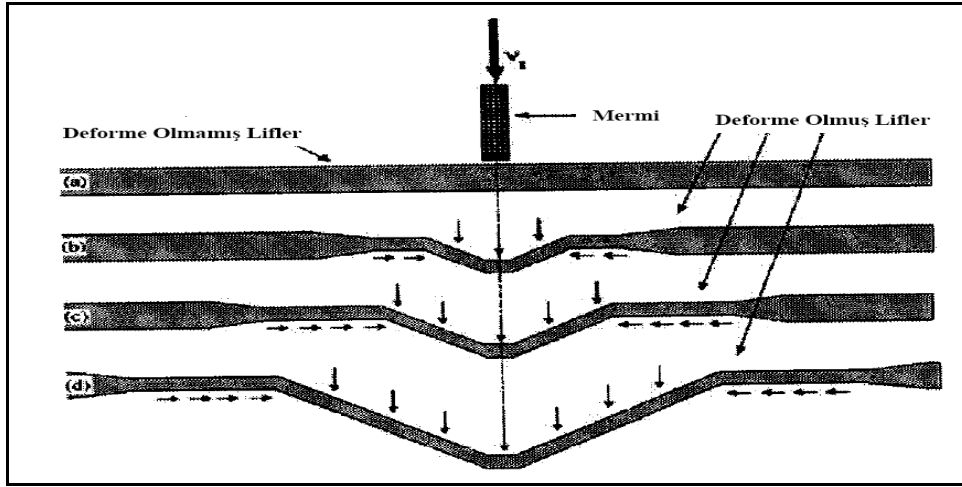
c: Gerilme dalgalarının hızını,

E : Elastisite modülünü,

ρ : Malzeme yoğunluğunu ifade etmektedir.

Zırh malzemesi içerisinde ilerleyen gerilme dalgaları esasında matris yapı ve elyaf iplikler üzerinde hareket etmektedir. Kompozit yapı içerisindeki elyafların rijitliği (elastisite modülü) ne kadar yüksek olursa gerilme dalgaları malzeme içerisinde o kadar hızlı ilerleyecektir. Esasında balistik darbe olayı çok küçük zaman dilimi (mikro saniyelerle ifade edilen) içerisinde gerçekleştiğinden gerilme dalgalarının hızla yayılması merminin darbe enerjisinin kompozit yapı içerisindeki katmanlarda daha geniş bir alana dağıtılması anlamına gelmektedir. Daha geniş bir alana yayılan darbe enerjisinin sönmülmesi ise daha kolay olacaktır. Kompozit yapı içerisinde kumaş olarak kullanılan fiber takviyeler birbirleriyle bağlantılı olmaları sonucunda gerilme dalgalarını merminin isabet noktasından uzakta bulunan elyaf iplere de hızla iletirler [15]. Dolayısıyla kompozit malzemelerde çok kısa bir sürede gelişen balistik darbenin etkili bir şekilde sönmülmesi ve hasarın lokalize olmayıp daha geniş bir alana yayılabilmesi için elyafların elastisite modüllerinin yüksek, yoğunluklarının ise düşük olması zırhın balistik performansını artıracaktır.

Şekil 2.7’de merminin kompozit plakaya çarpması sonucunda kompozitin çarpma yüzeyinden başlayarak mermiyle aynı yönde malzeme kalınlığı boyunca ve mermi hareket yönüne dik yönde ilerleyen gerilme dalgalarının kompozit yapı içerisindeki elyaf iplerde meydana getirdiği deformasyon görülmektedir. Gerilme dalgaları malzemenin arka yüzüne ulaştıklarında geri yansımakta, gerek kalınlık yönünde gerekse plaka düzleminde mermiye doğru hareket eden gerilme dalgaları oluşmakta, zıt yönlü ve genlikli gerilme dalgalarının çok kısa bir süre içerisinde sürekli etkileşimi ile olay daha da karmaşık bir hal almaktadır [41]. Gerilme dalgalarının etkileşimi kırılma hadisesinde rol oynayan en önemli faktörler arasında yer almaktadır.



Şekil 2.7. Merminin kompozit yapı içerisinde meydana getirdiği gerilmeler ve liflerdeki deformasyon [57]

Yüksek hızlarda kompozit sistemlerin darbe davranışı incelenirken tek başına hedef malzemesinin yani kompozit yapının incelenmesi yeterli değildir. Yüksek hızlarda malzemenin sahip olduğu yüksek şekil değiştirme hızı, malzemenin mekanik davranışı dolayısıyla darbe davranışı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir.

Balistik ve daha yukarı hızlarda hedef malzemesini mermi veya darbe kütleleri ile birlikte incelemek daha doğru bir analiz yapılmasını sağlayacaktır. Zırh malzemesinin yapısal parametrelerine ilave olarak merminin hızı, ağırlığı, sertliği, vuruş açısı, mermi ucu şekli, mermi uzunluk/çap oranı gibi parametreler de iyi bir tasarım için dikkate alınması gereken hususlar arasında yer almaktadır [6]. Zırhın delinmesinde ve balistik performans için etkili olan faktörler mermiye ve zırha bakan yönleriyle Çizelge 2.8' de verilmiştir.

Zırha isabet eden bir merminin enerjisi elastik ve plastik deformasyonla veya kırılma yolu ile sönmelenmektedir. Sünek davranış gösteren çelik veya alüminyum esaslı zırhlarda enerjiyi sönmleyen en önemli mekanizma plastik deformasyon iken kırılğan davranış gösteren seramik ve kompozit malzemelerde etkin mekanizma kırılmadır.

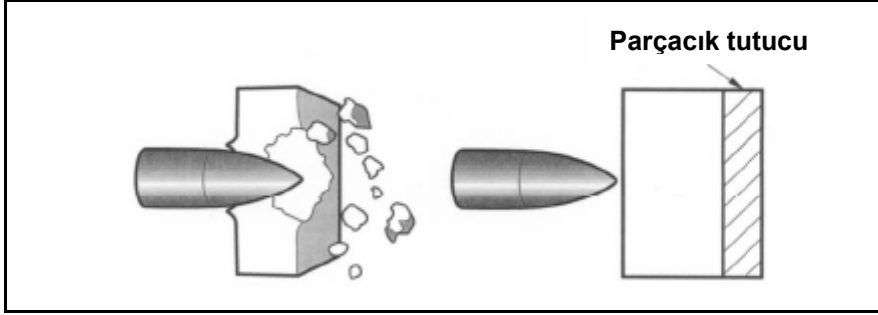
Çizelge 2.8. Kinetik enerjili mermilere karşı zırh performansına etki eden faktörler [6]

Mermi	Mermi Özellikleri	Ağırlık
		Kalibre
		Uzunluk
		Uç Geometrisi
		Sertlik
		Yoğunluk
Terminal Balistiği	Hız	
	Çarpma Açısı	
	Çarpma Etki Alanı	
Zırh	Malzeme Özellikleri	Yoğunluk
		Elastisite Modülü
		Kayma Modülü
		Poisson Oranı
		Sertlik,
		Basma Mukavemeti
	Zırh Plakası Konfigürasyonu	Büyüklik
		Kalınlık
		Tabaka Dizilişi

Zırh sisteminde (seramik, kompozit, çelik, alüminyum esaslı) veya mermide darbe sonucu kırılmalarla oluşan ve yüksek hızla ilerleyen parçacıklarla, zırh kalınlığı boyunca etkili olan gerilme dalgalarının zırhın arka yüzünde çekme etkisiyle sebep oldukları parça kopmaları araç içi elektronik sistemler ve mürettebat için çok tehlikelidir. Kompozitlerin zırh sistemlerinin arkasında parçacık tutucu paneller olarak kullanılması, söz konusu tehditi durdurmak için oldukça etkili bir yöntemdir. Aramid, polietilen ve S-Cam kumaşlarla üretilen kompozitler çok iyi parçacık tutma özelliğine sahip oldukları için zırhlı araç içi uygulamalarda yoğun olarak kullanılmaktadır. Şekil 2.8'de parçacık tutucu kompozitin zırh sistemi içerisindeki rolü, Resim 2.7'de ise araç içi uygulamaları görülmektedir.

Seramik ön yüzlü kompozit zırh sistemlerinin balistik performansını değerlendirirken seramik ve kompozitin ayrı ayrı performanslarını dikkate alırken aynı zamanda birleşik yapıda optimum seramik ve kompozit

kalınlığının seçimiyle balistik koruma etkinliği ve alansal yoğunluk sonuçlarının değerlendirilmesi iyi bir tasarımı desteklemektedir.



Şekil 2.8. Zırh arkasında parçacık tutucu kompozitin fonksiyonelliği [36]



Resim 2.7. Parçacık tutucu kompozit panellerin araç içi uygulaması [58]

Seramik imalatında kullanılan tozların boyutu, şekli, tane yapısı ve sıcak izostatik presleme ile sinterleme sonucunda elde edilen seramik yoğunluğu seramiğin tüm özelliklerini etkiler. Savage, seramik plakanın balistik performansı ile mekanik özellikleri arasındaki ilişkinin teorik olarak kesin bir şekilde belirlenmesinin mümkün olmadığını ancak aşağıdaki şekilde ifade edilen M değerine bağlı olarak performansının değiştiğini belirtmiştir [59].

$$M = (E.H)/\rho \quad (2.2)$$

Bu formülde yer alan

E: Seramiğin elastisite modülü,

H: Seramiğin sertlik değeri,
 ρ : Seramiğin yoğunluk değeridir.

Jung ve ark. (2007), alumina seramik ön yüzlü ve değişik kalınlıklardaki dokuma tip cam fiber takviyeli destek tabakası ile oluşturulmuş zırh sistemlerinin balistik koruma performansı ve kırılma davranışını incelemiştir. Seramik ile kompozit destek plakalar endüstriyel epoksi yapıştırıcıyla birleştirilmiştir. 7,62 mm çapında zırh delici mermi ile yapılan çalışmada arka destek plaka kalınlığının artmasıyla balistik performansın arttığı, seramik ile kompozit arasındaki yapıştırıcının zırhın yapısal bütünlüğü ve mermi parçacıklarını tutması açısından çok önemli olduğu, seramik ile kompozit arasında kauçuk film yastık kullanılması durumunda performansın daha da arttığı görülmüştür [6].

Yüksek şekil değiştirme hızlarında yapılan yüklemelerde (yüksek hızlı balistik darbe) malzemenin davranışına statik yüklemeden çok farklı olarak malzeme boyunca yayılan gerilme dalgalarının etkisi büyüktür. Bu durumda malzeme darbeye karşı cevap verebilme zamanına sahip olamaz ve çok küçük bir bölgede hasar oluşur.

Malzemenin düşük hızlı darbe davranışı

Darbeye ilişkin yapılan çalışmalardan bir kısmı düşük hızlı darbeyi hedefin rijitliğine, malzeme özelliklerine ve çarpan cismin kütle ve rijitliğine bağlı olarak 1-10 m/s arasında değişen hızlar olarak değerlendirilmesi gerektiğini savunmaktadır [60, 61]. Düşük hızlı darbeler normal olarak çarpışma temas anında malzeme iç yapısında deformasyon oluşturan darbelerdir. Bazen düşük hızlı darbe, düşük enerjili darbe olarak da kullanılır. Düşük hızlı darbede, malzemenin iç yapısında darbeye karşı cevap verebilmek için gerekli olan temas süresi yeterlidir ve sonuç olarak daha fazla enerji elastik olarak absorbe edilir. Bu nedenle hedefin dinamik yapısal cevabı çok büyük bir öneme sahiptir. Ancak, çarpma hızının 1-10 m/s arasındaki değerleri için

çarpmaya yönelik her tarafta kabul gören belli bir standart bulunmamaktadır [62]. Düşük hızlı darbeden farklı olarak yüksek hızlı darbede malzemenin darbeye karşı cevap verebilme zamanı yoktur ve çok küçük bir bölgede hasar oluşur.

Cantwell ve Morton (1989), kompozit malzemenin darbe davranışını belirlemek için Charpy ve Izod gibi bilinen darbe deneylerini kullanmışlar ve düşük hızı 10 m/s'e kadar olan hızlar olarak sınıflandırmışlardır [63]. Bununla birlikte Abrate, tabakalı kompozit malzemelerde darbe ile ilgili yapmış olduğu çalışmalarda düşük hızlı darbeleri 100 m/s den düşük hızlarda oluşan darbeler olarak belirlemiştir [8]. Darbe sınıflandırmasının, darbe hız sınırının belirlenerek tespit edilmeye çaba gösterildiği bu çalışmaların yanı sıra sınıflandırmanın darbe sonucunda meydana gelen hasara göre yapılması gerektiği görüşü de savunulmaktadır. Bu nedenle yüksek hız, delinme şeklinde meydana gelmiş fiber kopması, düşük hız ise tabakalar arası ayrılma (delaminasyon) ve matris kırılması ile belirlenir.

Kompozit malzemelerin en hassas oldukları yükleme durumu düzlem dışına doğru (tabaka veya fibere dik yükleme) olmalıdır. Çünkü kalınlık doğrultusunda kompozit malzemeler tabaka düzleminde olduğundan daha zayıftırlar [47]. Kalınlık doğrultusunda darbeye maruz kalan kompozit malzemeler, toplam yük taşıma kapasitelerinde önemli düşüklere sebep olan hasarlara uğrarlar. Kompozit malzemelerin bu darbe yüklerine karşı göstermiş oldukları cevap çok komplekstir. Bu, kompozit malzemeyi meydana getiren her bir bileşenin kendi özellikleri kadar yapısal konfigürasyona da bağlıdır. Ayrıca, darbeye verilen cevap çarpan cismin geometrisine, hızına ve kütlesine de bağlıdır. Darbe yüklemesi altında çarpan cismin gözle görülemeyen veya zayıf şekilde seçilebilen delaminasyon hasarından nüfuziyetine kadar değişebilen farklı şekillerde hasar modları mevcuttur. Düşük hızlı darbeler tabakalar üzerinde gözle görülen hasarlar oluşturmayabilirler. Fakat tabaka içerisinde, matris kırılması, delaminasyon ve/veya fiber kırılması şeklinde hasarlara sebep olabilirler. Bu, mukavemette önemli derecede bir düşüşe sebep olur. Rijitlikte

azalma da mümkündür fakat genellikle dramatik değildir. Yüksek hızlı çarpmada malzeme üzerinde oluşan hasar, çarpışma temas bölgesindeki küçük bir bölgede yoğunlaşır.

Schubel ve ark. (2005) karbon elyaf takviyeli kompozit malzeme kullanarak ağırlık düşürme testleri yapmış; kuvvet, birim şekil değiştirme ve deformasyon kayıtlarını incelemiştir. Testlerden sonra kompozit yapıda oluşan hasar yapısı karakterize edilmiştir. Elde edilen sonuçlar statik yükleme sonuçlarıyla karşılaştırılmış, yerel nokta ve alanlarda meydana gelen hasar modlarının dışında genelde düşük hızlı darbenin statik yüklemeye yakın olduğu sonucuna varılmıştır [64].

Kompozit malzemelerde düşük hızlı darbe sonucu oluşan hasar modları

Kompozit malzemelerde kırılma mekanizmaları darbe türüne ve yapısına bağlı olarak farklılık göstermektedir. Bu malzemelerin darbe davranışını standart bir biçim içerisinde tanımlayabilmek ve sınıflamak oldukça zordur [65, 66]. Hatta darbeye bağlı olarak gelişen hasar mekanizmalarında çarpan kütle tarafında çarpma hızı, darbe enerjisi ve darbe kuvveti; hedef tarafında ise kuvvet, yer değiştirme, darbe etkileşim zamanı ve sönmülenen enerji miktarı parametrelerinden hangisinin daha etkili olduğu konusu çok açık değildir ve bu konulardaki çalışmalar hala devam etmektedir [67].

Fiber takviyeli plastik tabakalar, anizotropik ve heterojen yapılarından dolayı dört değişik önemli hasar modunun ortaya çıkmasına müsaittirler (bunların dışında daha birçok hasar modundan bahsetmek mümkündür). Bu modların tabakalı bir kompozit üzerindeki modeli Şekil 2.9'da görüldüğü gibidir. Hasar modları ve kaynakları aşağıda verilmiştir [47]:

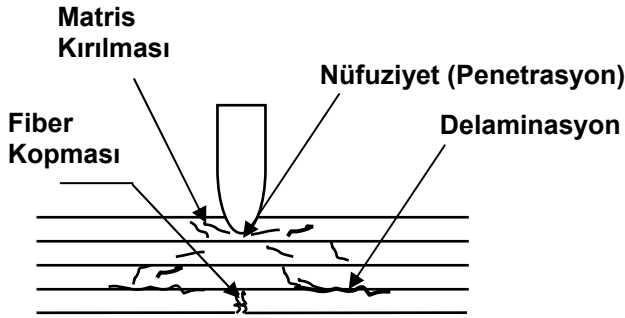
i. Matris modu: Kırılma, darbe tarafında çarpma noktası etrafında gelişen ve kayma gerilmeleri kaynaklı, kesite yaklaşık olarak 45° açı ile meydana gelir.

Plakanın arka tarafında ise çekme gerilmelerinin etkili olduğu kesite paralel, fiberlere dik yönde matris kırılmalarını görmek mümkündür.

ii. Delaminasyon modu: Tabakalar arası eğilme cevabı uyumsuzluğundan kaynaklanır.

iii. Fiber modu: Çekme gerilmesine maruz arka yüze yakın fiberler çekme altında kopabilir, darbe tarafında yer alan fiberler ise sıkıştırma altında burkulabilir.

iv. Nüfuziyet: Çarpan delici çubuğun kompozit malzemeyi delerek malzeme içine nüfuz etmesidir.



Şekil 2.9. Darbe sonucu kompozit malzemedeki oluşan hasar çeşitleri [47]

Yorulma modunun belirlenmesi sadece darbe olayı hakkında bilgi edinmek için değil, ayrıca yapının kalıcı mukavemeti hakkında fikir edinmeyi sağlaması açısından da çok önemlidir. Yorulma modları arasındaki etkileşmeyi anlamak, hasar modunun başlaması ve ilerlemesini anlamak açısından da çok önemlidir.

Bu hasar modları içerisinde özellikle delaminasyon, fiber takviyeli polimer kompozitlere has bir hasar yapısı olarak malzeme mukavemetini etkileyen önemli bir faktördür. Delaminasyon, kompozit malzemeyi oluşturan tabakalar arasında meydana gelen kayma gerilmeleri, ve her tabakada farklı malzeme ve fiber dizilişine bağlı olarak eğilme rijitliğinin değişmesinden

kaynaklanmaktadır. Kompozitin yük altında yapısal bütünlüğünün bozulmasına sebebiyet veren bu durum malzeme mukavemetinin büyük oranda düşmesine neden olur.

Darbe ile malzeme kalınlığı boyunca ortaya çıkan eğilme gerilmeleri neticesinde darbenin etki noktasından itibaren kalınlık boyunca konik yapıya benzer şekilde yoğunlaşan matris kırılmaları, delaminasyon ve fiber kopmaları meydana gelmektedir. Bu hasar yapıları her zaman gözle teşhis edilebilecek yapıda olmazlar. Bu nedenledir ki, belli bir amaç ve uygulamaya yönelik olarak üretilen kompozit malzemelerin belirgin bir hasar oluşumu meydana gelmeden dayanabileceği darbe enerji sınırının (eşik enerjisi) tespiti ve bu sınırın geçilmesi durumunda hasar modlarının gelişimi ve etkisinin belirlenmesi büyük önem taşımaktadır.

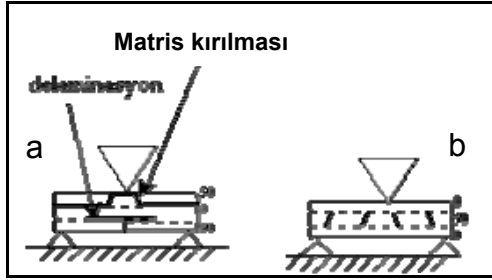
Bu tez kapsamında seramik kompozit sistemlerde, kompozit malzemenin yapısal ve fonksiyonel dayanımını koruyabildiği darbe enerjisi sınır değerleri tespit edilerek, eşik enerjisinin altında ve üstündeki darbelerin kompozit yapıda oluşturduğu hasar modları darbe hızına ve darbe enerjisine bağlı olarak incelenmiştir.

Düşük hızlı darbe olayında çarpan kütle ile hedef arasındaki etkileşim zamanı yeterince uzundur. Bu nedenle darbe süresince hedefteki kuvvet-zaman gelişimi, hasarın meydana gelmesi ve gelişmesi ile ilgili önemli bilgiler açığa çıkarmaktadır [68-71]. Kuvvetin ilk düşüm noktası (ilk eşik) matris çatlaması, fiber kırılması gibi hasar sonucu ortaya çıkmaktadır. İkinci düşüm noktası (ikinci eşik) ise delaminasyon oluşumu ile ortaya çıkmaktadır [71].

Matris hasarı

Literatürde rapor edilen darbe testlerinin çoğunluğu, düşük enerjili testleri içermektedir. Matris hasarı, düşük hızlı darbenin oluşturduğu hasarın ilk tipidir ve genellikle matris kırılması şeklinde meydana gelir. Matris hasarı

ayrıca fiber ve matris ara yüzeyi arasındaki bağın kopması şeklinde de oluşur. Matris kırılmaları, tek yönlü fiberlerden oluşmuş tabakalarda genellikle fiber doğrultusuna dik kesit boyunca oluşur [47, 72]. Tipik bir matris kırılması ve delaminasyon modeli Şekil 2.10'daki gibi açıklanabilir.



Şekil 2.10. Matris kırılması ve delaminasyon hasar oluşumu [72]
(a) Enine görüntü, (b) Boyuna görüntü

Üst ve orta katmanlardaki matris kırılmaları, çarpan cismin kenarının altında başlar (Şekil 2.10-b). Çarpan cismin hemen altında başlayan kesme gerilmeleri sonucunda kırılma 45° eğime sahip düzlemde meydana gelir. Çarpma yüzeyinden uzaktaki alt katmanlarda meydana gelen kırılmalar, eğilme kırılması olarak isimlendirilirler ve karakteristik olarak kesit normaline paraleldirler. Eğilme gerilmesi, tabakaların eğilme deformasyonu ile ilişkilidir [47, 72].

Delaminasyon Hasarı

Tabakalı kompozit malzemede katmanlar arasındaki farklı fiber yönlenmelerinden dolayı bu katmanların eğilme rijitlikleri farklılık gösterir. Delaminasyonun en önemli sebebi; tabakalar arasındaki bu eğilme rijitlik farklılığı ve eğilme kaynaklı gerilmelerdir. Tabakalar arası eğilme rijitliğindeki uyumsuzluk ne kadar büyük olursa ki $0/90$ en kötü fiber doğrultusudur, delaminasyon alanı da o kadar büyük olur. Bunun yanı sıra delaminasyonu malzeme özellikleri, yığılma düzeni ve tabaka kalınlığı gibi diğer bazı faktörler de etkilemektedir [47].

Shyr ve Pan (2003), kompozit katmanlardaki farklı fiber yönlenmelerine bağlı olarak katmanların eğilme rijitliklerinin değişmesiyle oluşan delaminasyonun fiber yönlenmeleri boyunca geliştiğini ve delaminasyon şeklinin katmanlarda kullanılan kumaşın yapısına bağlı olduğunu belirtmişlerdir [73].

Delaminasyon hasarının olduğu noktada absorbe edilen elastik şekil değiştirme enerjisi, E_k , için basit bir ifade aşağıdaki gibidir [74].

$$E_k = \frac{2\tau^2 w L^3}{9E_f t} \quad (2.3)$$

Bu formülde yer alan; t : kalınlık, τ : tabakalar arası kayma dayanımı (mukavemeti), w : genişlik, L : desteklenmemiş uzunluk, E_f : eğilme modülüdür.

Matris kırılması ve delaminasyon hasarları iç içe geçmiş bir yapı ve mekanizmaya sahiptir. Delaminasyonlar, tabakalar arası ara yüzey bölgesinde meydana gelirler. Şekil 2.10-a'da görüldüğü gibi darbeye maruz 0/90/0 tabakaları için delaminasyon ve matris kırılması etkileşmesi göz önüne alındığında; üst katmanlarda çarpan cismin hemen altında kesme gerilmesi sonucunda oluşmuş eğimli kırıklar ara yüzeye ulaştığı zaman durdurulur ve katmanlar arasında delaminasyon olarak ilerler [47].

Delaminasyon, matris kırılmalarından dolayı meydana gelen yüksek mertebedeki düzlem dışı gerilmeler ve ara yüzey boyunca tabakalar arasındaki kesme gerilmelerinden dolayı mod II kırılma olarak başlamaktadır. Hem eğilme gerilmeleri hem de kayma gerilmeleri delaminasyonu başlatabilir. Fakat kayma gerilmeleri nedeniyle oluşan delaminasyon, kararsız ve eğilme gerilmeleri tarafından oluşan delaminasyon ise, kararlıdır ve uygulanan yük ile orantılıdır [47].

Kırılma mekaniği analizlerinde bir başlangıç çatlak ve kırılma boyutu tahmin etmek gerektiğinden, delaminasyonun başlaması ve büyümesine ilişkin bu

analizleri uygulamak zordur. Bu amaçla, izotropik olarak kabul edilebilecek tabakalar için bir başlangıç çatlak boyutu tahmin etmeye gerek kalmadan eşik kuvvetinin bulunabileceği basit bir eşitlik aşağıdaki gibidir [74].

$$P_c^2 = \frac{8\pi^2 E h^3 G_{IIc}}{9(1-\nu^2)} \quad (2.4)$$

Bu formülde yer alan; P_c : eşik kuvvet değeri, G_{IIc} : kritik şekil değiştirme enerjisi azalma hızı, ν : Poisson oranı, h : kalınlık ve E : elastisite modülüdür.

Fiber kopması

Malzemenin mukavemetini yitirmesine neden olan en önemli hasar modlarından olan fiber kopması, matris kırılması ve delaminasyondan çok daha sonra daha yüksek enerjili darbelerde meydana gelir. Fiber kopmasına neden olan faktörlerden birincisi darbe noktasının hemen altında kesme kuvvetlerinin oluşturduğu yüksek lokal gerilmeler ve nüfuziyetin tesiridir. İkincisi ise yüksek eğilme gerilmeleridir. Eğilme kaynaklı ve çekme karakterli gerilmeler altında darbeye maruz kalmayan arka yüzde fiber kopmaları meydana gelmektedir. Yüksek eğilme gerilmelerinin etkisi altında arka yüzdeki fiberlerin kopması için gerekli olan enerjiyi ifade eden eşitlik aşağıdaki şekildedir [74].

$$Enerji = \frac{\sigma^2 w t L}{18 E_f} \quad (2.5)$$

Bu formülde yer alan; σ : eğilme gerilmesi, E_f : fiber elastisite modülü, w : genişlik, L : desteklenmeyen uzunluk, t : numunenin kalınlığıdır.

Nüfuziyet

Nüfuziyet, hasarın gözle görülebilen makroskobik modudur ve çarpan cismin malzemeye tamamıyla nüfuz etmesine müsaade eden, fiberin kritik bir

uzamaya ulaştığı zaman meydana gelir. Nüfuziyetin meydana geldiği darbeler esas olarak balistik ve üzeri hız düzeylerindeki darbeleri oluşturmaktadır. Balistik hızda meydana gelen darbe olayında kompozit malzemede nüfuziyetin olduğu bölgeden (genellikle çarpan cismin büyüklüğünde bir bölgedir) bir parça kesilip dışarı çıkar. Malzemedeki bu parçanın kopup dışarı çıkartılmasıyla absorbe edilen enerji, toplam olarak absorbe edilen enerjinin büyük bir kısmını oluşturur (tabaka kalınlığına bağlı olarak % 50-60) [75].

Literatürde kompozit malzemelerin darbe karşısındaki hasar modlarını incelemek üzere yapılmış çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Yapılan deneylerde darbe sonucu oluşan hasar yapısının malzeme kalınlığına ve darbe enerjisine bağlı olarak farklılık gösterdiği görülmüştür. Ağırlık düşürme testleri bu çalışmalarda sıklıkla kullanılan test yöntemlerinin başında gelmektedir.

Belingardi ve Vadori (2002), ASTM D3029 standardına göre hazırlanan ağırlık düşürme düzeneği ile dokuma ve tek yönlü kumaşların farklı dizilişleriyle ([0/90]s, [0/+60/-60]s, [0/+45/-45]s) imal edilen 2 mm kalınlığında, % 62 fiber ağırlık oranına sahip cam elyaf takviyeli epoksi kompozit malzemelerin düşük hızlarda darbe davranışını incelemiştir. Kompozit malzemenin kırılmaya kadar olan eşik enerjisi ve oluşan hasar derecesinin tesbiti bu çalışmanın amacını oluşturmuştur. Darbe kütlesinin farklı enerjilerde dolayısıyla farklı hızlarda kompozit malzemeye çarpması sağlanarak şekil değiştirme hızının malzemenin darbe davranışına ve hasar yapısına olan etkisi araştırılmıştır. Farklı enerji seviyelerinde kuvvet & zaman, enerji & zaman, kuvvet & deplasman grafikleri bulunarak kompozit malzemenin darbe enerjisine bağlı olarak davranışı ve karakteristik özellikleri tanımlanmaya çalışılmıştır [71].

Freitas ve Reis (1998), karbon fiber takviyeli polimer esaslı kompozitlerin havacılıkta yoğun olarak kullanıldığını, ancak düşük enerjili darbe sonucu

malzeme içinde matris çatlakları, fiber-matris ayrışması gibi oluşan ve makroskobik boyutta gözle görülmeyen hasarların malzemenin çekme dayanımından ziyade basma dayanımını ciddi olarak etkilediğini belirtmişlerdir. Darbe görmüş numuneler üzerinde yapılan basma testlerinde delaminasyonun olduğu bölgelerde kompozit katmanların bükülmeye uğramasına bağlı olarak basma dayanımının önemli ölçüde düşebileceğine dikkat çekilmiştir [76].

Sutherland ve Soares (2005), düşük fiber hacim oranına sahip numuneler (E-Cam/polyester) üzerinde ağırlık düşürme testleri ile yaptıkları çalışmalarında hasar modlarını darbe enerjisi ve malzeme kalınlığına bağlı olarak açıklamaya çalışmışlardır. Bu çalışmada hasar yapıları; delaminasyonun olmadığı, delaminasyonun meydana geldiği ve fiber kırılmasının olduğu üç ayrı safhada incelenmiştir. Küçük darbe enerjilerinde dışarıdan görülmeyen malzemenin iç yapısında meydana gelen delaminasyon tespiti yapılmış, artan enerji ile birlikte penetrasyon ve perforasyon mekanizmasının geliştiği açıklanmıştır. Çarpma kütleye ait darbe ucunun kompozit tabaka kalınlığına oranı; 15' in üstünde olması durumunda malzeme ince, altında olması durumunda ise kalın olarak tanımlanmıştır. İnce hedefte eğilme ve yüzey etkilerinin önemli olduğu, kalın hedefte ise kayma şekil değiştirmelerinin, delaminasyon ve çarpma yüzeyinde oluşan çentik etkisinin baskın olduğu sonucuna varılmıştır [67].

İnce hedeflerde darbe enerjisine bağlı olarak;

- (i) Mümkün olan en küçük darbe enerjilerinde (1 veya 2 J) görülen bir hasarın olmadığı, hasarın ilk işaretlerinin tabaka içinde veya arka yüzde meydana gelen ve fiberlerin dokuma yapısını takip eden matris çatlaklarının olduğu,
- (ii) Artan ancak hala küçük sayılabilecek darbe enerjilerinde çarpma noktası merkezli, yaklaşık olarak dairesel olan iç delaminasyonların olduğu, delaminasyonların birden fazla kumaş yüzeyi boyunca meydana geldiği, çarpma alanında küçük kalıcı bir çarpma izinin olduğu,

(iii) Artan enerji ile delaminasyon alanının giderek arttığı, arka yüzde matris kırılmalarının oluştuğu,

(iv) Son aşamada ise ön yüzde başlayan ve arka yüzde de gelişen fiber kırılmalarının oluştuğu, penetrasyon mekanizmasının gelişerek perforasyona sebebiyet verdiği görülmüştür [67].

Kalın hedeflerde ise darbe enerjisine bağlı olarak;

(i) Mümkün olan en küçük darbe enerjilerinde (2 J) darbe noktasının hemen altında ön yüzde dairesel ve çok küçük lokal bir delaminasyonun oluştuğu

(ii) Çarpma noktasının hemen altında başlayan ve giderek büyüyen iç delaminasyonların oluştuğu, delaminasyonların arka yüzde en geniş alana ulaştığı, çarpma alanında küçük kalıcı bir çarpma izinin oluştuğu,

(iii) Artan enerji ile birlikte darbe noktasındaki çarpma izinin ve çentiğinin iyice belirginleştiği, ön yüzde ve iç kısımlarda meydana gelen delaminasyon alanının giderek arttığı, darbe noktası altında delaminasyonla birlikte matris kırılmalarının oluştuğu ve iç delaminasyonların düzensiz bir şekil aldığı,

(iv) Son aşamada ise ön yüzde fiber kırılmalarının oluştuğu, yeterince yüksek darbe enerjisi yüklemesinde kırılmanın kısmi ve nihayetinde tam perforasyonun meydana geldiği tespit edilmiştir [67].

Kalın ve ince hedefler darbe enerjisinin büyüklüğüne bağlı olarak farklı davranış göstermekle birlikte her iki tip için de hasar mekanizmalarının gelişmesinin temelde üç aşamada olduğu anlaşılmaktadır:

1. Delaminasyonun olmadığı: Oldukça düşük darbe enerjilerinde hasar bölgesi çok küçüktür ve daha ziyade matris çatlaması şeklindedir. Tabakalar arası ayrışma meydana gelmemiştir.

2. Delaminasyonun oluştuğu: Düşük enerjilerde delaminasyon aniden oluşmaya başlar ve artan enerji ile birlikte hızla yayılır. Matris yapıdaki kırılmalarla delaminasyonların birleşmesi hasarın daha önemli boyutlara ulaşmasına neden olur.

3. Fiber kırılmaları: Daha yüksek enerjilerde fiber kırılmaları, penetrasyon ve sonunda perforasyon görülür.

2.5. Zırh Sistemi ve Bileşenlerine Ait Darbe Testleri

Zırh sistemi ve bileşenlerinin kullanılacağı yere ve maruz kalacağı yüklemeye uygun olarak test edilmesi, yeni zırh sistemlerinin geliştirilebilmesi ve zırh malzemelerinin farklı yükleme şartlarında değişik şekil değiştirme hızlarında davranışının tespit edilebilmesi için geliştirilmiş çeşitli test metod ve düzenekleri bulunmaktadır. Basit sarkaç tipi darbe test cihazları, ağırlık düşürme test cihazları, basınçlı (gaz) namlu test düzenekleri, balistik namlulu (barutlu) test düzenekleri ve Split Hopkinson test düzeneği önde gelen darbe test araçlarıdır.

2.5.1. Düşük enerjili darbe testleri

Kompozit malzemelerin darbe davranışını karakterize etmek için standard bir test tekniği veya farklı ülkeler, kuruluşlar ve araştırmacılar arasında yaygın bir şekilde kabul edilen herhangi bir teknik mevcut değildir. Bu durum, farklı kaynaklardan sonuçların karşılaştırılacağı zaman, kompozit malzemelerin darbe cevabı için uygun bir model geliştirme girişimleri için problem yaratmaktadır. Kompozit malzemelerin darbe dirençlerinin belirlenmesi amacıyla günümüzde çeşitli test yöntem ve cihazları yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu kapsamda yer alan ve düşük enerjili darbe testlerinde kullanılan cihazlar sarkaç test (Izod ve Charpy) cihazları ve ağırlık düşürme test cihazlarıdır.

Sarkaç testleri (Izod ve Charpy)

Charpy ve Izod darbe test yöntemlerinde, çentik açılmış bir test numunesi, standart bir yükseklikten bırakılan bir sarkaç ile darbeye maruz bırakılır. Darbeden sonra sarkacın çıktığı yükseklik tespit edilerek sarkacın ilk ve son konumdaki enerji farkı numune tarafından absorbe edilen darbe enerjisi olarak ölçülür. Darbeden sonraki sarkacın yüksekliği ne kadar az ise, absorbe edilen darbe enerjisi, dolayısıyla malzemenin darbe direnci veya

tokluğu da o derece yüksektir. Charpy ve Izod test yöntemleri küçük farklılıklar dışında birbirine çok benzerler. Bu farklılıklardan en önemli olanı, numunenin desteklenme şekli ile çentiğin destek ve darbe noktalarına göre konumudur [47]. Bu test yöntemleri ile elde edilmiş bazı sonuçlar Çizelge 2.9'da görülmektedir.

Çizelge 2.9. Farklı malzemelerin standart V-çentik, Charpy ve Izod darbe enerjileri [47]

Malzeme	Darbe Enerjisi (kJ/m ²)	
	Charpy	Izod
S-Cam/Epoksi(%55 fiber)	734	-
B / Epoksi (%55 fiber)	109-190	-
Kevlar/Epoksi (%60 fiber)	317	158
AS Karbon/Epoksi (%60 fiber)	101-132	33-67
HMS Karbon/Epoksi (%60 fiber)	23	7.5
4340 Çelik (HRC=43-46)	214	-
7075-T6 Alüminyum Alaşımı	153	-
6061-T6 Alüminyum Alaşımı	67	-

Ağırlık düşürme testleri

Ağırlık düşürme test yöntemi, kompozit malzemelerin darbe testleri için tercih edilen yöntem olmaya başlamıştır. Bunun en önemli sebebi daha geniş bir alanda test parametrelerinin belirlenmesi mümkündür ve sonuçlar çok daha kolay analiz edilebilmektedir.

Zırh amaçlı kullanılan malzemelerin testi için ağırlık düşürme testi, balistik özelliklerin belirlenmesi amacıyla kullanılan basit test düzeneklerinden birisidir. Literatürde kompozitlerin düşük hızlı balistik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla yapılan çalışmalarda kompozit katman sayısının

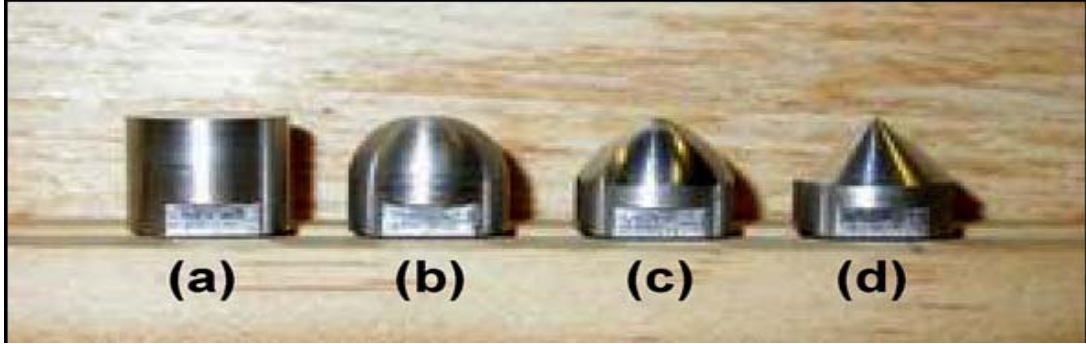
balistik tehditin enerjisinin sönmelenmesindeki en önemli parametrelerden birisi olduğu ortaya konmuştur [77].

Bu cihazların bazıları yer değiştirmeyi veya ivmelenmeyi ölçmektedirler. Bu sayede yük, yer değiştirme ve ivmelenmenin çarpma anındaki değişimi kaydedilir. Bu sonuçlar, darbe yükü-zaman ve darbe enerjisi-zaman değişimlerine dönüştürülebilir. Böylece, en uç noktadaki yük ve absorbe edilen enerji gibi özellikler malzemede meydana gelen kırılma işlemiyle ilişkilendirilebilirler.

Rio ve ark. (2005), özellikle uçak ve uzay endüstrisinde kullanılan karbon fiber takviyeli epoksi matrisli kompozit numunelerin düşük hızlı darbe özelliklerini düşük sıcaklık şartlarında incelemişlerdir. Söz konusu çalışmada tek yönlü [0], dikey çapraz [0/90], izotropik yapıya benzer [45/0/90] fiber yerleşimine sahip prepreglerle düz dikilmiş prepreglerden elde edilmiş katmanlardan oluşan kompozit malzemeler ağırlık düşürme test düzeneği ile test edilmiştir. Tüm numunelerde fiber hacim yüzdesi yaklaşık olarak % 60 civarındadır. 80x80 mm boyutlarında hazırlanan numuneler bilgisayar destekli ve ölçüm kontrollü ağırlık düşürme test cihazı (CEAST, Fractovis 6875) ile sıcaklık kontrollü kabin içerisinde 20°C ile -150 °C arasında test edilmiştir. Kompozit malzemelerde, darbe eşik enerjisinin kompozit yapının farklı diziliş ve kompozisyonu ile olan değişimi, hasar yapısının şekli ve darbe eşik enerjisi ile hasar yapısının ortam sıcaklığı ile olan bağlantısı ortaya konmuştur [78].

Kompozit yapılarda darbe sonucu oluşan hasar yapısı darbe ucu geometrisi ile birlikte hedefin geometrisi ve özellikleri, darbe hızı ve darbe enerjisine bağlı olarak farklılık göstermektedir. Mitrevski ve ark. (2006), dokuma yapıya sahip karbon/epoksi ince kompozit malzemenin Resim 2.8'de görülen farklı geometriye sahip 12 mm çapındaki darbe uçları ile darbe davranışını incelemişlerdir. Ağırlık düşürme testlerinde kuvvet, deformasyon ve darbe zamanı gibi bilgiler kayıt altına alınmıştır. Tahribatsız muayene metotları ve

mikroskop yardımıyla darbe sonrası malzemede oluşan hasar yapısı değerlendirilmiştir [79].



Resim 2.8. Darbe testlerinde kullanılan farklı geometriye sahip uçlar [79]
(a) Düz, (b) Yarı küresel, (c) Ogival, (d) Konik

Düz darbe ucunun hemen altındaki bölgede çarpmaya bağlı hasar izine rastlanmazken silindirik ucun dairesel kenarı etrafında kesme oluşumu gözlenmiştir. Yarı küresel darbe ucuyla yapılan testte en geniş alanlı hasar yapısı meydana gelmiş, delaminasyonlara rastlanmıştır. Daha sivri olan konik darbe ucunda ise daha küçük bir etki alanında yoğunlaşmış fiber kırılmaları ve en derin penetrasyon oluşumu görülmüştür [79].

Burun geometrisi özellikle yüksek hızlarda, mermi ve zırh tasarımı ve çalışmalarında dikkate alınan önemli bir parametredir. Yüksek hızlarda darbe etki noktasında çok kısa bir süre içerisinde ve dar bir alanda malzemenin darbe davranışı gözlemlenirken düşük hızlarda malzemenin darbe cevabının daha uzun bir süre ve daha geniş bir alanda tesir oluşturduğu, kırılma mekanizmalarında ve oluşan hasar yapılarında da hıza bağlı olarak farklılıkların meydana geldiği gözlemlenmiştir [79].

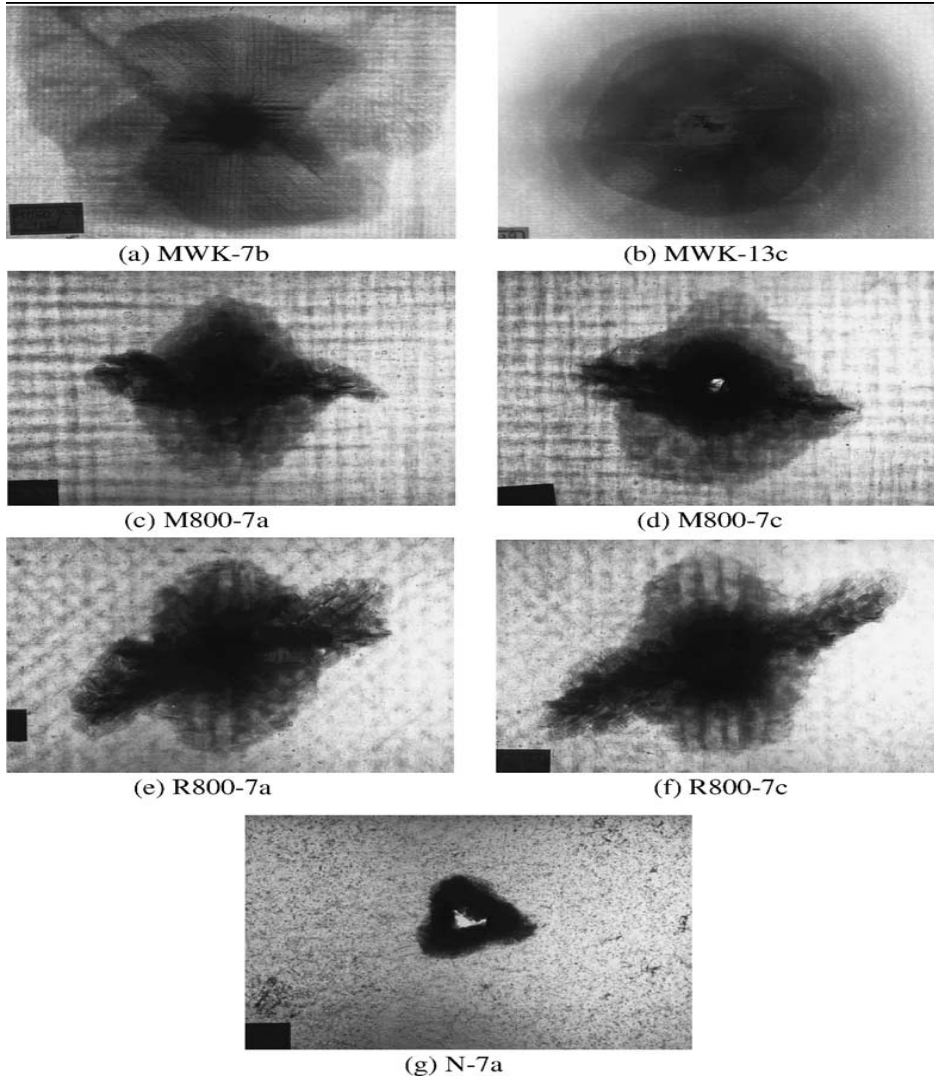
Kompozit malzemelerin düşük hızlı darbeye maruz kalması özellikle bakım esnasında sıklıkla karşılaşılabilen bir problemdir. Bakım veya tamir aletinin malzeme üzerine düşürülmesi durumunda gözle tespiti mümkün olmayan

ancak malzeme iç yapısında meydana gelen hasar çeşitleri mukavemeti % 60'lara varan oranda düşürebilmektedir [80].

Sutherland ve Soares (2005), ağırlık düşürme testlerinde elle yatırma yöntemiyle üretilmiş değişik kalınlıklarda, düşük fiber hacimli dokuma tipi E-Cam/polyester kompozit malzemenin darbe davranışını incelemiştir. Ağırlık düşürme testlerinde çok küçük darbe enerjilerinde dahi tabakalar arasında değişik hasarların oluştuğunu belirtmişlerdir. Artan darbe enerjisiyle birlikte hasar yapısının; matris, fiber ve tabakalar arası birleşme yüzeylerinde çok daha kompleks ve iç içe geçmiş bir mekanizma ile geliştiği tespit edilmiştir. Hasar yapısında darbe enerjisiyle birlikte tabakalardaki malzeme konfigürasyonu ve kalınlıklarının da önemli bir rol oynadığı anlaşılmıştır. Artan darbe enerjisinin kırılma mekanizmalarına olana etkisinin delaminasyon oluşumu ve fiber kırılmaları şeklinde geliştiği görülmüştür [81].

Shyr ve Pan (2003), Dynatup Model 8250 ağırlık düşürme test düzeneği ile 47,53 kg ağırlığında, 12,7 mm. çapında darbe kütlesinin kompozit numunelerde 8, 16 ve 24 J/katman seviyesindeki darbe enerjisinin etki ve sonuçlarını incelemiştir. Darbe kuvveti ve yer değiştirme ölçümlerinin darbe süresince kayıt altına alınması ile darbe kuvveti-zaman ve darbe enerjisi-zaman grafikleri elde edilmiştir. Numune olarak üç ayrı E-cam takviyeli kompozit üzerinde çalışılmıştır: Çok yönlü dikişli kumaş, dokuma kumaş ve kırılmış parçacık elyaf takviyeli matris yapılar. Her bir çok yönlü dikişli kumaş (1141 g/m^2) dört ayrı yönlenmeye sahip E-cam takviyeli kumaşın (0_295 g/m^2 , 45_276 g/m^2 , 90_283 g/m^2 ve 45_276 g/m^2) polyester ipliği ile dikilmesinden oluşmuştur. Dokuma tip kumaşların her biri 800 g/m^2 , kırılmış parçacık takviyeli matris yapıda katmanların her biri ise 300 g/m^2 yoğunluğa sahip olacak şekilde malzeme konfigürasyonu seçilmiştir. Kompozit malzeme esas itibarıyla 7 ve 13 katmanlı kumaşlardan olmak üzere iki farklı kalınlıkta üretilmiştir [82].

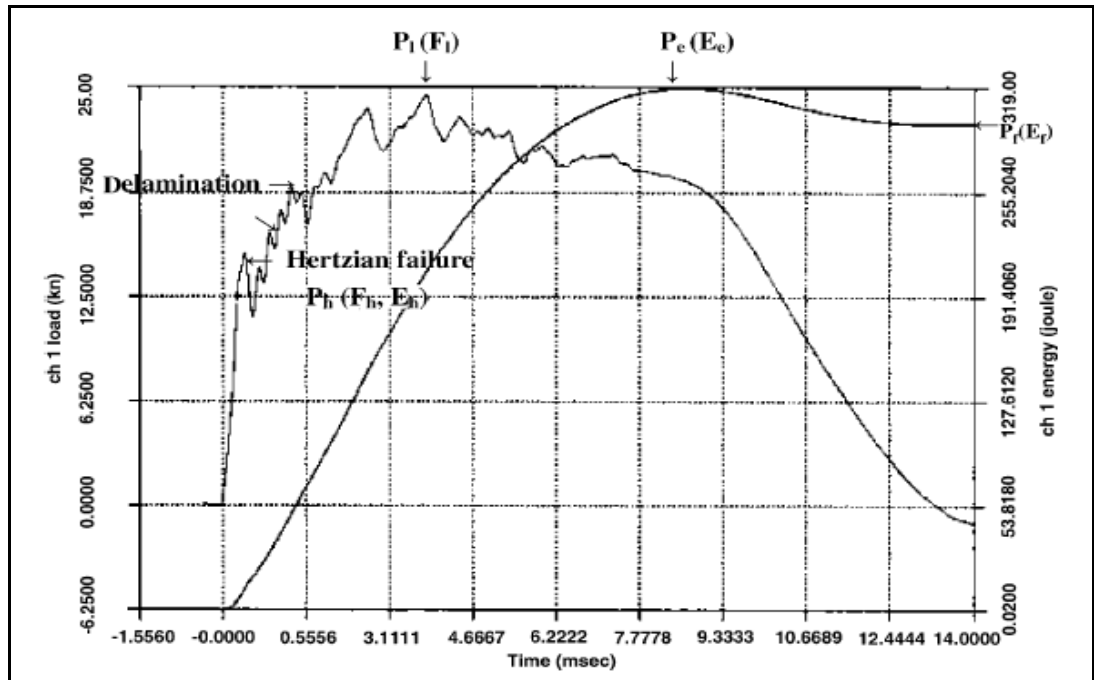
Shyr ve Pan (2003), yaptıkları çalışmada, darbe sonucu oluşan hasar yapısının kompozit malzemenin mikro yapısı ile olan bağlantısını açık bir şekilde göstermiştir. Sürekli olmayan, kırılmış takviyeli kompozit yapıda darbe sonucu penetrasyonun kolaylıkla oluştuğu görülmüştür. Böyle bir yapıda darbe enerjisi tabaka düzlemi doğrultusunda transfer edilememiş, katmanların kesiti doğrultusunda penetrasyona sebebiyet vermiştir. Bu nedenle de Resim 2.9-g'de görüldüğü gibi delaminasyon hasar alanı diğer numunelere kıyasla daha küçük oluşmuştur [82].



Resim 2.9. Darbe sonrasında oluşan hasar yapılarının fotoğrafları [82]
 (a-b) Dikışli, çok yönlü tabakalı, (c-f) Dokuma tip kumaş tabakalar
 (g) Kırılmış, süreksiz fiber takviyeli katmanlı yapı

Dokuma tipi kumaş katmanlardan oluşan kompozit numunelerde fiber yönlenmesine bağlı olarak paralel kenara benzeyen delaminasyon hasar yapısının geometrisinde açılma kayma oluşsa da büyüklüklerinin aynı olduğu ve dikişli çok yönlü kumaş yapıya göre daha küçük olduğu görülmüştür (Resim 2.9 c-f).

Düşük hızlı darbe testinde kuvvet ve enerji grafikleri hasarın başlaması ve gelişmesine ilişkin önemli bilgiler ortaya çıkarmıştır. Shyr ve Pan'ın (2003) çalışmalarında elde ettikleri tipik darbe kuvveti-zaman ve darbe enerjisi-zaman grafikleri Şekil 2.11'de görülmektedir. Darbe kuvveti-zaman grafiğinin P_h noktası Hertz kontak hasarının izlenebileceği durumu ifade eder ki bu noktaya kadar artan darbe kuvvetinin aniden düştüğü görülmüştür [82].

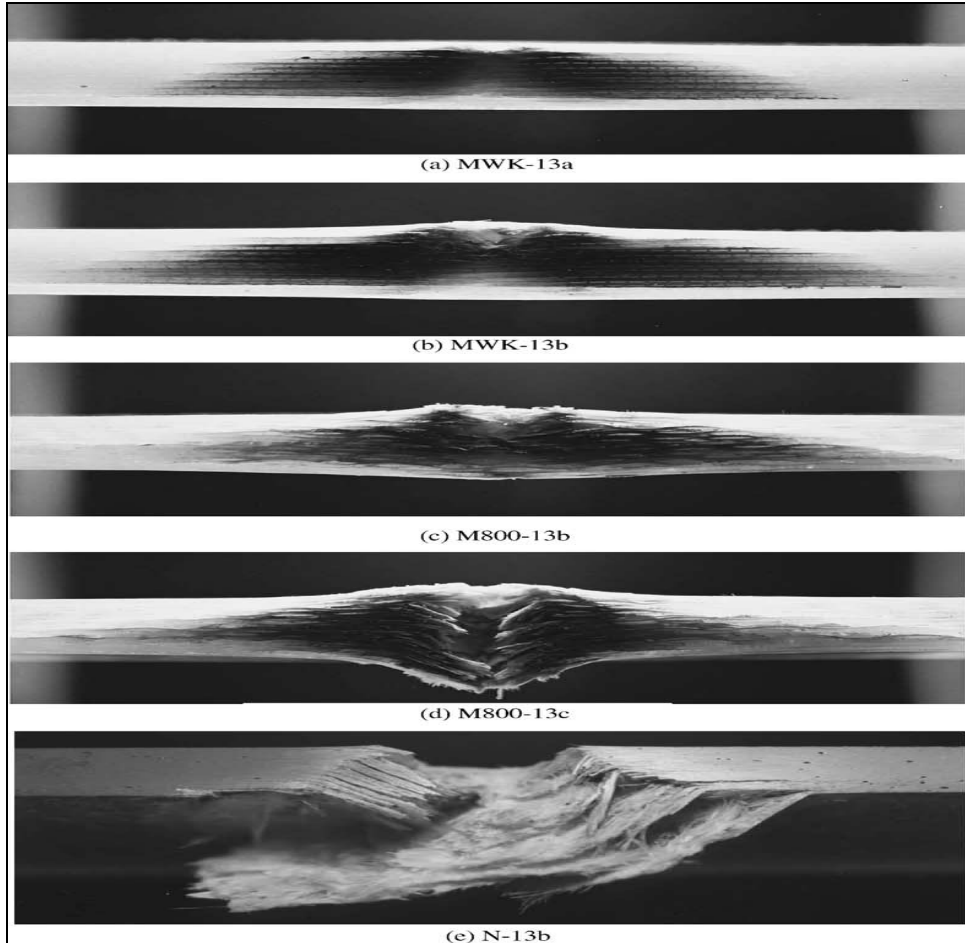


Şekil 2.11. Penetrasyon oluşmamış numunelerde kuvvet-zaman ve enerji-zaman gelişimi [82]

13 katmanlı tabakada Hertz hasarının görülmesi için gerekli darbe kuvveti eşliğinin 7 katmanlı tabakaya göre yaklaşık 3 kat daha büyük olduğu, bu sonucun literatürde yer alan Davies ve Robinson denklemi ile uyumlu olduğu

açıklanmıştır [82]. Davies ve Robinson denklemine göre delaminasyonun başlaması için kritik darbe kuvveti tabaka kalınlığının $3/2$ dereceden üssü ile doğru orantılıdır [83, 84].

Penetrasyon oluşmayan numunelerin darbe kesit alanlarının incelenmesi sonucunda, hasar bölgesinin Resim 2.10'da görüldüğü gibi karanlık bir alanda yoğunlaştığı, darbe eksenini merkezli konik bir yapıda geliştiği, yüzey burkulması, matris çatlakları, delaminasyon ve fiber kopmalarını içerdiği tespit edilmiştir [82].

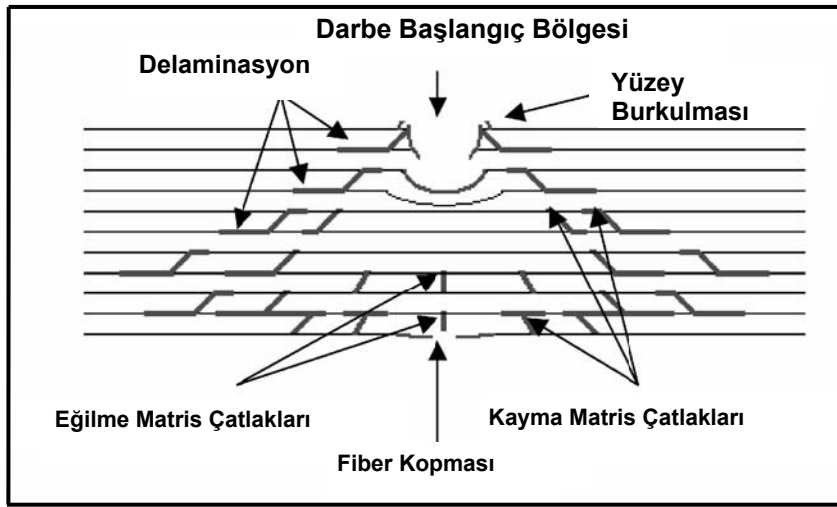


Resim 2.10. Darbe almış katmanların kesit alanlarının fotoğrafları [82]

Kesme kırılmaları modunda meydana gelen matris çatlakları üst çarpma yüzeyinden alta doğru düşeyle 45° lik açıyla ilerlemiş ve katmanlar arası

delaminasyonlarla birleşmiştir. Artan darbe kuvveti ile delaminasyonun genişlediği ve penetrasyonun olduğu Resim 2.10'da görülmektedir.

Kompozit bir tabakada darbe sonucu meydana gelen kırılma çeşitleri şematik olarak Şekil 2.12'de gösterilmiştir.



Şekil 2.12. Kompozit tabakada darbe sonucu oluşan kırılmaların şematik gösterimi [72]

Bu tez çalışması kapsamında, ağırlık düşürme testleri bilgisayar kontrollü Dynatup 9250 test cihazı ile gerçekleştirilmiştir.

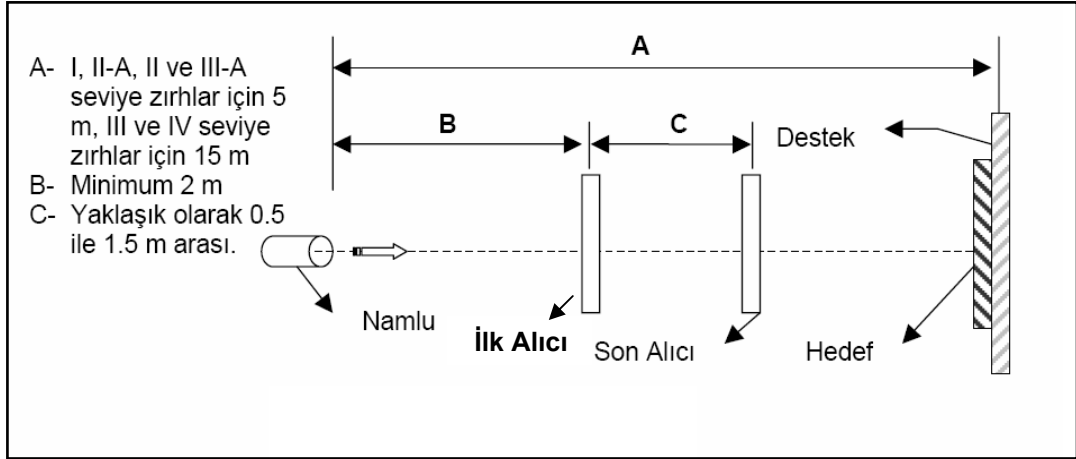
2.5.2. Yüksek enerjili darbe testleri

Yüksek enerjili darbe testleri, hava veya gaz silah test düzenekleri, balistik test düzenekleri ve gaz düzeneği ile birlikte kullanılan Split Hopkinson test düzeneği ile yapılmaktadır.

Balistik Test Düzeneği

Zırh malzemelerinin atışlı testlerinde kullanılan test düzeneği Şekil 2.13'de gösterilmiştir. Test düzeneğinde, merminin iki sensörlü perdeden geçiş

zamanı tespit edildikten sonra perdeler arası mesafe dikkate alınarak ortalama hız bulunmaktadır. Şekil 2.13’de NIJ (National Institute of Justice) standardında belirtilmiş olan koruma seviyeleri için tanımlanmış mermi, hız sensörü perdeleri ve hedef hattı arası mesafeler görülmektedir.



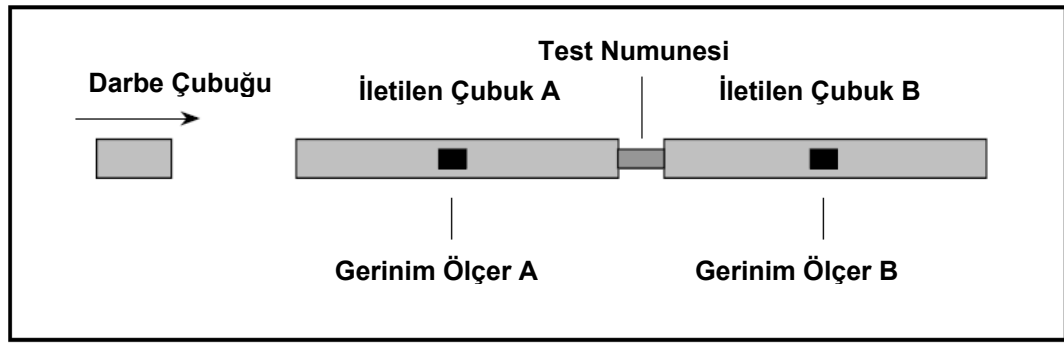
Şekil 2.13. Balistik test düzeneği

Balistik testlerde, balistik standartlarda (NIJ, STANAG 4569, AEP 55) yer alan koruma seviyelerinin öngördüğü çaptaki mermilerle, mermi hızı kullanılan barut hakkıyla ayarlamak suretiyle gerçekleştirilen atışlarda zırhın balistik performansını test etmek mümkün olmaktadır.

Split Hopkinson Test Düzeneği

Split Hopkinson test düzeneği, yüksek şekil değiştirme hızlarında malzemenin dinamik davranışını belirlemek ve bünye denklemlerini gerinme (şekil değiştirme) hızına bağlı olarak formülüle etmek için geliştirilmiştir. Test düzeneği basit olarak Şekil 2.14’de görüldüğü gibi darbe çubuğu, test edilecek malzemenin aralarında yer aldığı elastik iki adet çubuk, ve çubuklar üzerinden birim şekil değiştirmelerin alındığı gerinim ölçerlerden (strain gage) oluşmaktadır. Yüksek şekil değiştirme hızlarında yapılan testler, malzemenin dinamik davranışı konusunda önemli sonuçlar ortaya koymaktadır.

Test düzeneğinde kısa çubuk şeklinde bir test numunesi iki uzun elastik çubuk arasına yerleştirilmektedir. Resim 2.11’de fotoğrafı verilen düzenekte olduğu gibi gaz basınçlı namlu düzeneği ile fırlatılan darbe çubuğu birinci elastik çubuğa çarptığında elastik çubuk içerisinde gelişen basma gerilme dalgaları ilerleyerek bir kısmı test numunesine ve diğer elastik çubuğa basma gerilmesi olarak iletilmekte bir kısmı ise elastik gerilme dalgası olarak geri yansımaktadır. A ve B çubuklarındaki şekil değiştirme bilgisi gerinim ölçerler vasıtasıyla veri okuma kontrol ünitesine aktarılmaktadır.



Şekil 2.14. Split Hopkinson test düzeneğinin şematik gösterimi



Resim 2.11. Split Hopkinson test düzeneği

2.6. Balistik Test Standartları

Hafif silahlara karşı kullanılan zırhlar için balistik performansın ölçümünde NIJ (National Institute of Justice) değerleri veya STANAG 4569 kullanılmaktadır. Çizelge 2.10'da, tabanca, makinalı tabanca ve piyade tüfekleri için kullanılan NIJ Standartları gösterilmiştir. Bu standarda göre balistik dayanım ölçütü zırhın arkasına yerleştirilen ve insanı simule eden macunda meydana gelen çöküntü miktarının 44 mm'nin altında olmasıdır.

STANAG 4569, "Lojistik ve Hafif Zırhlı Araçlardaki Personel İçin Koruma Seviyeleri" standardına göre maksimum 25 mm kalibreye kadar olan silahlar için balistik koruma seviyeleri tanımlanmıştır. Seviye 3'de 0,30 kalibre (7,62 mm) AP zırh delici mermiye karşı koruma esas alınmıştır.

Çizelge 2.10. NIJ 0101.04 Standardı

Zırh Tipi	Test Değişkenleri				Performans Gereklilikleri						
	Test Atışı	Test Mermisi	Mermi Kütleli	Referans Mermi Hızı (± 9 m/s / 30 ft/s)	0° Çarpma Açısındaki Atış Sayısı	Maksimum Travma Derinliği	30° Çarpma Açısındaki Atış Sayısı	Panel Başına Atış Sayısı	Numune Başına Atış Sayısı	Tehdit Başına Atış Sayısı	Toplam Atış Sayısı
I	1	22 caliber LR LRN	2.6 g 40 gr	329 m/s (1080 ft/s)	4	44 mm (1.73 in)	2	6	12	24	48
	2	380 ACP FMJ RN	6.2 g 95 gr	322 m/s (1055 ft/s)	4	44 mm (1.73 in)	2	6	12	24	
IIA	1	9 mm FMJ RN	8.0 g 124 gr	341 m/s (1120 ft/s)	4	44 mm (1.73 in)	2	6	12	24	48
	2	40 S&W FMJ	11.7 g 180 gr	322 m/s (1055 ft/s)	4	44 mm (1.73 in)	2	6	12	24	
II	1	9 mm FMJ RN	8.0 g 124 gr	367 m/s (1205 ft/s)	4	44 mm (1.73 in)	2	6	12	24	48
	2	357 Mag JSP	10.2 g 158 gr	436 m/s (1430 ft/s)	4	44 mm (1.73 in)	2	6	12	24	
IIIA	1	9 mm FMJ RN	8.0 g 124 gr	436 m/s (1430 ft/s)	4	44 mm (1.73 in)	2	6	12	24	48
	2	44 Mag SJHP	15.6 g 240 gr	436 m/s (1430 ft/s)	4	44 mm (1.73 in)	2	6	12	24	
III	1	7.62 mm NATO FMJ	9.6 g 148 gr	847 m/s (2780 ft/s)	6	44 mm (1.73 in)	0	6	12	12	12
IV	1	30 caliber M2 AP	10.8 g 166 gr	878 m/s (2880 ft/s)	1	44 mm (1.73 in)	0	1	2	2	2
Özel	*	*	*	*	*	44 mm (1.73 in)	*	*	*	*	*

* Kullanıcı tarafından belirtilir.

Panel: Zırh numunesinin ön veya arka yüzeyi.

Bu tez kapsamında seramik kompozit zırh sisteminin balistik koruma seviyesi, STANAG 4569, NIJ standartları ve MIL-PRF-46103E standartları doğrultusunda belirlenmiştir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

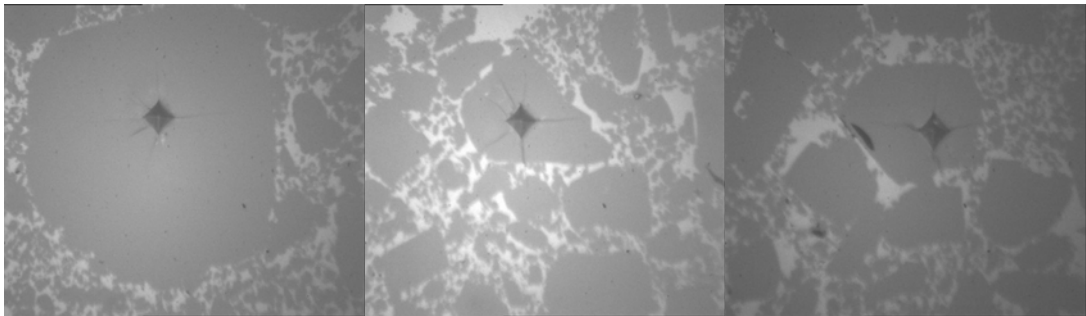
3.1. Zırh Sistemi Bileşenleri

Bu tez kapsamında darbe özellikleri incelenen zırh sistemi, seramik ön yüz ve arka destek plakadan oluşan katmanlı yapıya sahiptir. Ön yüzde seramik malzeme olarak alumina, bor karbür ve silisyum karbür kullanılmıştır. Arka destek plakada ise polimer esaslı kompozit malzeme ve yüksek mukavemetli homojen haddelenmiş alaşımlı çelik (RHA Çeliği) kullanılmıştır.

Zırh sistemi yapısını oluşturan seramik ve kompozitlere, öncelikle elektronik kontrollü ve yazılım desteğine sahip INSTRON marka, Dynatup 9250 model ağırlık düşürme test cihazında düşük enerjili ve düşük hızlı darbe testleri uygulanmıştır. Darbe testlerinde kullanılan seramik malzeme ve özellikleri aşağıda verilmiştir:

3.1.1. Alumina seramik (Al_2O_3)

Lauffer marka VPM 40 model preste 25 bar basınç altında 60 x 120 mm ebatlarında kalıpta preslenen ve 1650 °C'de sinterlenen alumina plaka kırılmış ve kırık yüzey bakalite alınıp parlatıldıktan sonra Zwick marka mikro sertlik cihazında 500 g yükte sertlik değeri "vickers" cinsinden ölçülmüştür (Resim 3.1). Alumina seramiğin malzeme özellikleri Çizelge 3.1'de verilmiştir.



Resim 3.1. Alumina plakaların sertliklerinin bulunması

Çizelge 3.1. Alumina seramiğin malzeme özellikleri

Al₂O₃ Malzeme Özellikleri	
Yoğunluk (g/cm³)	3,550
Su Emme (%)	2,276
Porozite (%)	8,083
Sertlik (HV)	1935 ± 82

Ağırlık düşürme testlerinde ve balistik testlerde kullanılan alumina plakaların ağırlık (Resim 3.2) ve hacim bilgisinden ortalama özgül ağırlıkları hesaplanmıştır (Çizelge 3.2).



Resim 3.2. Alumina plakaların ağırlıklarının ölçümü

Çizelge 3.2. Aluminanın özgül ağırlık hesabı

Kalınlık (mm)	En (mm)	Boy (mm)	Hacim (cm³)	Ağırlık (g)	Yoğunluk (g/cm³)
4,35	50,94	101,47	22,485	80	3,558
8,31	51,17	101,34	43,092	153,3	3,557
8,39	51,35	101,68	43,806	155,9	3,559

3.1.2. Bor karbür seramik (B₄C)

Ağırlık düşürme ve balistik testlerde kullanılan bor karbür plakaların ağırlık

(Resim 3.3) ve hacim bilgisinden ortalama özgül ağırlıkları hesaplanmıştır (Çizelge 3.3).



Resim 3.3. Bor karbür plakanın ağırlık ölçümü

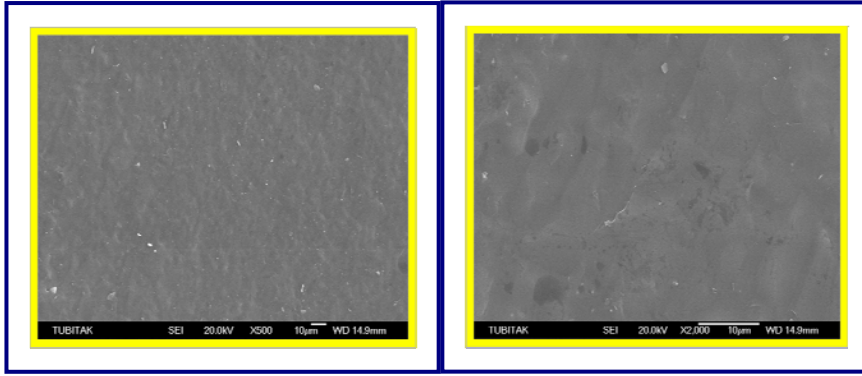
Çizelge 3.3. Bor karbürün özgül ağırlık hesabı

Kalınlık (mm)	En (mm)	Boy (mm)	Hacim (cm ³)	Ağırlık (g)	Yoğunluk (g/cm ³)
10,69	100,91	100,96	108,908	267,6	2,457
10,33	100,52	100,59	104,450	256,6	2,457
10,22	100,35	100,43	102,999	253,1	2,457

Üretici firmanın bor karbürün malzeme özelliklerine ilişkin vermiş olduğu bilgi ise Çizelge 3.4'de görülmektedir. Çizelge 3.3'deki yoğunluk hesaplamaları üretici firma bilgileri ile örtüşmektedir. Bor karbürün mikro yapısına ait elektron mikroskop tarama (SEM) görüntüleri Resim 3.4'de verilmiştir.

Çizelge 3.4. Testte kullanılan bor karbürün genel özellikleri

B₄C Malzeme Özellikleri	
Yoğunluk (g/cm³)	2,457
Su Emme (%)	0,151
Porozite (%)	0,372
Sertlik (HV)	4452



(a)

(b)

Resim 3.4. Bor karbürün taramalı elektron mikroskop görüntüleri
(a) 500 büyütme, (b) 2000 büyütme SEM görüntüleri

3.1.3. Silisyum karbür seramik (SiC)

Ağırlık düşürme ve balistik testlerde kullanılan silisyum karbür plakaların ağırlık (Resim 3.5) ve hacim bilgisinden ortalama özgül ağırlıkları hesaplanmıştır (Çizelge 3.5). Bulunan değerler silisyum karbür seramiğin üretici firması tarafından verilen yoğunluk bilgileriyle aynıdır.



Resim 3.5. Silisyum karbür plakanın ağırlık ölçümü

Çizelge 3.5. Silisyum karbürün özgül ağırlık hesabı

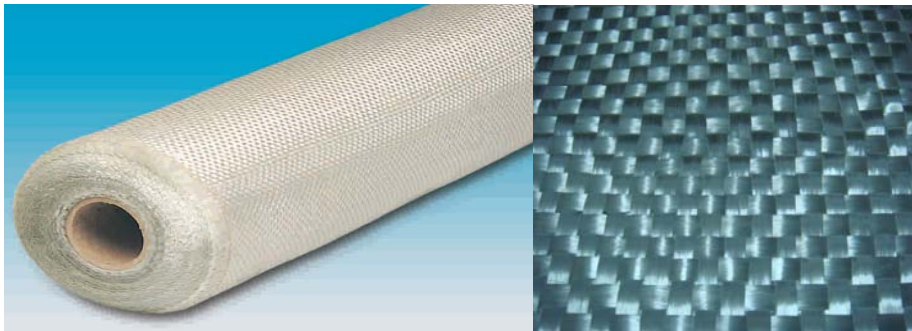
Kalınlık (mm)	En (mm)	Boy (mm)	Hacim (cm ³)	Ağırlık (g)	Yoğunluk (g/cm ³)
9,86	99,81	100,03	98,442	308	3,129
10,07	100,37	100,24	101,315	317	3,129

3.1.4. Kompozit malzeme

Ağırlık düşürme ve balistik testlerde kullanılmak üzere iki farklı elyaf malzemesiyle üç farklı özellikte kompozit plaka üretilmiştir. Kompozit malzeme yapısında takviye elemanı olarak E tipi cam elyaf polyester reçineyle birlikte, aramid elyaf ise fenolik reçineyle birlikte kullanılmıştır.

E tipi cam elyafla üretilen kompozit plakalarda iki farklı kumaş tipi kullanılmıştır. Kumaşlardan birincisi 800 g/m² ağırlığındaki düz dokuma kumaştır (Resim 3.6). Ürün kodu CD 125-800 olarak verilmiş olan düz dokuma kumaşa ait tekstil özellikleri Çizelge 3.6'da verilmiştir. Diğeri ise kumaş yapısı içerisinde tek yönlü fiberlerin ve fiberlere dik doğrultuda oldukça seyrek ve ince elyaf demetlerinin polyester iplikle dikilmesiyle oluşturulan 500 g/m² ağırlığındaki kumaştır (Resim 3.7). Tek yönlü kumaşlar, kompozit yapıda [0/90] dizilişine sahip olacak şekilde üretilmiştir. E tipi cam elyaf kumaşların polyester reçineyle birlikte polimerleşme işlemi 20 kg/cm² basınç altında, 140 °C'de sıcak presleme ile gerçekleştirilmiştir.

Kompozit malzeme pres altında 400 x 400 mm ebatlarında üretilmiştir. Darbe testlerinde kullanılmak üzere 100 x 100 mm ölçülerinde değişik kalınlıklarda (2,17-14,58 mm), balistik testlerde kullanılmak üzere ise 200 x 200 mm ölçülerinde 14,35 mm kalınlığında ve 300 x 300 mm ölçülerinde 8,07, 9,75 ve 14,35 mm ölçülerinde kesilmiştir.



Resim 3.6. 800 g/m² ağırlığındaki düz dokuma E-Cam kumaşı

Çizelge 3.6. Düz dokuma kumaş tekstil özellikleri

Ürün kodu	Birim alan ağırlığı (g/m ²)	Fıtil teksi		Sıklık adet / 10 cm	
		Atkı teks	Çözü teks	Atkı sayısı	Çözü sayısı
CD 125-300	300	600	600	25	24
CD 125-500	500	1200	1200	22	20
CD 125-600	600	1200	1200	25	25
CD 125-800	800	2400	2400	18	16
CD 125-900	900	2400	2400	20	18

Resim 3.7. 500 g/m² ağırlığındaki tek yönlü E-Cam kumaşı

Kompozit yapıda kullanılan cam elyafının yoğunluğu $\rho_{\text{cam elyaf}} = 2,54 \text{ g/cm}^3$ olarak verilmiştir. Polymerleşme işleminde kullanılan polyester reçinenin üretici firma tarafından verilen mekanik özellikleri Çizelge 3.7'de görülmektedir. Polyester özgül ağırlığı $\rho_{\text{poly.}} = 1,22 \text{ g/cm}^3$ olarak verilmiştir.

Çizelge 3.7. Polyester reçinenin mekanik özellikleri

Özellikler	Birim	Spesifikasyon Değerleri
Sertlik	Barcol	Min.45
Eğilme Dayanımı	kgf/cm ²	Min.1000
Çekme Dayanımı	kgf/cm ²	Min.550

Resim 3.8'de 3, 7, 10, 13, 16 ve 24 kat kumaşla üretilen ve 2,3 - 14,35 mm arası kalınlıktaki dokuma E-Cam kompozitlerin ağırlık ölçümü görülmektedir.

Testlerde kullanılan çeşitli kalınlıklardaki dokuma E-Cam kumaş ve polyester reçineden imal edilmiş kompozit plakaların boyut, hacim, ağırlık, yoğunluk, her bir kalınlıktaki kompozit plakada yer alan kumaş kat adedi, elyaf ağırlığı, fiber ağırlık ve hacim yüzdesi gibi kompozite ait yapısal malzeme özellikleri Çizelge 3.8’de verilmiştir.



Resim 3.8. Dokuma E-Cam kompozit plakaların ağırlık ölçümü

Çizelge 3.8. Dokuma E-Cam kompozit plakaların yapısal özellikleri

Numune Numarası	Kalınlık (mm)	En (mm)	Boy (mm)	Hacim (cm ³)	Ağırlık (g)	Yoğunluk (g/cm ³)	E-Cam Kat Sayısı	Elyaf Ağırlığı (g)	Fiber Ağırlık Oranı (%)	Fiber Hacim Oranı (%)
1	2,3	100,14	100,26	23,09	37,7	1,63	3	24,10	64	41
2	3,85	99,22	99,14	37,87	76,3	2,01	7	55,09	72	57
3	5,67	99,16	99,08	55,71	109,8	1,97	10	78,60	72	56
4	8,13	100,17	99,82	81,29	145,4	1,79	13	103,99	72	50
5	9,75	100,22	100,11	97,82	180,6	1,85	16	128,42	71	52
6	14,35	99,94	100,2	143,70	273,1	1,90	24	192,27	70	53

Tek yönlü E-Cam fiber takviyeli kompozitin yapısal malzeme özellikleri ise Çizelge 3.9’da görülmektedir.

Çizelge 3.9. Tek yönlü E-Cam kompozit plakaların yapısal özellikleri

Numune Numarası	Kalınlık (mm)	En (mm)	Boy (mm)	Hacim (cm ³)	Ağırlık (g)	Yoğunluk (g/cm ³)	E-Cam Kat Sayısı	Elyaf Ağırlığı (g)	Fiber Ağırlık Oranı (%)	Fiber Hacim Oranı (%)
1	2,17	100,21	100,41	21,83	39,4	1,80	5	25,16	64	45
2	4,00	100,43	99,81	40,10	73	1,82	9	45,11	62	44
3	6,07	100,55	100,15	61,13	103,9	1,70	13	65,46	63	42
4	7,92	100,35	99,72	79,25	138,5	1,75	18	90,06	65	45
5	9,92	100,26	100,21	99,67	177	1,78	23	115,54	65	46
6	14,58	99,82	100,48	146,24	265	1,81	33	165,49	62	45

Düz dokuma aramid kumaş fenolik reçine emdirilmiş olarak (prepreg) kullanılmıştır. Aramid malzemenin üreticisi Pro Systems tarafından onaylı sertifika belgesiyle verilen malzeme özellikleri Çizelge 3.10’da yer almaktadır. Aramid kumaştan üretilen kompozit plakalara ait malzeme özellikleri ise Çizelge 3.11’de verilmiştir.

Çizelge 3.10. Aramid kumaşın yapısal özellikleri

Elyaf Malzeme	Atkı Sıklığı (Adet/cm)	Çözümlü Sıklığı (Adet/cm)	Prepreg Reçinesi	Prepreg Ağırlığı (g/m ²)	Reçine % Ağırlık
% 100 Aramid	6,4	6,4	Fenolik	467,3	12,3

Çizelge 3.11. Aramid kumaşla üretilen kompozit plakaların özgül ağırlıkları

Kalınlık	En	Boy	Hacim (cm ³)	Ağırlık	Yoğunluk (g/cm ³)
1,98	100,21	100,35	19,911	23,3	1,170
4,07	50,35	100,44	20,583	24,1	1,171
6,14	100,11	100,04	61,492	71,9	1,169
8,07	100,12	100,26	81,007	94,8	1,170

3.1.5. Yüksek mukavemetli homojen haddelenmiş çelik

Homojen haddelenmiş yüksek mukavemetli alaşım çeliği (RHA çeliği) ile ilgili balistik testler iki temel amaca yönelik olarak yapılmıştır. Birincisi seramik ön yüzlü zırh sisteminde takviye plaka olarak kullanılması, ikincisi ise balistik özellikleri incelenen seramik kompozit zırh sistemlerinin balistik performanslarının (kütle ve hacim etkinliği açısından) belirlenmesinde referans ve mukayese olarak kullanılmasıdır. MIL-A-12560 ve MIL-A-46100 standartları, askeri amaçla geliştirilen muharebe araçlarının zırhlandırılması ve mühimmat geliştirme çalışmalarında temel referans olarak kullanılan askeri standartlardır. RHA çeliğinin kimyasal analizleri ve ortalama sertlik ölçüm değerleri Çizelge 3.12 ve Çizelge 3.13’de verilmiştir.

Çizelge 3.12. Homojen haddelenmiş yüksek mukavemetli çeliklerin kimyasal analizleri

KİMYASAL ANALİZ (BİLEŞİM)									
İstenen Analiz Değerleri	%max	0,30	0,60	1,0	0,025	0,015	1,75	0,50	
	%min	0,10	0,20						0,20
Malzeme İsmi		C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
RHA Çeliği 8 mm		0,310	0,280	0,700	0,009	0,001	0,920	0,350	0,250
RHA Çeliği 15 mm		0,272	0,337	0,699	0,007	0,001	0,920	0,301	0,249

Çizelge 3.13. Homojen haddelenmiş yüksek mukavemetli çeliklerin kimyasal analizleri ve sertlik ölçümü

KİMYASAL ANALİZ VE SERTLİK ÖLÇÜMÜ						
İstenen Analiz Değerleri	%max	0,10	0,003		0,10	Sertlik Değeri (Brinell Sertliği)
	%min					
Malzeme İsmi		Al	B	Nb	Ti	
RHA Çeliği 8 mm		0,100	0,0025	0,024	0,006	327
RHA Çeliği 15 mm		0,080	0,0023	0,026	0,008	522

3.1.6. Polimer yapıştırıcı

Çabuk kuruyan primersiz yapıştırıcı kullanılmıştır. Kullanılan yapıştırıcı hava ile temas ettiğinde (hava nemi ile) kürleşen (sertleşen) yüksek performanslı, elastik, tek komponentli ve poliüretan bazlı mükemmel yapışma kabiliyeti olan bir malzemedir. ISO 9001/14001 standartlarına uygun olarak üretilmiştir. Polimer yapıştırıcı uygulanmış bor karbür plakalara ait çekilen fotoğraflar Resim 3.9'da görülmektedir.



Resim 3.9. Bor karbürlerin polimer yapıştırıcı ile kompozite yapıştırılması

3.2. Seramik Kompozit Zırh Sistemi Bileşenlerinin Mekanik Testleri

3.2.1. Üç noktadan eğme testi

Ağırlık düşürme testlerinde kompozit plaka veya seramik malzemede düzleme dik doğrultuda etki eden darbe kuvvetleri malzemede eğme karakterli zorlanma meydana getirdiğinden dolayı kompozit ve seramik malzemenin mekanik özellikleri üç noktadan eğme testi ile belirlenmiştir.

Kompozit malzemenin üç noktadan eğme testleri TS 985 EN ISO 178 (Mart 2006), "Plastikler - Eğilme Özelliklerinin Tayini" standardına göre yapılmıştır. Testlerde deney hızı, 1 mm/dak alınmıştır. İki mesnet ve yük uygulama ucu,

Resim 3.10'da gösterildiği gibi yerleştirilmiştir. Mesnetler ve yük uygulama ucunun merkezleri, deney numunesinin genişliğinin orta noktasından geçecek şekilde ayarlanmıştır. Üç noktadan eğme testi Zwick marka Z 250 SN5A model test tezgahında 50 kN kuvvet ölçer (loadcell) ile yapılmıştır.



Resim 3.10. Üç noktadan eğme test cihazı, mesnetler ve yük uygulama ucu

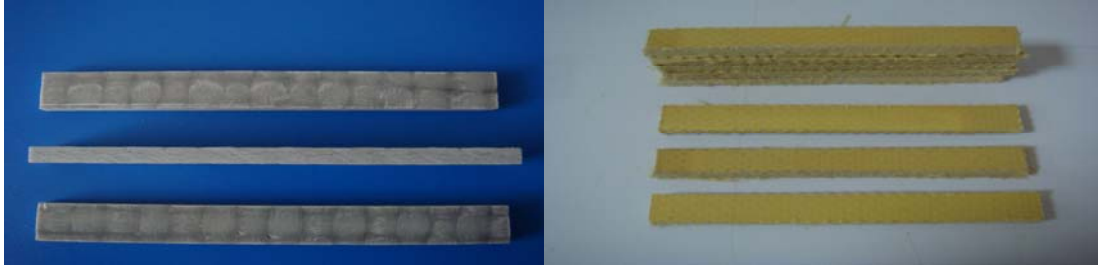
Yük uygulama ucunun ve mesnetlerin yarıçapı, kalınlığı (h) 4,0 mm olan numuneler için 5,0 mm olacak şekilde test aparatı kullanılmıştır. Kalınlığı 2,0 mm olan numunelerde ise yük uygulama ucunun yarıçapı 5 mm, mesnetlerin yarıçapı ise 2,0 mm olacak şekilde aparat seçimi yapılmıştır. Mesnetler arası mesafe (L), $L / h = 16$ olacak şekilde;

$$h = 4 \text{ mm için } L = 64 \text{ mm,}$$

$h = 2 \text{ mm için } L = 32 \text{ mm}$ alınmış, aynı zamanda standart tarafından uygun görüldüğünden $L / h = 32$ oranına göre hazırlanan numunelerde $L = 64 \text{ mm}$ alınmıştır. Deney numunelerinin boyutları Çizelge 3.14'de verilmiştir. Bazı deney numune fotoğrafları Resim 3.11'de görülmektedir.

Çizelge 3.14. Üç noktadan eğme testi, kompozit deney numune boyutları

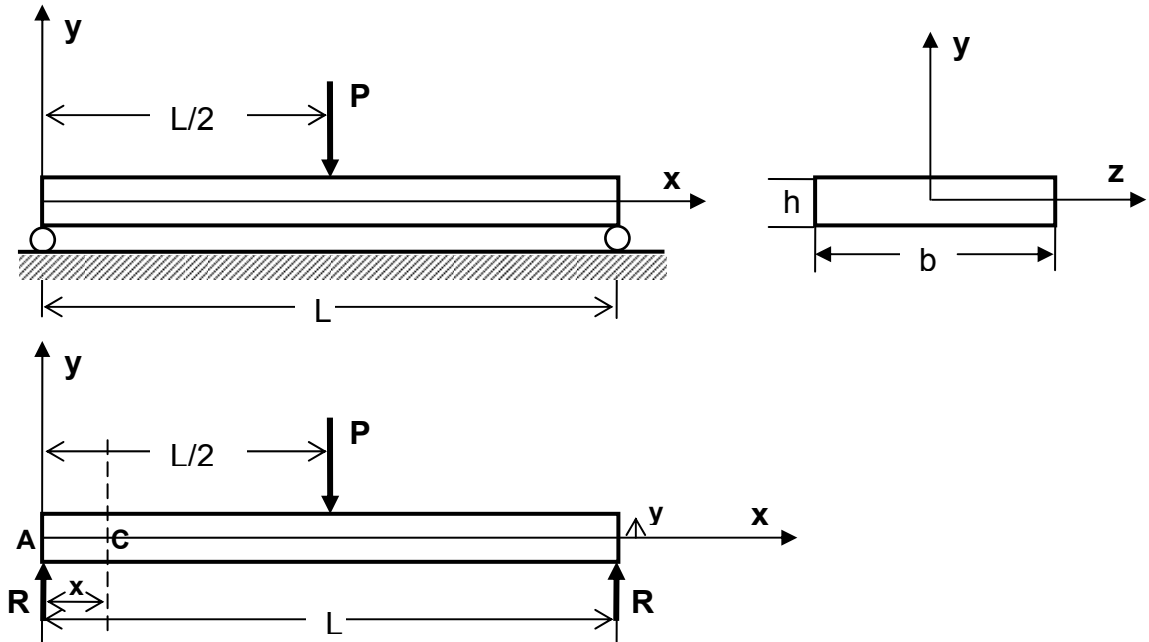
Test Numunesi Kalınlık, h (mm)	Genişlik, b (mm)	L/h	l/h	Uzunluk, l (mm)	Mesnetler arası mesafe L (mm)
$4 \pm 0,2$	$10,0 \pm 2,0$	16	20 ± 1	$80,0 \pm 2,0$	64
$2 \pm 0,2$	$25,0 \pm 0,5$	16	20 ± 1	$40,0 \pm 2,0$	32
$2 \pm 0,2$	$25,0 \pm 0,5$	32	40 ± 1	$80,0 \pm 2,0$	64



Resim 3.11. Üç noktadan eğme testinde kullanılan kompozit numuneler

Üç noktadan eğme testlerinde kullanılan malzeme boyutları ve test metodu genel esasları itibariyle ASTM D 790 “Standart test methods for flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials” standardıyla da uyumludur.

Üç noktadan eğme test düzeneğinde iki kenarından serbest desteklenen çubuğa ait kuvvet ve mesnet bağlantıları Şekil 3.1’de görülmektedir.



Şekil 3.1. Üç noktadan eğme testi serbest cisim diyagramı

Üç noktadan eğme testinde eğilmeye maruz çubuğa ait yükleme ve uç noktadaki basit kayar mesnet sistemi simetrik olduğundan, söz konusu

yüklemeye durumu orta noktasına P kuvveti uygulanan çubuk veya kiriş problemi gibi değerlendirilebilir. Çubuk kesitine etki eden gerilmelerin maksimum değeri;

$$\sigma_{\max} = \frac{3PL}{2bh^2} \quad (3.1)$$

bağıntısıyla hesaplanmaktadır. Bu formülde yer alan P çubuğa uygulanan yükü, L mesnetler arası mesafeyi, b eğme numunesi genişliğini, h ise eğme numunesi kalınlığını ifade etmektedir. Üç noktadan eğme testinde, eğme gerilmelerini bulmak için ASTM 790 ve EN ISO 178'de tanımlanan formül Eş. 3.1'le aynıdır.

Seramik malzemenin üç noktadan eğme testleri ise European Standart EN 843-1 "Advanced technical ceramics - Mechanical properties of monolithic ceramics at room temperature - Part 1: Determination of flexural strength" standardına uygun olarak yapılmıştır. Seramik test numuneleri sinterleme işleminden sonra önce kaba sonra da ince taşlama uygulanarak 34 x 6 x 3 mm ölçüsüne getirilmiştir. Üç noktadan eğme testinde mesnetler arası mesafe 20 mm alınmıştır.

3.2.2. Çekme testi

Çekme testi homojen haddelenmiş yüksek mukavemetli çelik için yapılmıştır. Çekme test cihazı Zwick marka ve Z 250 SN5A modeldir (Resim 3.12). Yük kapasitesi 250 kN, yük hücresi (loadcell) 0,5kN, 30kN, 50kN, 100kN, 250kN, çekme hız aralığı 0,001-600 mm/dk, kolonlar arası mesafe 630 mm'dir.

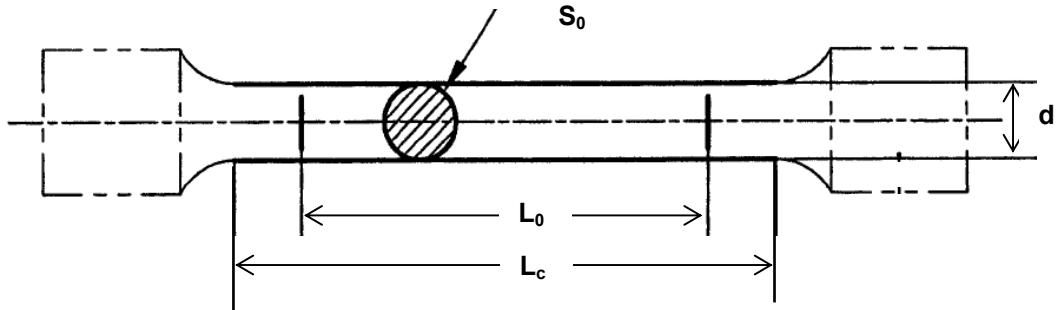
TS 138 EN 10002-1 "Metalik Malzemeler, Çekme Deneyi Bölüm 1: Ortam Sıcaklığında Deney Metodu" standardının kalınlığı 3 mm veya daha büyük saclarda kullanılan deney parçası tiplerine uygun olarak boyutları Çizelge 3.15 ve Şekil 3.2'de verilen test numuneleri hazırlanmıştır.



Resim 3.12. Zwick marka çekme test tezgahı

Çizelge 3.15. Çekme test numunesi boyutları

Çap d (mm)	İlk kesit alanı S_0 (mm ²)	İlk ölçü uzunluğu L_0 (mm)	Paralel uzunluk, L_c (mm)	Toplam uzunluk L_t (mm)
$10 \pm 0,075$	78,5	$50 \pm 0,5$	asgari 55	Numune sabitleme metoduna bağlı olarak $L_t > L_c + 2d$ veya $4d$



Şekil 3.2. Çekme test numunesi şekli

3.2.3. Zırh sistemi bileşenlerinin sertlik tarama testleri

Çelik malzemenin sertliği EMCO Test M5C 030 genel sertlik test cihazı ile ölçülmüştür (Resim 3.13). Deneyde kullanılan bilye çapı 10 mm, yük ise 3000 kgf'dir.

Seramik malzemenin sertlikleri ise Zwick/ZHV 10 marka ve model mikro sertlik ölçüm cihazı ile 500 g yük altında yapılmıştır (Resim 3.14).



Resim 3.13. EMCO sertlik ölçüm cihazı



Resim 3.14. Zwick/ZHV 10 mikro sertlik ölçüm cihazı

ASTM D2583’de takviyelendirilmiş plastiklerin sertlik ölçümünün Barcol sertlik ölçüm cihazı ile yapılabileceği belirtilmiştir. Bareiss marka Barcol sertlik ölçüm cihazı ile kompozit malzemenin sertlikleri ölçülmüştür. Cihazın sivri çelik ucu sabit bir basınç altında plastik malzeme yüzeyine daldırılıp malzeme içerisindeki nüfuziyet derinliği (DOP: depth of penetration) Barcol sertliğine çevrilmek suretiyle sertlik tayini yapılmıştır.

3.3. Darbe Test Düzeneği

Kompozit ve seramik malzemelerin darbe testlerinde Resim 3.15’de görülen

INSTRON marka Dynatup 9250 model ağırlık düşürme test düzeneği kullanılmıştır.



Resim 3.15. INSTRON Dynatup 9250 ağırlık düşürme test düzeneği

Dynatup 9250 test düzeneği yüksek performansa sahip platform, ana yapı, sensör düzeneği, geniş bant aralığına sahip dijital sinyal sistemi, hassas kuvvet ölçer, darbe kontrol, veri toplama ve düzenleme yazılımı ile donatılmıştır. Resim 3.16'da görülen test cihazının yapısal elemanları ve görevleri özetle aşağıda verilmiştir:

A: Hız sensörünün üzerine bağlandığı yükseklik ayarlı sütun.

B: Alüminyum yapısal çerçeve. Üzerinde cihaz aksesuarlarının kolaylıkla bağlanması için gerekli olan T kızaklar bulunmaktadır.

C: Çok hassas yükseklik ayarının yapılmasını sağlayan optik sensör bölümü.

D: Ağırlık düşürme kafa düzeneği. Ağırlık ayarının yapıldığı, aynı zamanda darbe uçlarının da bağlandığı yapısal elemandır.



Resim 3.16. Dynatup 9250 test düzeneğinin yapısal bölüm ve elemanları

E: Düşen ağırlığın yükseklik ayarını hassas bir şekilde kontrol eden dijital pozisyon kontrolüne sahip servomotor sistemi.

F: Polikarbon esaslı panel kapı.

G: Acil sistem kapama butonu.

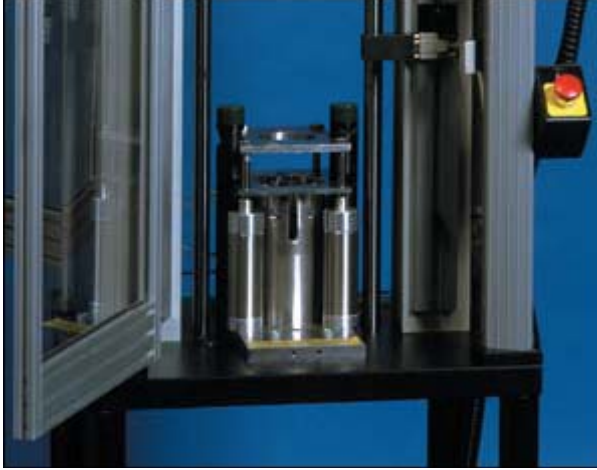
H: Açılabilir arka servis kapısı.

I: Hassas kuvvet ölçer. Test kafası, kullanılan test kütleleri, darbe ucu ağırlıklarının toplamını hassas bir şekilde ölçmektedir.

J: Çevresel test kabiniyle birlikte kullanılan destek platformu.

Test edilecek numune Resim 3.17'de görülen pnömatik tutucu destek fikstüre bağlanır. Fikstür sistemi otomatik ve hızlı bir şekilde numuneyi, orta kısmında dairesel test boşluğu kalacak şekilde çevresinden baskılayarak sıkıştırır. Söz

konusu pnömatik fikstür ASTM D-3763 ve ISO 6603-2 standartlarına uygun imal edilmiştir.

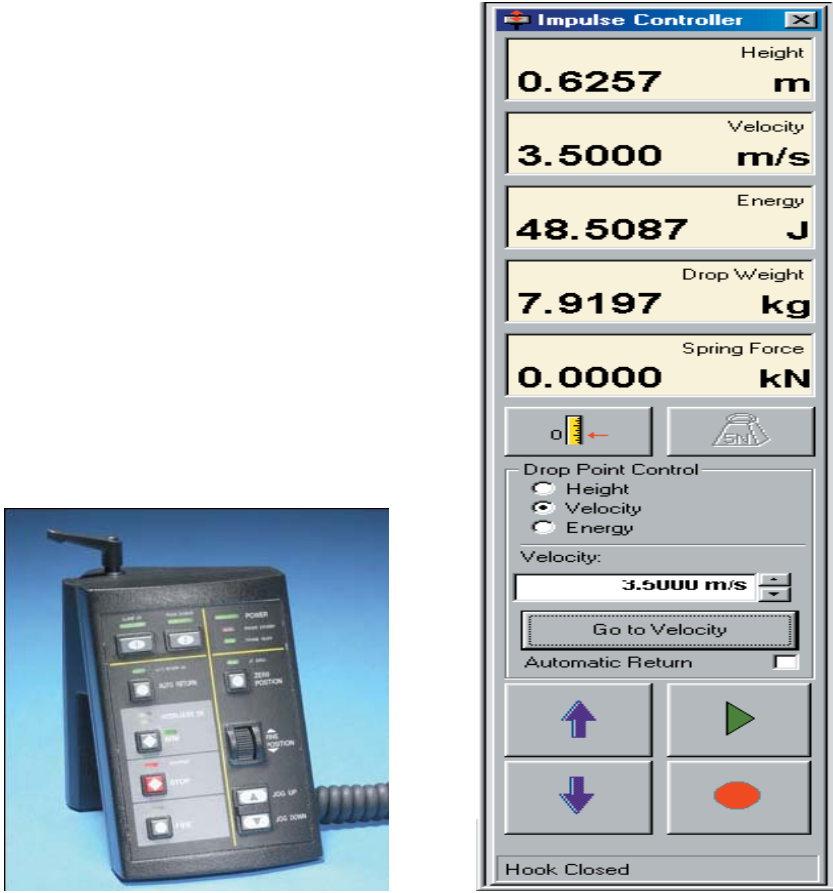


Resim 3.17. Dynatup 9250 test düzeneğine ait pnömatik destek fikstürü

Ağırlık düşürme test düzeneğinin sahip olduğu darbe sinyali işleme ünitesi sistem içerisindeki yük hücresi (load cell), hız ölçer ve diğer sensörlere ait verileri yüksek bir performansla değerlendirmektedir. Sistem yazılımı bilgisayarla kontrol edilebildiği gibi Resim 3.18’de görülen kontrol paneliyle de çok pratik bir şekilde tüm test işlemleri yürütülebilmektedir. Resim 3.18’de aynı zamanda ağırlık düşürme testinde kullanılan yükseklik, darbe hızı, darbe enerjisi, düşen ağırlık, yüksek enerjilerde ihtiyaç duyulması durumunda sıkıştırılan yayın yay kuvveti gibi temel parametreler de görülmektedir.

Ağırlık düşürme testlerinde Resim 3.19’da görülen çeşitli darbe uçları kullanılabilir. Bu tez kapsamında yapılan çalışmada yarı küresel uçlu 10 mm çapındaki darbe ucu kullanılmıştır. Diğer uçların mevcut olmaması sebebiyle darbe ucunun hasar yapısına olan etkisi incelenememiştir.

Dynatup 9250 ağırlık düşürme test cihazı ile 2,6 J - 1603 J arasında darbe enerjisiyle, maksimum 20 m/s hıza varan ağırlık düşürme testlerini gerçekleştirmek mümkündür.



Resim 3.18. Dynatup 9250 yazılım kontrol paneli ve test kontrol parametreleri

Dynatup 9250 test cihazı ile ASTM standartlarına uygun olarak hangi testlerin yapılabildiği Çizelge 3.16'da görülmektedir.



Resim 3.19. Dynatup 9250 ile kullanılan değişik darbe uçları

Çizelge 3.16. Dynatup 9250 ile ASTM standartlarında yapılabilen testler

	Mini-Tower™	Model 8200	9200 Series	8100 Series	POE2000e
AITM 1.0010 - Compression/Impact		X	X		
ASTM D 256 - Izod (Plastics)		X	X		X
ASTM D 950 - Adhesive Bonds					X
ASTM D 1709 - Plastic Film Penetration		X	X		
ASTM D 1822 - Tensile Impact			X		X
ASTM D 2444 - Thermoplastic Pipe			X		
ASTM D 3029/ASTM D 5420 - Gardner			X		
ASTM D 3763 - Puncture (Plastics)	X(film)	X	X		
ASTM D 4508 - Chip Impact Strength					X
ASTM D 4812 - Unnotched Cantilever					X
ASTM D 6110 - Charpy (Plastics)		X	X		X
ASTM E 23 - Charpy/Izod (Metals)			X		
ASTM E 208 - Nil Ductility				X	
ASTM E 436 - Drop Weight Tear				X	
ASTM E 604 - Dynamic Tear				X	
BOEING® 7260 - Compression/Impact			X		
DIN 53 373 - Plastic Film Penetration			X		
ISO 179 - Charpy (Plastics)		X	X		X
ISO 180 - Izod (Plastics)		X	X		X
ISO R 148 - Charpy (Steel)			X	X	
ISO 6603-2 - Puncture (Plastics)	X(film)	X	X		
ISO 7765-2 - Plastics Film and Sheeting		X	X		
JIS K 7111 - Charpy (Plastics)		X	X		X
NASA ST-1 - Compression/Impact		X	X		

Bu tez kapsamında yürütülen çalışmada ASTM D 3763 – 08, “Standart test method for high speed puncture properties of plastics using load and displacement sensors” standardına uygun olarak numunelerin bağlanmasını ve test süresince belli bir basınçla kenarlarından sıkı bir şekilde tutulmasını sağlayan Resim 3.17’de görülen pnömatik destek fikstürü kullanılmıştır. Standartta belirtildiği gibi fikstürün kavrama (tutucu) düzeneğinde birbirine paralel, tam ortasında $76,0 \pm 3,0$ mm çapında boşluk bulunan iki adet rijit plaka bulunmaktadır.

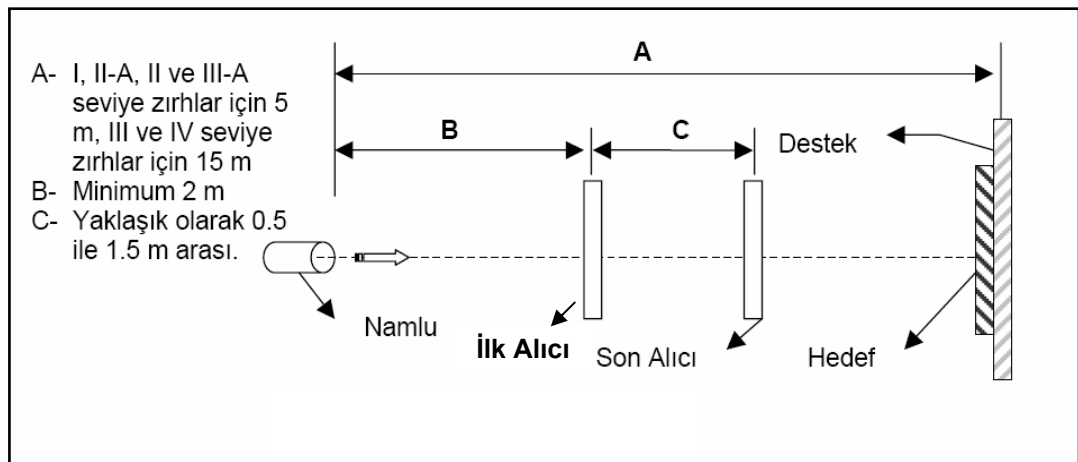
ASTM D 3763, numune boyunun tutucu plaka delik çapı olan 76 mm’ den en az 13 mm daha uzun olmasını ön görmektedir. Ağırlık düşürme testlerinde kompozit malzemeler ile bor karbür ve silisyum karbür seramik malzemeler

100 x 100 mm ebatlarında kullanılmıştır. Alumina seramiklerin üretiminde preslemede kullanılan kalıplar 100 x 50 mm ölçüsünde olduğundan alumina malzeme bu boyutta test edilmiştir. 23 ± 2 °C ve 50 % bağıl nem ortamında şartlandırılan numuneler, 23 ± 2 °C ve 50 ± 5 % bağıl neme sahip laboratuvar ortamında test edilmiştir.

3.4. Balistik Test Düzeneği

Bu tez kapsamında gerçekleştirilen balistik testler 8'inci Ana Bakım Merkezi Komutanlığında ve FNSS Savunma Sistemleri A.Ş.'de gerçekleştirilmiştir. Balistik test düzeneği Şekil 3.3'de şematik olarak görülmektedir. Test düzeneğinde, merminin iki sensörlü perdeden geçiş zamanı tespit edildikten sonra perdeler arası mesafe dikkate alınarak ortalama hız bulunmaktadır. FNSS'in balistik laboratuvarında her perdede ikişer adet sensör yerleştirilmiş olup merminin iki perde arasından geçiş zamanını μ s cinsinden tespit etmektedir. Hız hesabında ortalama değer dikkate alınmaktadır.

Amerikan standartları arasında yer alan NIJ (National Institute of Justice)' de belirtilmiş olan koruma seviyeleri için uygun olan namlu, algılayıcı perdeler ve hedef hattı arası mesafeler Şekil 3.3'de verilmiştir.



Şekil 3.3. Balistik test düzeneği

FNSS'deki balistik test düzeneğinde namlu ile hız algılayıcı ilk perde arası mesafe 17 ft (5,18 m), hız sensörlerinin yerleştirildiği alıcı perdeler arası mesafe 15 ft (4,57 m), ikinci perde hedef arası mesafe ise 10 ft (3,05 m) olacak şekilde atışlar gerçekleştirilmiştir. Namlu ile hedef arası toplam mesafe (atış hattı mesafesi) 12,80 metredir. Balistik test düzeneğinde hedef malzemesinin cinsine uygun olarak konu ile ilgili askeri standartlar kullanılarak atışlar yapılmış ve kompozit zırh sistemlerine ait balistik limit hızlar hesaplanmıştır. Test düzeneği bu standartlarda belirtilen tüm kriterleri sağlamaktadır.

3.4.1. Hız ölçüm ve namlu düzeneği

Resim 3.20'de FNSS Balistik laboratuvarında mermi hızını ölçmek için kullanılan iki adet Oehler marka balistik kronografin yerleştirildiği perde sistemleri ve arka tarafta yer alan hedef bölgesi görülmektedir.



Resim 3.20. Mermi hızını ölçmek için kullanılan perde sistemi

Balistik standartlarda (NIJ, STANAG 4569, MIL-PRF-46103E) yer alan koruma seviyelerinin öngördüğü çaplardaki mermilerle, mermi hızı kullanılan barut hakkıyla ayarlamak suretiyle gerçekleştirilen atışlarda zırhın balistik performansını test etmek mümkün olmaktadır. Özellikle MIL-STD-662 “V₅₀

ballistic limit for armour” standardına uygun olarak zırh sisteminin balistik limitinin hesaplanmasında barut hakkı ayarının standartta belirtilen hız aralıklarını yakalayabilecek şekilde yapılması ve barutun özelliklerinin dikkate alınmasını gerektirmektedir. Barutun imalatına ve katile numarasına bağlı olarak atış hızlarında aynı barut hakkıyla atış yapılmasına rağmen farklılıklar meydana gelebilmektedir.

FNSS’de balistik testlerde kullanılan 5,56 mm’den 20 mm’ye kadar değişik çaplardaki namlular ve atışların yapıldığı namlu düzeneği Resim 3.21’de görülmektedir.



(a)



(b)

a) Namlu Düzenekleri

b) Değişik Kalibreli Namlular

- 5,56 mm
- 7,62 mm
- 12,7 mm
- 14,5 mm
- 20 mm

Resim 3.21. Balistik testlerde kullanılan sabit namlu düzeneği ve namlular
(a) Balistik testlerde kullanılan sabit namlu düzeneği, (b) Balistik testlerde kullanılan çeşitli çaptaki namlular

3.4.2. Hedef tespit düzeneği

Test numunesinin bağlandığı hedef tespit düzeneği Resim 3.22'de görölmektedir. Hedef tespit düzeneğinin ön tarafına test edilecek numune bağlanmaktadır. MIL-STD-662 "V₅₀ ballistic limit for armour" standardına uygun olarak test numunesinin 6 inch (152,4 mm) arkasına ise 0,02 inch (0,5 mm) kalınlığında Alüminyum 2024 T3 levha, şahit plaka olarak bağlanmaktadır. şahit plaka V₅₀ testlerinde merminin hedefe kısmi veya tam nüfuziyetinin değerlendirilmesi için kullanılmaktadır. Merminin hedef üzerinde kalması, tam penetrasyon meydana gelmemesi, ancak hedeften kopmuş bir parçanın şahit plakayı delmesi durumunda dahi gerçekteştirilen atış tam nüfuziyetli (tam penetrasyon veya perforasyon) bir atış olarak değerlendirilmektedir.



Resim 3.22. Hedef tespit düzeneği (test numunesi ve şahit plaka bağlantısı)

3.4.3. Balistik testlerde kullanılan mermiler

Balistik darbe özellikleri incelenecek olan kompozit malzeme ve seramik ön yüzlü kompozit zırh sisteminin balistik testlerinde NATO'nun esas aldığı bir Amerikan Standardı olan NIJ Standardı, III. seviyeye göre NATO 7,62 mm FMJ mermi (bakır ceket kaplı kurşun çekirdek mermi) ve IV. seviyeye göre 7,62 mm M2 AP (armour piercing: zırh delici) mermi ile testler yapılmıştır.

Balistik korumaya yönelik olarak NATO standartları arasında yer alan STANAG 4569 lojistik ve zırhlı araçlar için geliştirilmiş balistik koruma seviyelerini belirlemiştir. Tez kapsamında yürütülen balistik testlerde; kompozit malzeme için STANAG 4569 Seviye I, seramik ön yüzü kompozit zırh sistemi için Seviye III esas alınmıştır. STANAG 4569 Seviye I, 7,62 mm NATO FMJ (bakır kaplı kurşun) mermi; Seviye III, 7,62 mm 51 AP mermi; Seviye IV ise 14,5 mm API mermi tehditlerine göre tanımlanmıştır.

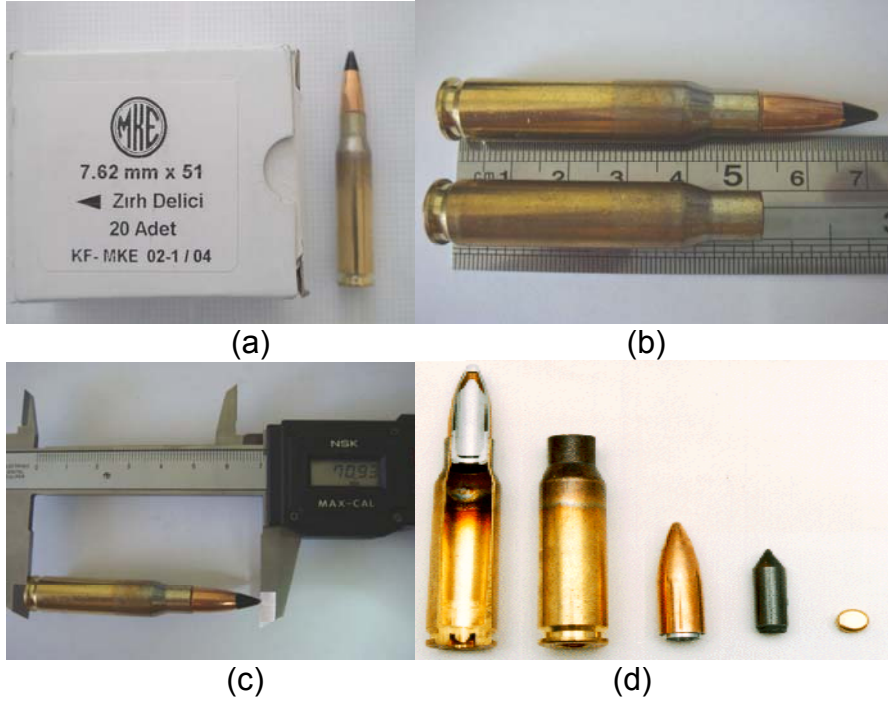
Balistik testlerde MKE Gazi Fişek Fabrikasında üretilmiş KF-MKE-26/93 katile numaralı normal 7,62 mmX51 mermiler (NATO 7,62 mm FMJ) ile KF-MKE 02-1/04 katile numarasına MIL-C-60617 A standartlarına uygun olarak imal edilmiş 7,62 mmX51 M61 zırh delici mermiler kullanılmıştır.

Makina Kimya Endüstrisi Kurumu yapımı 7,62 mm x 51 mm zırh delicilere ilave olarak A.B.D. yapımı 7,62 x 63 mm zırh delici mermi de kullanılmıştır. Balistik testlerde kullanılan mermi özellikleri Çizelge 3.17’de verilmiştir.

Çizelge 3.17. Balistik testlerde kullanılan mermi özellikleri

MERMİ	7,62 X 51 mm AP M1 (MKEK) Zırh Delici Çelik Çekirdek	7,62 X 51 mm NATO Ball FMJ (MKEK) Kurşun Çekirdek	7,62 X 63 mm AP M2 (A.B.D.) Zırh Delici Çelik Çekirdek
Atış Mesafesi (m)	12,80	12,80	12,80
Çekirdek Çapı (mm)	7,62	7,62	7,62
Çekirdek Ağırlığı (g)	10,60	9,44	10,60
Kovan Ağırlığı (g)	11,85	11,85	12,51
Kovan Uzunluğu (mm)	51	51	63
Barut Miktarı (g)	2,79	2,79	3,25
Namlu Ağız Hızı (m/s)	835	835	901

MKEK yapımı 7,62 x 51 mm zırh delici mermi, boş kovani, çekirdek, kapsül ve mermi kesitine ilişkin fotoğraflar Resim 3.23'de verilmiştir.



Resim 3.23. MKEK yapımı 7,62 x 51 mm zırh delici mermi resimleri
(a) 7,62 x 51 mm AP mermi katile numarası, (b) Mermi ve boş kovani, (c) Mermi uzunluğu, (d) Zırh delici mermi kesiti

Balistik testlerde kullanılan A.B.D. yapımı 7,62 x 63 mm AP M2 zırh delici çelik çekirdek fotoğrafları Resim 3.24'de, MKEK yapımı NATO FMJ 7,62 mm kurşun çekirdekli mermi fotoğrafları Resim 3.25'de verilmiştir.



Resim 3.24. A.B.D. yapımı 7,62 x 63 mm AP M2 zırh delici mermi çekirdeğinin ağırlık ve uzunluk ölçümü



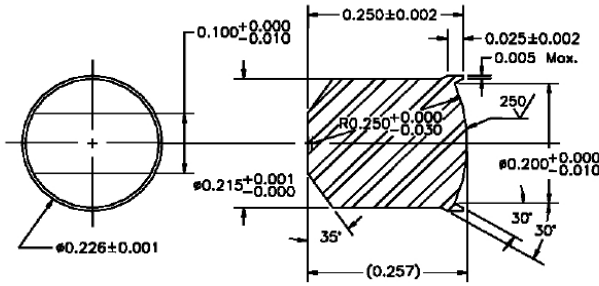
Resim 3.25. MKEK yapımı 7,62 x 51 mm NATO FMJ mermi çekirdeğinin ağırlık ve uzunluk ölçümü

Balistik testlerde kullanılan mermi çekirdeklerinin kimyasal bileşimi ve sertlik taraması sonucu elde edilen ortalama sertlik değerleri Çizelge 3.18’de görülmektedir.

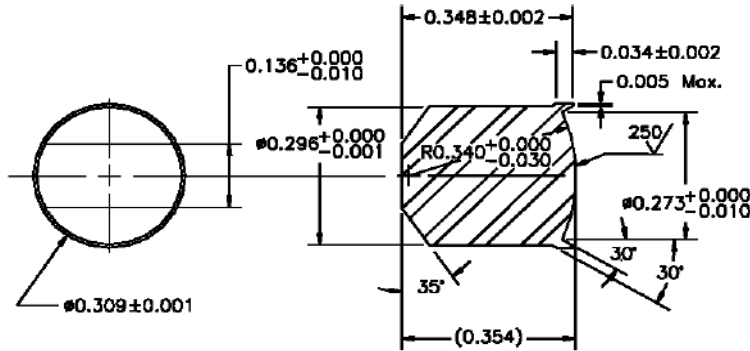
Çizelge 3.18. Mermi çekirdek sertlikleri ve kimyasal analizi

KİMYASAL ANALİZ (BİLEŞİM %) ve SERTLİK			
	7,62 mm AP M1 MKEK	7,62 mm AP M2 A.B.D.	14,5 mm API B32 RUS
Sertlik (HRC)	53	64	67
C	0,93	0,79	1,18
Si	0,44	0,3	0,26
S	0,025	0,023	0,008
P	0,017	0,036	0,013
Mn	0,76	0,97	0,23
Ni	0,007	0,026	0,19
Cr	0,019	0,058	0,13
Mo	0,005	0,015	0,019
V	0,005	0,003	0,005
Cu	0,023	0,053	0,13
W	0,023	0,01	0,016
Ti	0,003	0,003	0,002
Co	0,006	0,008	0,014
Al	0,005	0,064	0,005
Nb	0,011	0,006	0,003

Balistik testlerde kullanılan 0,22 kalibre (5,56 mm) ve 0,30 kalibre (7,62 mm) parçacık benzetimli (parça tesirli) mermilerin boyutsal ölçüleri Şekil 3.4 ve Şekil 3.5'de verilmiştir. 5,56 mm parçacık tesirli mermi kütlesi 1,102 g, sertliği 30 HRC'dir. 7,62 mm parçacık tesirli mermi kütlesi 2,851 g, sertliği 30 HRC'dir.



Şekil 3.4. Kalibre 0,22 parçacık benzetimli mermi



Şekil 3.5. Kalibre 0,30 parçacık benzetimli mermi

3.4.4. Balistik testlerde esas alınan standartlar

Kompozit malzemenin balistik testlerinde 7,62 mm NATO FMJ mermi, parça tesirli mermi ve zırh delici mermi kullanılmıştır. E-Cam ve aramid kompozit malzeme ile seramik ön yüzlü kompozit zırh sisteminin balistik testlerinde gerek test düzeneğinin kullanılmasında, gerek hedef hattı ve malzemesinin hazırlanmasında gerekse atışların icrasında ve değerlendirilmesinde; MIL-

PRF-46103E “Hafif Kompozit Zırhların Performans ve Şartnamesi”, STANAG 4569 “Lojistik ve Hafif Zırhlı Araçlardaki Personel İçin Koruma Seviyeleri”, MIL-STD-662 “Zırhlar İçin V_{50} Balistik Testi” standartları esas alınmıştır.

Balistik özellikleri incelenen seramik kompozit zırh sisteminde STANAG 4569 Seviye 3 (Çizelge 3.19)’de belirtilen kalibrede (7,62 mm) zırh delici mermi kullanılmıştır. Kullanılan mermiler MKEK 7,62 mm x 51 AP M1 ile Amerikan 7,62 mm x 63 AP M2 mermileridir. E-Cam ve aramid esaslı kompozit malzemelerin balistik testlerinde STANAG 4569 Seviye 1’de belirtilen 7,62 mm x 51 NATO Ball mermilerle V_{50} balistik limit hızı ve aynı zamanda MIL-DTL-46593B standartlarındaki 5,56 mm ve 7,62 mm parçacık benzetimli mermilerle V_{50} balistik limit hızları bulunmuştur.

Çizelge 3.19. STANAG 4569’da yer alan balistik koruma seviyeleri

Seviye	Kinetik Enerjili Tehdit	Topçu Mühimmatı Tehdidi
5	Otomatik Canon: APDS mühimmatı Mesafe: 500 m Açı: aracın merkez eksenine cephede yönündeki $\pm 30^\circ$ yan eğim açısı; yükselme açısı 0°	Topçu mühimmatı: 155 mm Patlama mesafesi: 25 m Açı: tüm etraf; yükselme 0° - 90°
	Mühimmat: 25 mm x 137 APDS-T, PMB 073 V_{500} : 1258 m/s; V_0 : 1335 m/s**	
4	Ağır Makineli Tüfek: AP mühimmatı Mesafe: 200 m Açı: yaklaşma 360° ; yükselme 0°	Topçu mühimmatı: 155 mm Patlama mesafesi: 25 m Açı: tüm etraf; yükselme 0° - 90°
	Mühimmat: 14,5 mm x 114 API/B32; $V=911$ m/s**	
3	Tüfek: AP tungsten karbür çekirdek Mesafe: 30 m Açı: yaklaşma 360° ; yükselme 0° - 30°	Topçu mühimmatı: 155 mm Patlama mesafesi: 60 m Açı: yaklaşma 360° , yükselme 0° - 30°
	Mühimmat: 7,62 mm x 51 AP (WC); $V=930$ m/s** 7,62 mm x 54R B32 API; $V=854$ m/s**	
2	Tüfek: Zırh delici çelik çekirdek Mesafe: 30 m Açı: yaklaşma 360° ; yükselme 0° - 30°	Topçu mühimmatı: 155 mm Patlama mesafesi: 80 m Açı: yaklaşma 360° , yükselme 0° - 22°
	Mühimmat: 7,62 mm x 39 API BZ; $V=695$ m/s**	
1	Tüfek: Pirinç kaplamalı kurşun çekirdek Mesafe: 30 m Açı: yaklaşma 360° ; yükselme 0° - 30°	Topçu mühimmatı: 155 mm Patlama mesafesi: 100 m Açı: yaklaşma 360° , yükselme 0° - 18°
	Mühimmat: 7,62 mm x 51 NATO ball; $V=833$ m/s 5,56 mm x 45 NATO ss 109; $V=900$ m/s 5,56 mm x 45 NATO M 193; $V=937$ m/s**	

** Çarpma hızındaki tolerans ± 20 m/s dir.

MIL-PRF-46103E standardında tanımlanan balistik koruma seviyelerine göre kompozit malzeme için 7,62 mm çapında mermi tehdidi Tip II altında; Sınıf 1 kurşun çekirdekli FMJ mermi, Sınıf 2 zırh delici AP mermi, Sınıf 3 ise hızı 1219 m/s'den daha yüksek olan zırh delici sabot mermi olmak üzere üç bölüme ayrılmıştır. Bu tez kapsamında kompozit malzeme üzerine gerçekleştirilen atışlarda Tip II Sınıf 1 ve Sınıf 2'de belirtilen tehditler baz alınmıştır.

Bir zırh sisteminin balistik koruma seviyesi belirlenirken sonuç olarak ortaya konan en önemli parametrelerden birisi balistik limit hızıdır. MIL-STD-662F "V₅₀ ballistic limit for armour" standardı balistik limitin hangi esaslar dahilinde nasıl bulunacağını ortaya koymaktadır. Balistik terimlerin de tanımlandığı bu standardın özeti aşağıda yapılmıştır:

MIL-STD-662F: Zırhlar için V₅₀ balistik test:

Bu standardın amacı balistik testlerle ilgili usuller, ekipmanlar, fiziksel şartlar ile metalik, metal olmayan ve kompozit zırhların balistik dayanımlarının belirlenmesinde kullanılan tanımlamaları açıklamaktır. Bu standartta yer alan ve diğer standartlarda da geçen bazı tanımlar aşağıda sıralanarak açıklamaları verilmiştir:

Hedef balistiği: Merminin hedef üzerindeki etkileriyle ilgilenen balistiğin alt dalıdır. Bu etkiler, delip geçme (perforasyon), nüfuziyet (penetrasyon), parçalanma, patlama, çukur imla etkisi, basınç dalgası ve yangın çıkartma şeklinde olabilir.

Hedef hattı mesafesi: Mermi hızının belirlenmesinde kullanılan ekran perdeleri arasındaki orta noktanın hedefe olan uzaklığıdır. Ekran perdeleri arasındaki mesafe en az 100 cm, son perdenin hedefe olan uzaklığı ise en az 122 cm olmalıdır.

Ekran perdeleri: Merminin hızının hesaplanmasında kullanılan kronografin başlangıç ve bitiş tetiklemesini yapan fotoelektrik cihazlardır. Mermi hızının iki kez ölçülmesi amacıyla iki çift perde kullanılabilir. İki sistemden ölçülen hızlar arasındaki fark en fazla 3 m/s olmalıdır.

Kronograf: Merminin iki sabit nokta arasındaki mesafeyi kat etme süresinin belirlenmesinde kullanılan elektronik cihaz olup ölçüm hassasiyeti mikro saniyedir.

Yapısal zırh: Yapının balistik korumasını sağlamak için kullanılan zırh malzemesi. Zırhlı araçların ana yapısında (gövde ve kule) kullanılan zırh malzemesi yapısal zırhdır.

V_{50} balistik limit: Merminin zırh malzemesine nüfuz etme olasılığının %50 olduğu mermi hızı değeridir. Nüfuz etme ifadesinden hedefe tam nüfuziyet anlaşılır.

Balistik limit koruma kriteri (V_{50} BL(P)): En yüksek tesirli darbe hızı ile en düşük kısmi darbe hızı arasındaki fark belli bir aralıkta kalacak şekilde; eşit sayıdaki en yüksek kısmi nüfuz hızı ile en düşük tam nüfuz hızlarının ortalamaları alınarak bulunur. En azından iki adet kısmi nüfuz iki adet tam nüfuz olmak üzere dört adet hızın kullanılması gerekir. Altılı ve onlu test adetleri yaygın olarak kullanılır. En yüksek tesirli darbe hızı ile en düşük kısmi darbe hızı arasındaki hız farkı olarak 18, 27, 30 ve 38 m/s'lik dağılım göz önünde bulundurulur. Zırh malzemesinin minimum V_{50} BL(P) hızının tahmin edilebilmesi durumunda, çarpma hızı bu değerinin 23 m/s – 30 m/s üzerinde olacak şekilde ilk atış gerçekleştirilir. İlk atışta tam nüfuziyet oluşursa kısmi nüfuziyet meydana gelmesi için çarpma hızı 15 m/s – 30 m/s azaltılır, kısmi nüfuziyet meydana gelirse tam nüfuziyet elde etmek için çarpma hızı 15 m/s arttırılır. Bir kısmi bir tam nüfuziyet meydana gelene kadar çarpma hızını an az 15 m/s arttırıp azaltmaya devam edilir.

Şahit plaka: Testlerde şahit plaka olarak, hedefin arkasına ve hedefe paralel doğrultuda 150 ± 10 mm mesafede 0,51 mm kalınlığında 2024-T3, 2024-T4 veya 5052 alüminyum alaşımlı folyo yerleştirilir.

Uygun vuruş (seramik kompozit zırhlar için): Atışın, hasar görmemiş seramik karosunun 25,4 mm yarıçapına sahip bir daire içinde ve aynı zamanda zırh plakasının kenarlarından 76,2 mm içeride yer almasıdır. İki adet karonun birleşme noktasına en az 3,8 mm mesafede atış yapılmalıdır. Üç veya daha fazla karonun birleşme yerlerine olan mesafe ise 12,7 mm den daha yakın olmamalıdır.

Parçacık benzetimli mermi: Parçacık şeklindeki mühimmatların hedefe çarptığı andaki etkilerini görmek için malzeme, şekil ve boyutlar göz önünde bulundurularak tasarlanan mermidir.

Tam nüfuziyet: Merminin hedefe çarpma sonrasında, merminin, mermiye ait bir parçacığın veya hedef malzemesine ait bir parçacığın şahit plakayı delmesi durumuna karşılık gelir. Delme durumu olarak, 110 Volt ve 60 Watt bir ampulün yaydığı ışığın geçtiği çatlak ve delikler kastedilir.

Kısmi nüfuziyet: Tam nüfuziyet şartlarının meydana gelmediği her türlü tesirli darbe kısmi nüfuziyet olarak tanımlanır. Kısmi nüfuziyette hedef arkasında çıkıntı oluşurken şahit plakayı delebilecek bir parçacık oluşumu söz konusu değildir.

Plug oluşumu: Adyabatik kayma şeklinde meydana gelen hasar sonucunda, merminin yaklaşık kendi çapına yakın bir hedef parçasını (plug) hedeften kopararak ayırmasıdır.

Parçalanma hasarı: Zırh ön veya arka yüzeyinden kopan parçacıkların saçılmasıdır. Tam nüfuziyet oluşmadığı durumda da parçacıkların dağılımı tehlike meydana getirebilir.

3.5. Zırh Sistemi Hasar Geometrisinin Tespiti

Ağırlık düşürme ve balistik testler sonrasında seramik ve kompozit malzemenin kırılma yapısını incelemek üzere Resim 3.26'da görülen SEM JEOL JXA-840A taramalı elektron mikroskobu kullanılmıştır. Taramalı elektron mikroskobu ile toz numunelerin ve kütle malzemelerin metalografik tekniklerle parlatılmış yüzey ve kesitlerinin, veya kırık yüzeylerinin nanometre boyutuna kadar mikroyapısal karakterizasyonu yapılabileceği gibi, malzeme yapısında bulunan her türlü hatanın mikro analizi de yapılabilmektedir. 10 – 500 000 görüntü büyütme özelliğine sahiptir.



Resim 3.26. SEM JEOL JXA-840A taramalı elektron mikroskobu

Malzemelerin makro olarak incelenmesi ve mikro inceleme için ön bilgi edinilmesini sağlayan Resim 3.27'de görülen Stereo mikroskop ile darbeye maruz kalan kompozit malzemenin kesitinde oluşan hasar yapısı görüntülenmiştir. Böylece malzeme kesiti boyunca darbe ön yüzünden arka yüze doğru gelişen mikro hasar yapısı ve boyutu hakkında bilgi toplanmıştır. Bu mikroskop ile 5X ile 125X arası büyütülmüş görüntü alabilir, 3X ile 200X

arası büyütülmüş fotoğraf (fotoğraf kartının boyutuyla orantılı olarak) elde edilebilmektedir. Mikroskopta harici iki adet ışık kaynağı, dahili bir fotoğrafa alma ünitesi ve bu ünitenin kontrolünü sağlayan harici bir kontrol paneli bulunmaktadır. Işık kaynaklarından biri florasan ışık diğeri halojen ışık sağlamaktadır. İnceleme sırasında numuneden fotoğraf çekilmek istendiğinde mikroskobun üzerinde monte edilmiş kamera sistemi kullanılmaktadır. Spot 3.0 yazılım programı yardımı ile makro resimler bilgisayar ortamına aktarılmaktadır.



Resim 3.27. Stereo mikroskop (ZEISS Stemi SV-6)

Kompozit malzeme içerisinde darbe ile oluşan hasar yapısını ortaya koymak amacıyla Resim 3.28'de görülen Ultrasonik C tarama cihazı ile daldırma tekniği ile malzemelerin ultrasonik muayenesini yapılmıştır. Ultrasonik hata detektörü, yüksek frekanslı ses dalgalarının (1 kHz - 20 MHz) test malzemesi içine gönderilerek malzemedeki süreksizliklerin tespiti amacıyla kullanılmaktadır. Ancak laboratuarda mevcut olan 1980 yılı imali Ultrasonik C tarama cihazı problemlerinin çalışma frekansı dahilinde hasar görmüş kompozit malzeme üzerinde yapılan taramalarda çıplak gözle görülen hasar yapısına ilave olarak çok da anlamlı ve detaylı bir görüntü elde edilememiştir.

TÜBİTAK MAM'da Malzeme Enstitüsü Hasarsız Muayene Laboratuvarında bulunan ve Resim 3.29'da görülen mikrodalga tomografi cihazı ile kompozit malzemenin kesit ve hacim taraması yapılmak suretiyle malzeme içerisindeki hasar yapısı tespit edilmeye çalışılmıştır. Malzeme üzerinde yapılan tarama malzeme kesiti ve uzunluğu boyunca katlar halinde renk kodlarıyla görüntüye dönüştürülebilmektedir.



Resim 3.28. Ultrasonik daldırma tekniği - PAC ULTRAPAC-II



Resim 3.29. Mikrodalga tomografi cihazı

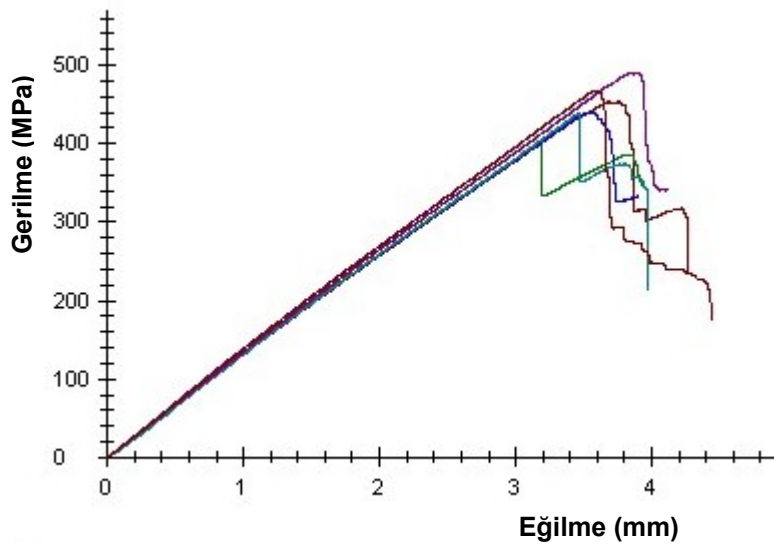
4. SONUÇ VE ÖNERİLER

4.1. Seramik Kompozit Zırh Sistemi Bileşenlerinin Mekanik Testleri

Seramik kompozit zırh sistemini oluşturan seramik, kompozit ve homojen haddelenmiş yüksek mukavemetli çeliğe ait üç noktadan eğme, çekme testleri ve sertlik ölçümü Materyal ve Yöntem Bölümünde detayları belirtilen ASTM ve ISO standartlarına göre yapılmış; test ve ölçüm sonuçları müteakip maddelerde verilmiştir.

4.1.1. Üç noktadan eğme testi sonuçları

Kompozit malzemelerin üç noktadan eğme testleri TS 985 EN ISO 178 (Mart 2006), “Plastikler – Eğilme Özelliklerinin Tayini” standardına uygun olarak yapılmıştır. E-Cam düz dokuma kompozitin üç noktadan eğme testinde bulunan gerilme & şekil değiştirme (eğilme) grafiği Şekil 4.1’de, elastisite modülü (MPa), eğme dayanımı (MPa), uygulanan maksimum kuvvet (N) değeri ve maksimum kuvvete karşılık gelen eğilme (mm) ile birim şekil değiştirme (%) değerleri Çizelge 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4.1. E-Cam düz dokuma kompozitin üç noktadan eğme testine ait gerilme & eğilme grafiği

Çizelge 4.1. E-Cam düz dokuma kompozitin üç noktadan eğme test sonuçları

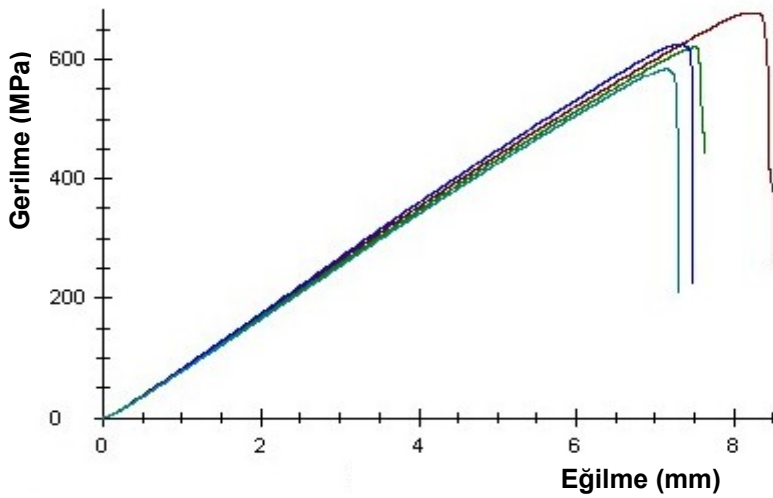
Nu	h (mm)	b (mm)	A (mm ²)	L (mm)	E (GPa)	σ_{max} (MPa)	ϵ_{Fmax} (mm)	ϵ_{Fmax} (%)	F_{max} (N)
1	4,05	10,06	40,74	64	22,09	453,26	3,68	2,19	779,08
2	4,06	10,10	41,01	64	22,89	402,37	3,19	1,90	697,80
3	4,12	10,12	41,69	64	22,80	440,13	3,55	2,14	787,57
4	3,90	10,12	39,47	64	22,96	439,18	3,47	1,98	704,18
5	4,0	10,12	40,48	64	23,08	490,45	3,90	2,29	827,22
6	4,03	10,10	40,70	64	23,50	466,86	3,58	2,11	797,71

Çizelge 4.1'deki veriler sonucunda E-Cam düz dokuma kompozitin elastisite modülü ve eğme dayanımının ortalama değerleri,

$$E_{Cam\ dokuma} = 23\ GPa$$

$\sigma_{max_Cam\ dokuma} = 449\ MPa$ olarak belirlenmiştir.

E-Cam tek yönlü kompozitin üç noktadan eğme testine ait gerilme & şekil değiştirme (eğilme) grafiği Şekil 4.2'de, elastisite modülü, eğme dayanımı ve uygulanan maksimum kuvvet değerleri Çizelge 4.2'de verilmiştir.



Şekil 4.2. E-Cam tek yönlü kompozitin üç noktadan eğme testine ait gerilme & eğilme grafiği

Çizelge 4.2. E-Cam tek yönlü kompozitin üç noktadan eğme test sonuçları

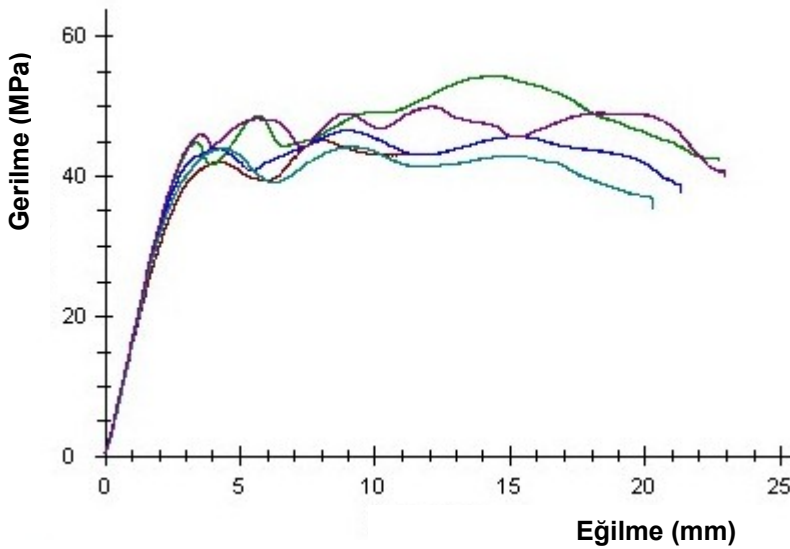
Nu	h (mm)	b (mm)	A (mm ²)	L (mm)	E (GPa)	σ_{max} (MPa)	ϵ_{Fmax} (mm)	ϵ_{Fmax} (%)	F_{max} (N)
1	2,12	25,40	53,85	64	28,77	677,73	8,27	2,57	805,92
2	2,13	25,35	54,00	64	27,74	621,56	7,52	2,35	744,65
3	2,12	25,52	54,10	64	29,51	624,96	7,31	2,27	746,68
4	2,13	25,55	54,42	64	27,76	584,20	7,16	2,23	705,41
5	2,13	25,49	54,29	32	26,95	624,19	1,95	2,44	1503,84
6	2,12	25,35	53,74	32	28,37	618,12	1,84	2,28	1467,17

Çizelge 4.2'deki sonuçlara göre E-Cam tek yönlü kompozit için elastisite modülü ve eğme dayanımı ortalama olarak,

$$E_{Cam \text{ tek yönlü}} = 29 \text{ GPa}$$

$\sigma_{max_Cam \text{ tek yönlü}} = 625 \text{ MPa}$ olarak belirlenmiştir.

Aramid düz dokuma kompozitin üç noktadan eğme testine ait gerilme & şekil değiştirme (eğilme) grafiği Şekil 4.3'de, elastisite modülü, eğme dayanımı ve uygulanan maksimum kuvvet değerleri Çizelge 4.3'de verilmiştir.



Şekil 4.3. Aramid dokuma kompozitin üç noktadan eğme testine ait gerilme & eğilme grafiği

Çizelge 4.3. Aramid düz dokuma kompozitin üç noktadan eğme test sonuçları

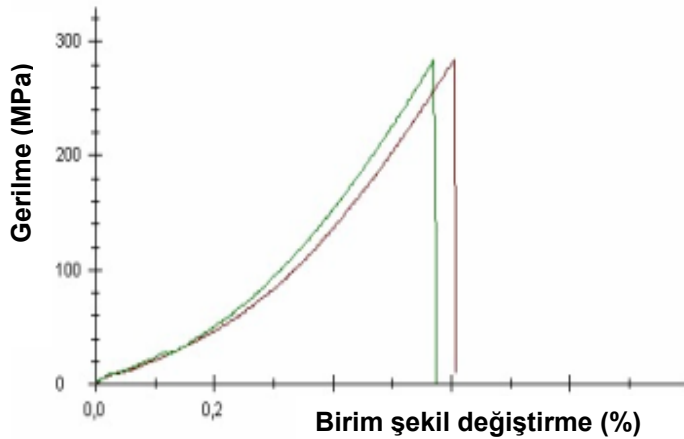
Nu	h (mm)	b (mm)	A (mm ²)	L (mm)	E (GPa)	σ_{max} (MPa)	ϵ_{Fmax} (mm)	ϵ_{Fmax} (%)	F_{max} (N)
1	4,13	9,80	40,31	64	2,694	45,20	8,06	4,87	78,39
2	4,05	9,80	39,69	64	2,817	54,42	14,35	8,51	91,13
3	4,05	9,82	39,77	64	2,726	46,55	9,00	5,34	78,10
4	4,02	9,80	39,40	64	2,904	44,23	9,08	5,35	72,97
5	4,01	9,81	39,34	64	2,946	49,97	12,04	7,07	82,12

Çizelge 4.3'deki sonuçlara göre Aramid düz dokuma kompozitin elastisite modülü ve eğme dayanımı ortalama olarak,

$$E_{Aramid\ dokuma} = 2,8\ GPa$$

$\sigma_{max_Aramid\ dokuma} = 48\ MPa$ olarak belirlenmiştir.

Seramik malzemenin üç noktadan eğme testleri EN 843-1 standardına göre yapılmıştır. Alumina seramiğin üç noktadan eğme testine ait gerilme & şekil değiştirme grafiği Şekil 4.4'de verilmiştir.



Şekil 4.4. Alumina seramiğin üç noktadan eğme testine ait gerilme & şekil değiştirme grafiği

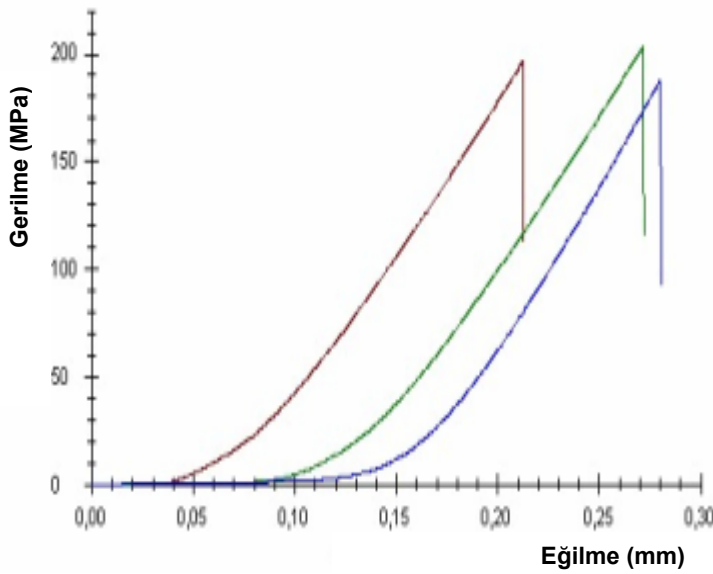
Alumina seramiğin üç noktadan eğme testi sonucunda bulunan elastisite

modülü ve eğme dayanımı ortalama olarak;

$$E_{Alumina} = 292 \text{ GPa}$$

$\sigma_{max_Alumina} = 284 \text{ MPa}$ olarak belirlenmiştir.

Silisyum karbür seramiğin üç noktadan eğme testleri sonucunda bulunan gerilme & şekil değiştirme (eğilme) grafikleri Şekil 4.5’de verilmiştir.



Şekil 4.5. Silisyum karbür seramiğin üç noktadan eğme testine ait gerilme & şekil değiştirme (eğilme) grafiği

Silisyum karbür seramiğin üç noktadan eğme testi sonucunda bulunan elastisite modülü ve eğme dayanımı ortalama olarak;

$$E_{SiC} = 395 \text{ GPa}$$

$\sigma_{max_SiC} = 196 \text{ MPa}$ olarak belirlenmiştir.

Bulunan sonuçlara göre silisyum karbürün elastisite modülünün aluminaya göre yüksek ancak eğme dayanımının ise düşük olduğu anlaşılmaktadır. Seramik malzemenin balistik performansı, darbe altında seramik malzemedeki kırılma gelişimi ağırlık düşürme ve balistik testlerle değerlendirilmiş, sonuçlar mukayese edilmiştir.

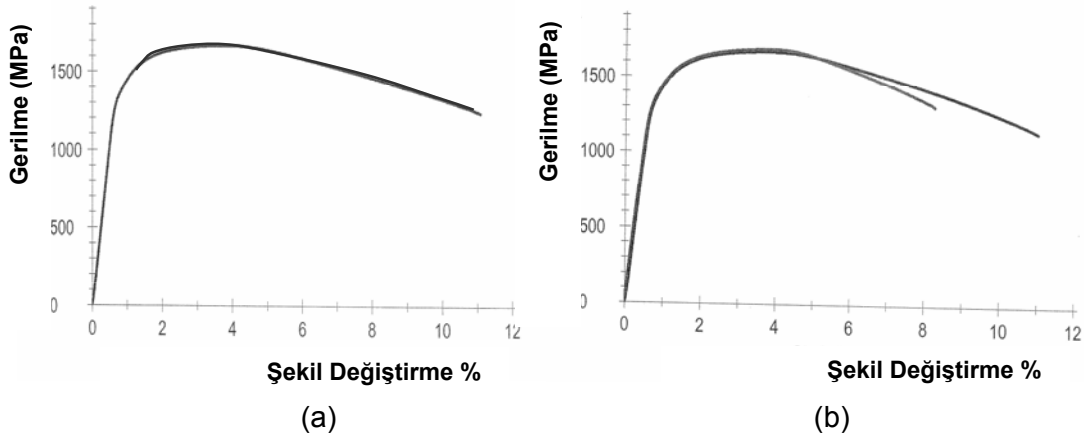
Bor karbür seramiğin üç noktadan eğme testine ilişkin elastisite modülü ve eğme dayanımı üretici firma bilgilerine göre;

$$E_{\text{Bor karbür}} = 454 \text{ GPa}$$

$$\sigma_{\text{max_Bor karbür}} = 174 \text{ MPa} \text{ olarak verilmiştir.}$$

4.1.2. Çekme testi sonuçları

TS 138 EN 10002-1 “Metalik Malzemeler – Çekme Deneyi –Bölüm 1: Ortam Sıcaklığında Deney Metodu” standardına göre homojen haddelenmiş yüksek mukavemetli çeliğe çekme testi uygulanmıştır. Çekme testlerine ait gerilme & şekil değiştirme grafikleri Şekil 4.6’da verilmiştir.



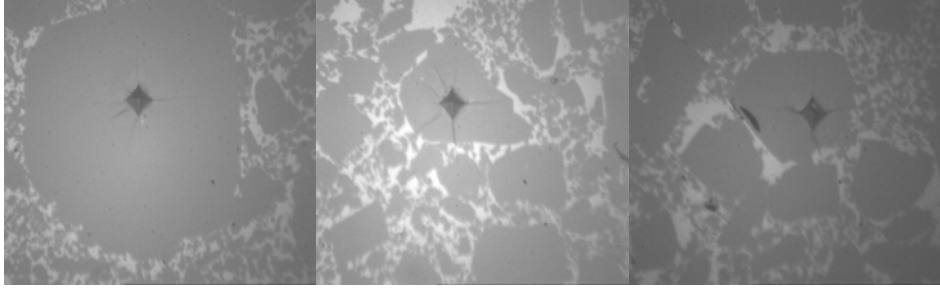
Şekil 4.6. Homojen haddelenmiş yüksek mukavemetli çeliğin gerilme & şekil değiştirme grafikleri, (a) Numune 1,2, (b) Numune 3,4

Çekme testi sonuçlarına göre; elastisite modülü, % 0,2 şekil değiştirmeye karşılık gelen gerilme, maksimum gerilme ve kopma gerilmesine ait ortalama değerler; $E_{HHYMÇ} = 212 \text{ GPa}$, $R_{P\ 0,2} = 1392 \text{ MPa}$, $R_m = 1677 \text{ MPa}$ ve $R_B = 1229 \text{ MPa}$ olarak bulunmuştur.

4.1.3. Sertlik tarama testi sonuçları

Alumina (Resim 4.1), bor karbür ve silisyum karbür seramiklerin sertlikleri Zwick marka ZHV10 model mikro sertlik cihazıyla “vickers” sertliği cinsinden

ölçülmüş olup sertlik tarama sonuçları Çizelge 4.4'de verilmiştir.

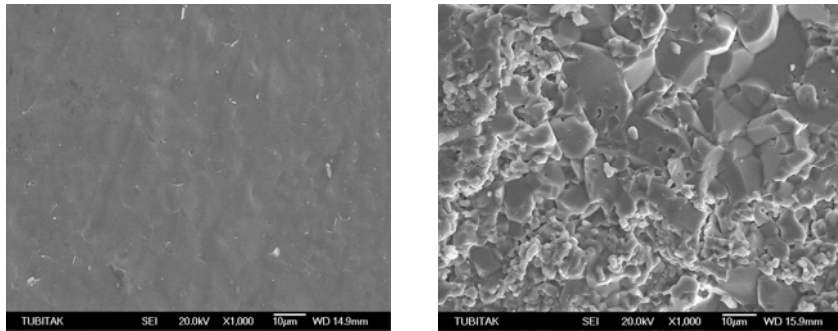


Resim 4.1. Sertlik ölçümü yapılan alumina parçaları

Çizelge 4.4. Seramik malzemelerin sertlik ölçüm sonuçları

Ölçüm	Sertlik (Vickers)		
	Al_2O_3	B_4C	SiC
1	1769	4630	3027
2	1956	4448	3136
3	2013	4298	2962
4	1911	3865	3364
5	1875	5023	3290
Ortalama	1905	4452	3156

Bor karbür ve alumina seramiğin mikro yapılarına ait elektron mikroskop taramalı görüntüleri 1000 büyütme olarak Resim 4.2'de görülmektedir.



(a)

(b)

Resim 4.2. Bor karbür ve alumina seramik mikro yapılarına ait 1000 büyütme SEM görüntüleri, (a) Bor karbür, (b) Alumina

E-Cam düz dokuma ve tek yönlü [0/90] kompozit malzemelerin Barcol test cihazı ile yapılan sertlik ölçüm değerleri ise Çizelge 4.5'de verilmiştir.

Çizelge 4.5. Kompozit malzemelerin sertlik ölçüm sonuçları

Ölçüm	Sertlik (Barcol)	
	E-Cam dokuma	E-Cam tek yönlü
1	60	63
2	61	60
3	63	65
4	60	57
5	54	61
6	61	62
7	60	60
8	62	63
9	62	66
10	67	64
Ortalama	61	62

Homojen haddelenmiş yüksek mukavemetli çeliğin sertlik değerleri, Çizelge 4.6'da, Brinell sertliği cinsinden verilmiştir.

Çizelge 4.6. Homojen haddelenmiş yüksek mukavemetli çeliğin sertlik ölçüm sonuçları

Ölçüm	Sertlik (HB)
1	514
2	522
3	513
4	528
5	503
Ortalama	516

4.2. Seramik Kompozit Zırh Bileşenlerinin Ağırlık Düşürme Testleri

Seramik ön yüzlü ve kompozit takviyeli seramik kompozit zırh sisteminin darbe özellikleri öncelikle sistem bileşenleri bazında incelenmiştir. Bu kapsamda seramik ve kompozit malzemenin düşük hızlı ve enerjili darbe davranışı ağırlık düşürme testleri ile belirlenmiştir. INSTRON Dynatup 9250 test cihazı ile yürütülen darbe testlerinde kullanılmak üzere kompozit malzeme;

- Düz dokuma E-Cam kumaş 3 kat ile 2,3 mm, 7 kat ile 3,85 mm, 10 kat ile 5,67 mm, 13 kat ile 8,13 mm, 16 kat ile 9,75 mm, 24 kat ile 14,35 mm ortalama kalınlıkta ve 100 x 100 mm ebatlarında,

- E-Cam tek yönlü kumaş [0/90] dizilişle 5 kat ile 2,17 mm, 9 kat ile 4,00 mm, 13 kat ile 6,07 mm, 18 kat ile 7,92 mm, 23 kat ile 9,92 mm, 33 kat ile 14,58 mm ortalama kalınlıkta ve 100 x 100 mm ebatlarında,

- Aramid düz dokuma kumaş 5 kat ile 1,98 mm, 10 kat ile 4,07 mm, 15 kat ile 6,14 mm, 20 kat ile 8,07 mm, 25 kat ile 10,12 mm ortalama kalınlıkta ve 100 x 100 mm ebatlarında üretilmiştir.

Ağırlık düşürme testlerinde seramik malzeme olarak;

- 4, 8, 10 ve 12 mm kalınlıkta, 50 x 100 mm ebatlarında alumina,

- 10 mm kalınlıkta 100 x 100 mm ebatlarında bor karbür,

- 10 mm kalınlıkta 100 x 100 mm ebatlarında silisyum karbür seramik kullanılmıştır.

Ağırlık düşürme testlerinde öncelikle 4,00 mm kalınlıktaki E-Cam tek yönlü [0/90] kompozitin 5 J ile 80 J darbe enerjisi aralığında hasar yapısı incelenmiştir. Testler sonucunda düşük enerjili darbe hasarını karakterize eden geri sekme aralığı, penetrasyon aralığı ve penetrasyon eşik enerjisi, perforasyon aralığı ve perforasyon eşik enerjisi değerleri bulunmuştur. Çizelge 4.7'de 4,00 mm kalınlığındaki E-Cam tek yönlü [0/90] kompozitin darbe testlerine ait enerji seviyeleri verilmiştir. Özellikle penetrasyon ve perforasyon

eşik enerjilerinin hassasiyetle tespit edilmesi maksadıyla eşik enerjiye yakın seviyelerde darbe enerjisi aralıkları daha küçük tutulmuştur.

Çizelge 4.7. 4,00 mm kalınlıkta E-Cam tek yönlü [0/90] kompozitin ağırlık düşürme ile darbe testlerine ait enerji seviyeleri

4,00 mm E-Cam Tek Yönlü Kompozitin [0/90] Darbe Testi Enerji Seviyeleri																
Test Nu.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Darbe Enerjisi (J)	5	10	15	20	25	27,5	30	32,5	35	37,5	30	40	45	50	60	80

3,85 mm kalınlığındaki E-Cam dokuma kompozitin geri sekme aralığı, penetrasyon aralığı ve penetrasyon eşik enerjisi, perforasyon aralığı ve perforasyon eşik enerjisi değerlerini bulmak için Çizelge 4.8'de görüldüğü gibi 15 J - 80 J aralığında darbe testleri yapılmıştır.

Çizelge 4.8. 3,85 mm kalınlıkta E-Cam dokuma kompozitin ağırlık düşürme ile darbe testlerine ait enerji seviyeleri

3,85 mm E-Cam Dokuma Kompozitin Darbe Testi Enerji Seviyeleri																
Test Nu.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Darbe Enerjisi (J)	15	20	25	30	35	37,5	40	42,5	45	47,5	50	52,5	55	60	65	80

Dynatup 9250 test cihazıyla yürütülen testlerde mevcut yük hücresinin 15 kN kapasiteli olması nedeniyle aramid kompozitin penetrasyon ve perforasyon eşik enerjilerinin bulunması mümkün olmamıştır.

Çizelge 4.9'da verilen değişik kalınlıklardaki test numunelerine çizelgede belirtilen enerji seviyelerinde darbe testleri uygulanmıştır. Ağırlık düşürme testleri 10 kg ağırlıkla gerçekleştirilmiştir. Darbe ucu 10 mm çapında yarı küresel şekle sahip ve ağırlığı 56 g'dır. Hareketli kafa üzerinde bulunan yük hücrecini taşıyan 262 g ağırlığındaki tüpe vidalı olarak monte edilmektedir.

Çizelge 4.9. Düşük enerjili darbe testi uygulanan kompozit malzeme bilgisi ve darbe testlerine ait enerji seviyeleri

Kompozit Malzemenin Ağırlık Düşürme Testi Enerji Seviyeleri (10 mm Çaplı Yarı Küresel Darbe Ucu ile 10,05872 kg Ağırlık Altında)								
Kompozit Malzeme	Kalınlık (mm)	Kumaş Katı (Adet)	Ebat (mm)	Darbe Enerjisi (J)				Kompozit Miktarı (Adet)
Cam Elyaf Takviyeli (E-Cam, Düz Dokuma)	2,3	3	100X100	12	18	24	30	8
	3,85	7	100X100	28	42	56	70	8
	5,67	10	100X100	40	60	80	100	8
	8,13	13	100X100	52	65	78	104	8
Cam Elyaf Takviyeli (E-Cam, Tek Yönlü [0/90])	2,17	5	100X100	20	30	40	50	8
	4	9	100X100	36	54	72	90	8
	6,07	13	100X100	52	65	78	104	8
	7,92	18	100X100	72	108	54	36	8
	9,92	23	100X100	46	58			4
Aramid (Kevlar) Düz Dokuma	1,98	5	100X100	20	30	40	50	8
	4,07	10	100X100	40	60	80	100	8
	6,14	15	100X100	60	75	90	105	8

Darbe testlerinde 100 x 100 mm boyutlarındaki numuneler, merkezinde 76 mm çapında dairesel alan serbest kalacak şekilde test fikstürüne bağlanmıştır. Pnömatik test fikstürünün numuneye tüm kenarlarından eşit uyguladığı kuvvet sıkı bir şekilde malzemeyi tutmakta ve kenarların hareketini engellemektedir. Test numunesinin bu şekilde tutulduğu durum, esasında çevresi tutulu dairesel plaka problemiyle örtüşmektedir.

Seramik malzemelere Çizelge 4.10'da belirtilen enerji seviyelerinde ağırlık düşürme testleri uygulanmıştır.

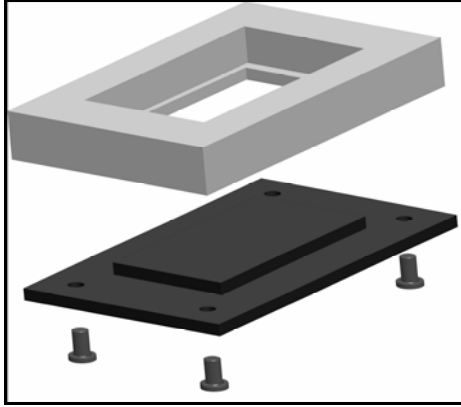
Çizelge 4.10. Düşük enerjili darbe testi uygulanan seramik malzeme bilgisi ve darbe testlerine ait enerji seviyeleri

Ağırlık Düşürme Testi Enerji Seviyeleri (Seramik)									
Seramik Malzeme	Seramik Kalınlığı (mm)	Seramik Ebadı (mm)	Enerji Seviyesi (J) [Darbe Bölgesi Altın Desteksiz, Striker Ø10 mm]						Seramik Miktarı (Adet)
ALUMİNA	4	50X100	1,5	2	5	15	30		10
	8	50X100	1,5	3	5	10	15	30	12
	10	50X100	3	5	10	15	30		10
	12	50X100	3	5	10	20	30	60	12
	4+4	50X100	3	5	15				6
B ₄ C	10	100X100	10						1
SiC	10	100X100	10						1

Seramik malzemede darbe ile birlikte oluşan basma gerilme dalgaları serbest kenarlarda çekme gerilmelerine dönüşmekte, uç noktalarda gerilmelerin ilerleme hızı iki katına çıkmaktadır. Buna bağlı olarak serbest kenarlarda kırılmalar ve parça kopması görülebilmektedir. Bu etkiyi incelemek amacıyla Şekil 4.7'de görülen tutucu aparat tasarımı ve imalatı gerçekleştirilmiştir.

4140 çeliğinden imal edilen tutucu aparat içerisine seramik malzeme yerleştirildiğinde tüm kenarlardan desteklenmektedir. Tutucu aparatın alt

plakası ana gövdeye civata bağlantısı ile monte edilmektedir. Alt plakasız kullanıldığında numune altı desteksiz, alt plaka ile birlikte kullanıldığında ise numune altı destekli darbe testi yapılabilmektedir.



Şekil 4.7. Ağırlık düşürme testinde serbest kenarlara destek sağlamak için tasarlanan tutucu aparat

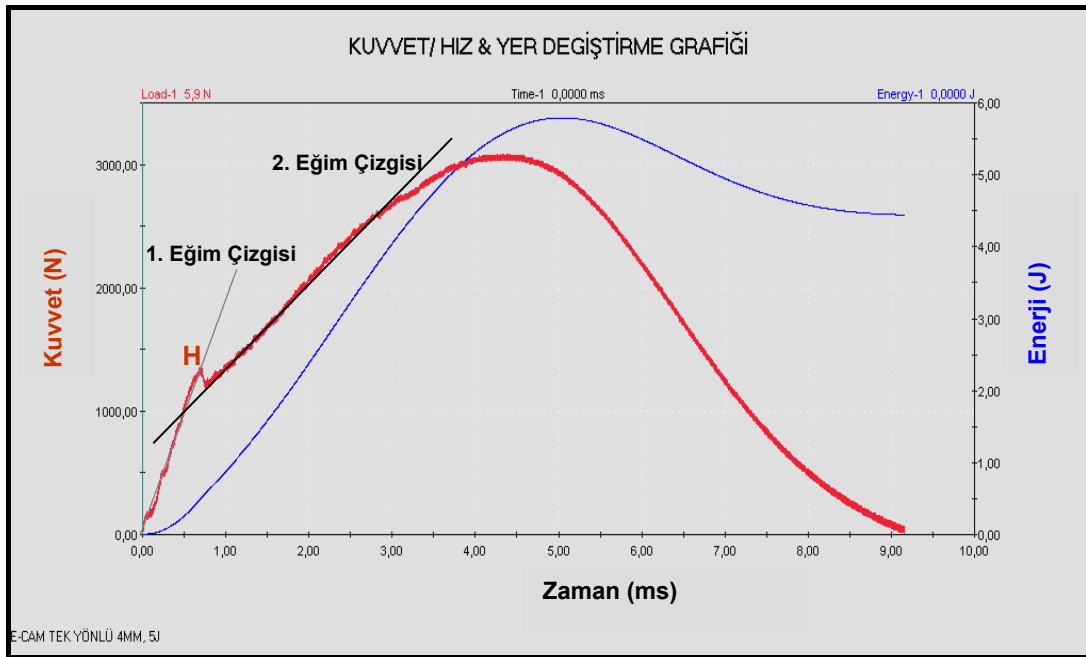
4.2.1. E-Cam tek yönlü $[0/90]_9$ kompozitin ($t= 4,00$ mm) darbe test sonuçları (Geri sekme, penetrasyon ve perforasyon durumu)

Ortalama 4,00 mm kalınlıktaki E-Cam tek yönlü $[0/90]$ kompozit numunelere 5 J ile 80 J darbe enerjisi aralığında Çizelge 4.7’de verilen enerji seviyelerinde ağırlık düşürme testleri uygulanmıştır. Testler sonucunda düşük enerjili darbe hasarını karakterize eden geri sekme aralığı, penetrasyon aralığı ve penetrasyon eşik enerjisi, perforasyon aralığı ve perforasyon eşik enerjisi değerleri bulunmuştur.

E-Cam tek yönlü $[0/90]_9$ kompozitin ($t= 4,00$ mm) geri sekme karakterli (5 J - 27,5 J enerji aralığında) ağırlık düşürme testleri

Ağırlık düşürme testlerinde darbe enerjisi malzemenin yapısına ve kalınlığına özgün belli bir eşik enerjisinin altında kaldığı takdirde, malzeme tarafından başlangıç enerjisinin tamamının absorbe edilemediği görülmüştür. Darbe altında eğilmeye uğrayarak şekil değiştiren kompozit plakanın kazandığı

elastik enerji düşen ağırlık sisteminin geri sekmesine neden olmaktadır. 4 mm kalınlığındaki E-Cam tek yönlü kompozitin 5 J darbe enerjisine karşılık kuvvet/enerji & zaman grafikleri Şekil 4.8'de, kompozit malzemede darbe etkileşimi sonucu absorbe edilen enerji, kuvvet ve yer değiştirme değerleri ise Çizelge 4.11'de verilmiştir.



Şekil 4.8. 4 mm kalınlığındaki E-Cam tek yönlü kompozitin 5 J enerji ile ağırlık düşürme testinde bulunan kuvvet/enerji & zaman grafikleri

Çizelge 4.11. 4 mm E-Cam tek yönlü kompozitin 5 J darbe enerjisindeki yükleme ve enerji değerleri

4 mm E-Cam Tek Yönlü Kompozit Ağırlık Düşürme Testine Ait Önemli Veriler								
F_{max} (N)	E_{max} (J)	d_{max} (mm)	V_d (m/s)	E_a (J)	d_{top} (mm)	t_{top} (ms)	F_H (N)	E_H (J)
3080,4	5,5311	3,1242	0,9862	4,4434	1,7583	9,1608	1346,2	0,5167

Çizelge 4.11'de yer alan:

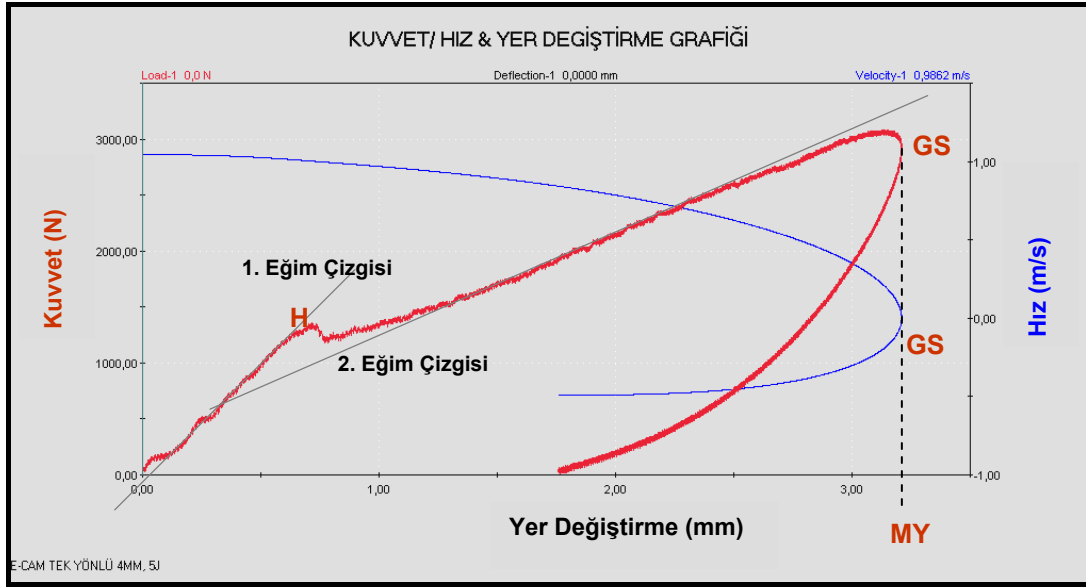
F_{max} : Darbe sonucu ölçülen en büyük kuvvet (yükleme) değerini,

- E_{max} : En büyük kuvvete karşılık gelen enerji değerini,
 d_{max} : En büyük kuvvete karşılık gelen yer değiştirmeyi,
 V_d : Çarpma (başlangıç darbe hızı) hızını,
 E_a : Darbe ile malzeme tarafından absorbe edilen enerjiyi,
 d_{top} : Darbe altındaki toplam yer değiştirmeyi,
 t_{top} : Toplam darbe zamanını
 F_H : Hertz kontak kuvvetini,
 E_H : Hertz kontak kuvvetine karşılık gelen enerjiyi ifade eder.

Çizelge 4.11'de maksimum kuvvete karşılık gelen yer değiştirme (eğilme) 3,124 mm olarak verilmiştir. Bu noktadan sonra test numunesinin küçük bir miktar daha eğildiği ve Şekil 4.9'da görülen GS (Geri sekme noktası) noktasında en büyük yer değiştirmeye (MY) sahip olduğu görülmektedir. GS noktasına karşılık gelen yer değiştirme 3,207 mm'dir.

GS noktasında kompozit malzemenin darbe yönündeki hızı sıfırlanmış ve düşen ağırlıkla birlikte darbe ucunun geri sekmesi başlamıştır. Geri sekme takozları, darbe ucunun kompozit malzeme üzerine çoklu vuruş yapmasını engellemektedir. Kompozit malzeme üzerine darbe 0,986 m/s hızında gerçekleşmekte olup hız maksimum yer değiştirme noktasında sıfır oluncaya kadar giderek azalmaktadır. Geri sekme ile birlikte düşen ağırlık ve darbe ucu sistemi ters yönde hız kazanmaktadır. Geri sekme sonucunda kompozit malzemenin toplam yer değiştirmesi 1,758 mm olmaktadır. Darbe sonu yer değiştirme miktarı, maksimum kuvvete karşılık gelen yer değiştirmeye mukayese edildiğinde elastik olarak bir geri kazanımın olduğu görülmektedir.

Darbe etkileşim süresi olarak kaydedilen 9,1608 ms zaman süresince kompozit malzeme tarafından absorbe edilen (sönümlenen) toplam enerji 4,4434 J'dür. Darbe başlangıç enerjisinin 5 J olduğu dikkate alındığında 0,5566 J kadar enerji (başlangıç enerjisinin %11,13'ü) elastik şekil değiştirme enerjisi olup darbe sonrası geri sekmeye karşılık gelmektedir.

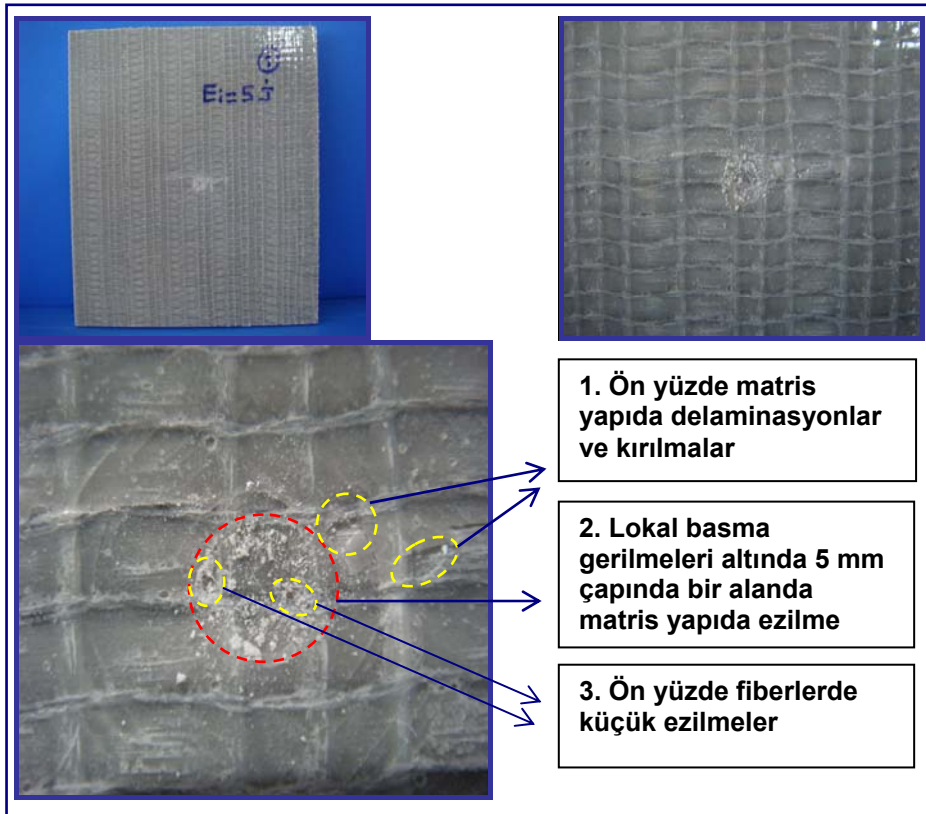


Şekil 4.9. 4 mm kalınlığındaki E-Cam tek yönlü kompozitin 5 J enerji ile ağırlık düşürme testine ait kuvvet/hız & yer değiştirme grafikleri

Şekil 4.8' deki kuvvet & zaman grafiğinde H noktasında kuvvetin eğiminde ani bir düşme görülmektedir. Darbe olayında, darbe ucu ile kompozit test numunesi arasındaki temas yüzeyinde lokal kontak (temas) kuvvetleri oluşmaktadır. Kontak kuvvetlerinin etkisi altında kompozit malzemenin darbe tarafında üst yüzünde matris yapıda ezilme ve küçük delaminasyonlar görülmektedir. Kontak kuvvetlerinin etkisi altında oluşan bu hasar yapısı Hertz Kontak Hasarı olarak adlandırılmaktadır. Hertz Kontak Hasarı, kuvvet & zaman grafiğindeki ilk ani düşme ile karakterize edilebilmektedir [82]. 4 mm kalınlığındaki tek yönlü cam fiber takviyeli kompozit malzemede Hertz Hasarına neden olan kuvvet (Hertz Kuvveti) $F_H = 1346,2$ N'dur.

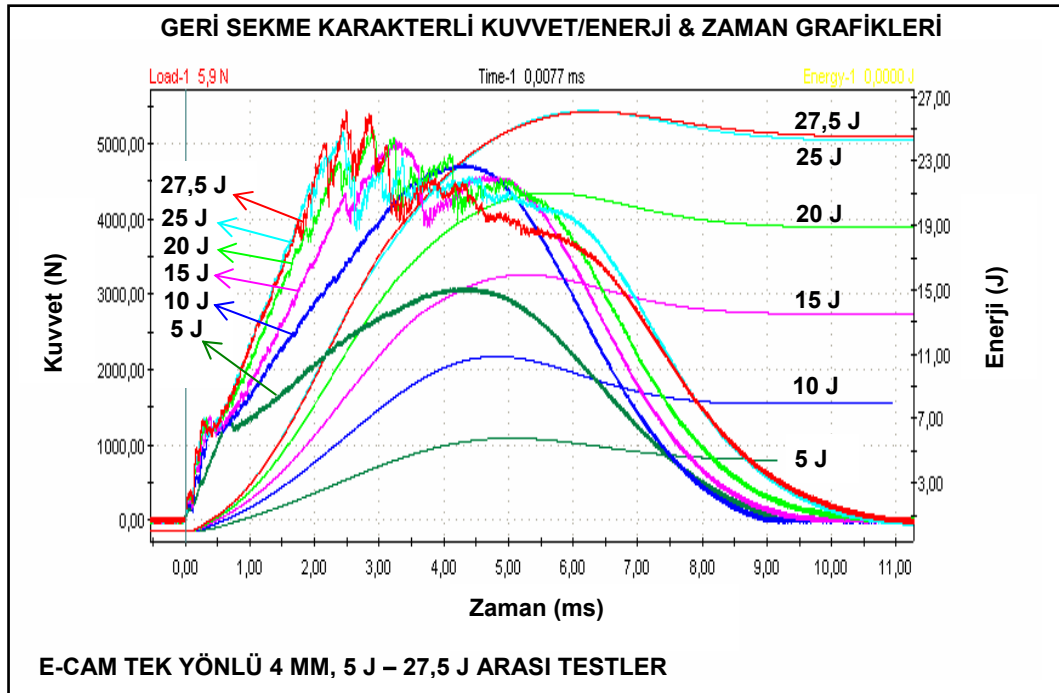
Şekil 4.8' deki kuvvet & zaman grafiği ile Şekil 4.9' daki kuvvet & yer değiştirme grafiğinin eğimleri incelendiğinde H noktasında eğimde süreksizlik ve kuvvette azalma görülmektedir ($F_H = 1346,2$ N). Eğimdeki değişimin nedeni Hertz kontak gerilmeleri altında meydana gelen Hertz hasarı ile açıklanabilir. Darbe test enerjisi oldukça düşük olmasına rağmen Hertz kontak gerilmeleri altında matris yapıda ezilme ve küçük kırılmalarla, darbe yüzeyindeki fiberlerde ezilme olduğu görülmüştür.

Hertz Kontak Hasarı olarak adlandırılan hasar yapısı Resim 4.3'de görülmektedir. Ön yüzde; çarpma noktasında darbe ucunun hemen altında, yüksek lokalize basma gerilmeleri ve darbe ucunun çentik etkisine bağlı olarak gelişen matris yapıdaki ezilme yaklaşık olarak 5 mm çapındaki bir alan içinde oluşmuştur. Matris yapıda darbe altında meydana gelen ezilmeye paralel olarak fiberlerde ezilme oluşmuştur. Bu aşamada aynı zamanda delaminasyon oluşumu ve gelişmesi de görülebilmektedir.

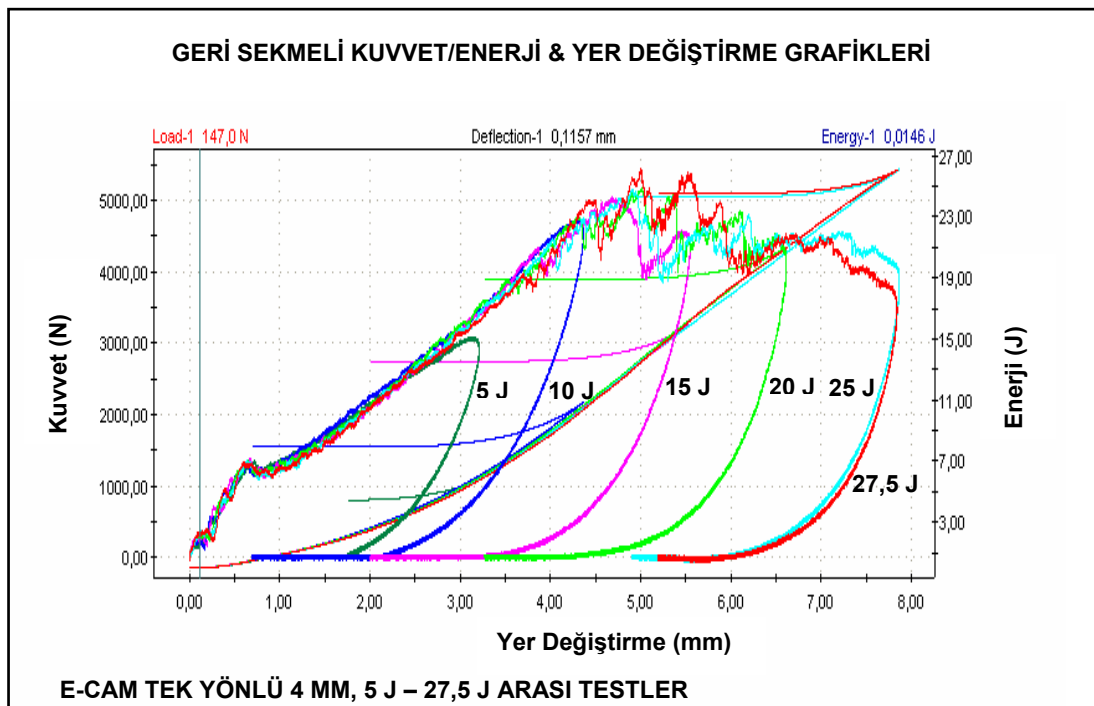


Resim 4.3. 4 mm E-Cam tek yönlü [0/90]₉ kompozitin 5 J ile darbe testi sonrası ön yüzünde meydana gelen hasar

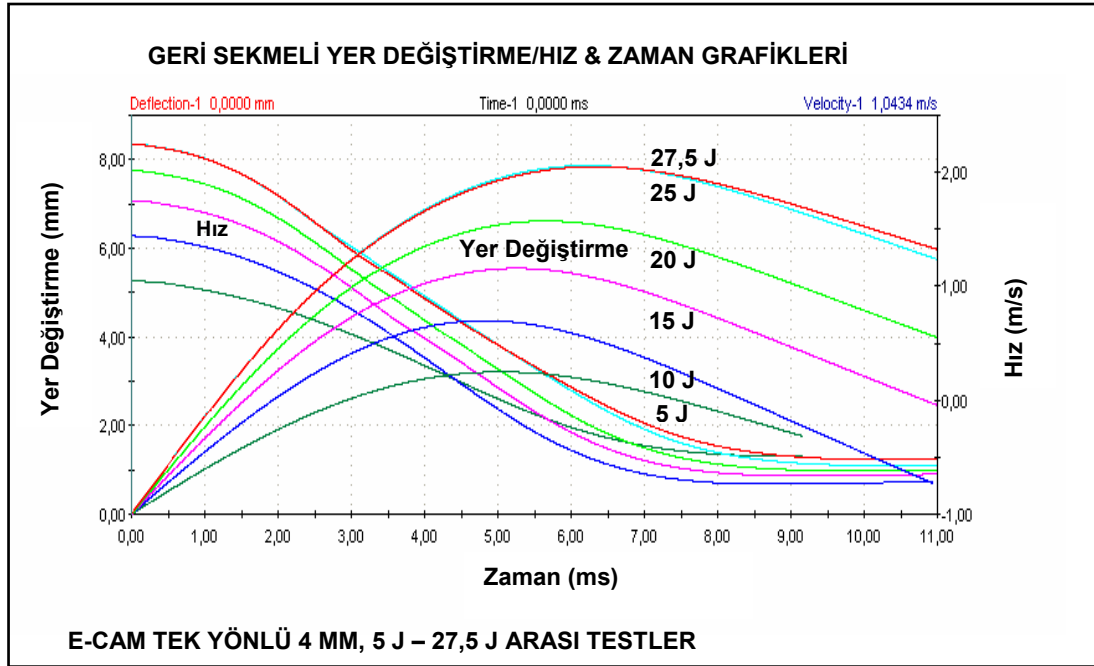
E-Cam tek yönlü [0/90]₉ kompozit malzemenin 5 J ile 27,5 J arasındaki ağırlık düşürme testlerinden elde edilen kuvvet/enerji & zaman, kuvvet/enerji & yer değiştirme ve yer değiştirme/hız & zaman grafikleri sırasıyla Şekil 4.10, Şekil 4.11 ve Şekil 4.12'de verilmiştir.



Şekil 4.10. 4 mm kalınlığındaki E-Cam tek yönlü kompozitin 5-27,5 J ile ağırlık düşürme testlerine ait kuvvet/enerji & zaman grafikleri



Şekil 4.11. 4 mm kalınlığındaki E-Cam tek yönlü kompozitin 5-27,5 J enerji ile ağırlık düşürme testlerine ait kuvvet/enerji & yer değiştirme grafikleri

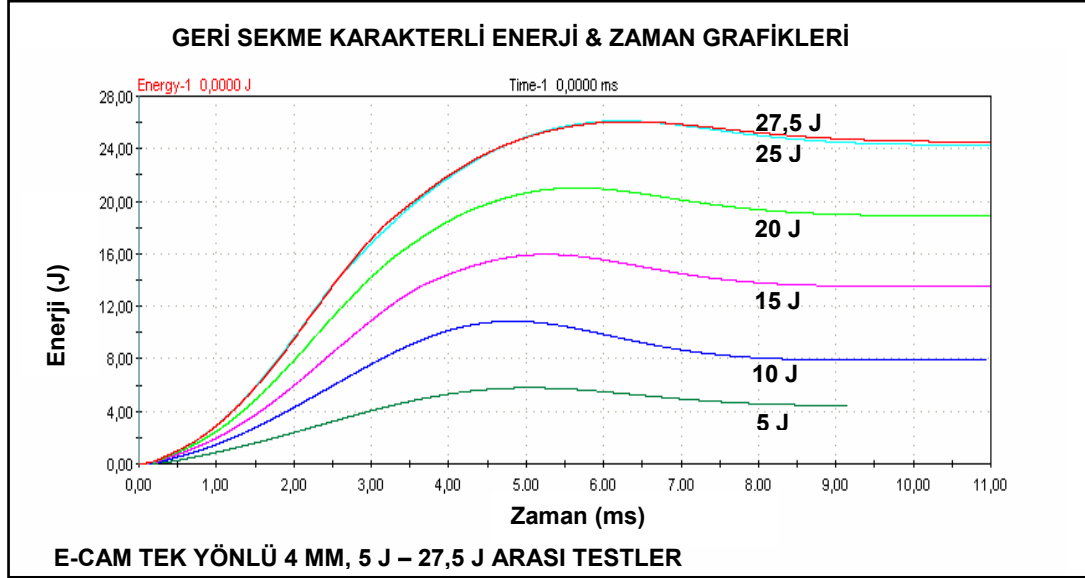


Şekil 4.12. 4 mm kalınlığındaki E-Cam tek yönlü kompozitin 5-27,5 J enerji ile ağırlık düşürme testlerine ait yer değiştirme/hız & zaman grafikleri

5 J ile 27,5 J enerji aralığında gerçekleştirilen geri sekme karakterli ağırlık düşürme testlerinde kompozit malzemenin darbe davranışı, kırılmanın başlaması ve gelişmesi ile ilgili ortak olan bazı özellikler tespit edilmiştir. Tespit edilen özellikler kompozit malzemenin karakterizasyonu ve düşük hızlardaki darbe davranışının incelenmesi açısından oldukça önemlidir. Bu özellikler temel olarak aşağıda verilmiştir:

(1) Geri sekme karakterli ağırlık düşürme testlerinde, (5 J - 27,5 J) darbe enerjisi aralığında kompozit malzeme tarafından absorbe edilen enerji başlangıç darbe enerjisinden daha küçüktür. Bu durum Şekil 4.13'de açıkça görülmektedir. Her bir testte bulunan ve Şekil 4.11'de verilen kuvvet - yer değiştirme grafiklerinin altında kalan alanla hesaplanan enerji değerleri malzemedeki deformasyon sonucu absorbe edilen enerjiyi göstermektedir. Test numunesi tarafından absorbe edilen enerji miktarı, Şekil 4.13'deki grafikte darbe olayının sonunda tespit edilen enerjiye karşılık gelmektedir. Başlangıç darbe enerjisi ile absorbe edilen enerji arasındaki fark, elastik şekil

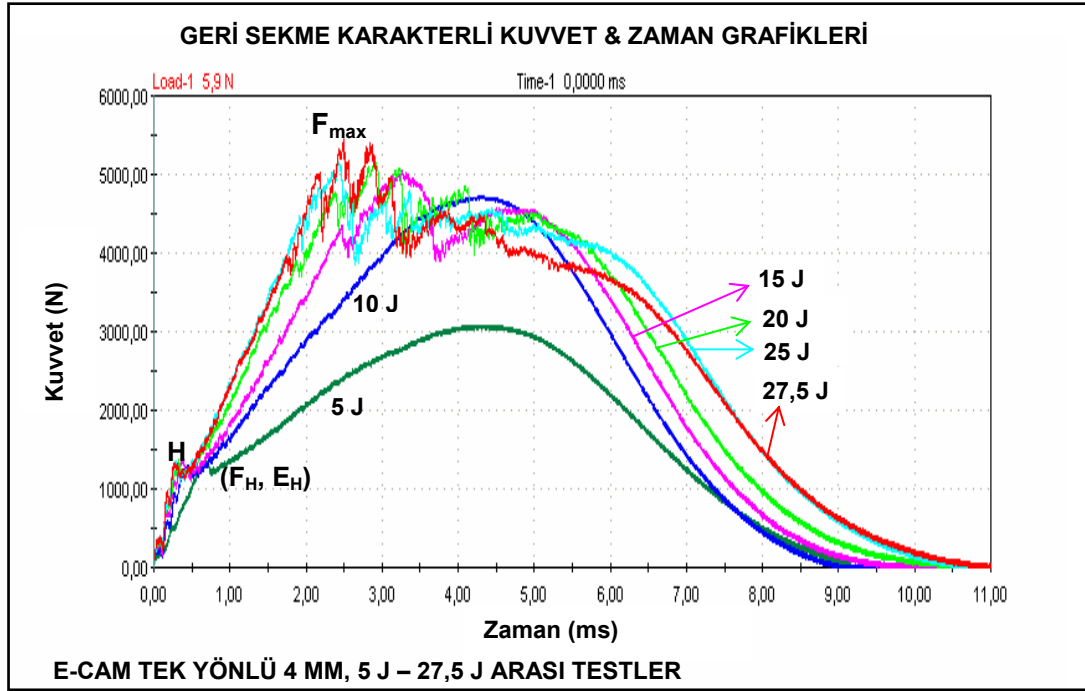
değiştirme enerjisi olup düşen ağırlık-darbe ucu sisteminin yön değiştirerek geri sekmesine neden olmaktadır.



Şekil 4.13. 4 mm kalınlığındaki E-Cam tek yönlü kompozitin 5 - 27,5 J enerji ile ağırlık düşürme testlerine ait enerji & zaman grafikleri

(2) Şekil 4.14'de yer alan kuvvet & zaman grafikleri incelendiğinde 5 J ve 10 J enerjilerle yapılan ağırlık düşürme testlerinin dışında gerçekleştirilen tüm testlerde maksimum kuvvetin hemen hemen aynı olduğunu görmek mümkündür. Yani düşük hızlı darbe durumunda malzemeye uygulanan (kompozit malzeme tarafından taşınabilen) maksimum kuvvet değişmemektedir ve malzemenin üretim parametreleri ile kalınlığına bağlı bir özellik olarak ortaya konabilir.

(3) Hertz Kontak Hasarını işaret eden H noktası (Şekil 4.14) düşük hızlı darbe olayında kompozit malzemenin hasar karakterizasyonu için önemlidir. 5 J - 27,5 J arası tüm testlerde bu noktanın yaklaşık aynı olduğu ve gerçekleştirilen altı test için aritmetik ortalamanın $F_H = 1343,8$ N olduğu görülmektedir. Çizelge 4.12'de, yapılan testlerden elde edilen maksimum kuvvet değerleri, Hertz Hasarı kuvvet değerleri ve Hertz Hasar enerjisi değerleri görülmektedir.



Şekil 4.14. 4 mm kalınlığındaki E-Cam tek yönlü kompozitin 5 - 27,5 J enerji ile ağırlık düşürme testlerine ait kuvvet & zaman grafikleri

Hertz hasarı oldukça düşük enerjili darbe yüklemelerinde (5 J) dahi görülmekte, hasarın oluşması için eşik kuvvetin (Hertz Hasarı kuvveti) aşılması gerekmektedir. Bu nedenle Hertz Hasarı kuvveti hesaplanırken yapılan tüm testlerin ortalaması alınmıştır.

Çizelge 4.12. 4 mm E-Cam tek yönlü kompozitin 5 J – 27,5 J arası darbe testlerinde bulunan kritik kuvvet değerleri

Darbe Enerjisi E_d (J)	Maksimum Kuvvet F_{max} (N)	Hertz Kuvveti F_H (N)	Hertz Hasar Enerjisi E_H (J)
5	3080,4	1346,2	0,5167
10	4729,2	1288,2	0,4286
15	5041,0	1382,3	0,4877
20	5170,4	1370,5	0,4267
25	5158,6	1341,1	0,4301
27,5	5443,7	1334,5	0,3764
ORTALAMA	5203,425*	1343,8	0,4302*

* Düşük enerjili (5 J, 10 J) darbe testleri hesaplamaya dahil edilmemiştir.

Teste tabi kompozit malzemenin üretim parametreleri ile kalınlığına bağlı olarak değişebilen maksimum kuvvet değeri malzeme tarafından

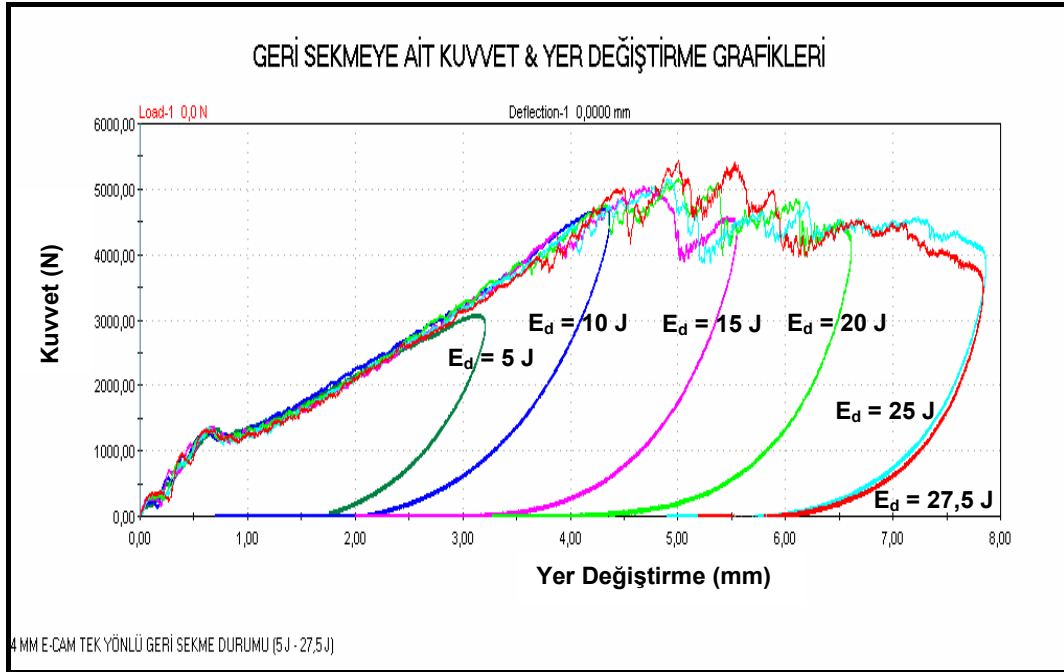
taşınabilecek maksimum yüklemeyi göstermektedir. 5 J ve 10 J darbe enerjili ağırlık düşürme testlerindeki yükleme yeterince yüksek olmadığı için malzemeye özgün maksimum kuvvet değerinin bulunmasında bu iki teste ait veriler ortalama hesaplamada dikkate alınmamıştır.

(4) Şekil 4.14'de verilen kuvvet & zaman grafiği incelendiğinde; kuvvetin yükselirken eğiminin sürekli aynı kalmadığı belli bir hasar eşliğinden sonra (Hertz hasarı kuvveti) eğimin değiştiği görülmektedir. Düşük enerjili darbe yüklemesinin önemli karakteristik özelliklerinden birisi olarak tespit edilen bu durum Hertz hasarının malzemede meydana gelen ilk hasar olduğunu da açıkça göstermektedir.

Geri sekme karakterli ağırlık düşürme testlerinde kuvvet - enerji ve hasar mekanizmaları ilişkisi

Geri sekme ile sonuçlanan düşük hızlı darbe testlerine ($E_d = [5 - 27,5]$ J) ait kuvvet & yer değiştirme grafikleri Şekil 4.15'de, kritik kuvvet ve enerji değerleri Çizelge 4.13'de, kompozit malzemenin ön ve arka yüzündeki hasar yapısı Çizelge 4.14'de, hasar fotoğrafları ise Resim 4.4'de görülmektedir.

Şekil 4.15'deki kuvvet & yer değiştirme grafiğinden görüldüğü gibi $E_d = [5-10]$ J gibi küçük darbe enerjilerinde gerçekleştirilen ağırlık düşürme testlerinde, kompozit malzeme içerisinde oluşan kuvvet maksimum bir değere ulaştıktan sonra tekrar başlangıç noktasına gelmektedir. Ancak bu seviyelerde ulaşılan kuvvet değerleri, kompozit malzeme içerisinde daha yüksek enerji seviyelerinde gelişebilecek ve malzemenin yapısal, karakteristik bir özelliğini ifade eden taşınabilir maksimum kuvvet değerinin altındadır. Bu seviyedeki düşük hızlı darbe testlerinde Resim 4.4'den de görüleceği gibi kompozit malzemenin ön yüzünde küçük matris çatlakları, matris ve fiberlerde küçük ezilmeler meydana gelmektedir.



Şekil 4.15. 4 mm E-Cam tek yönlü kompozitin geri sekme karakterli düşük hızlı darbe testine ait kuvvet & yer değiştirme grafikleri

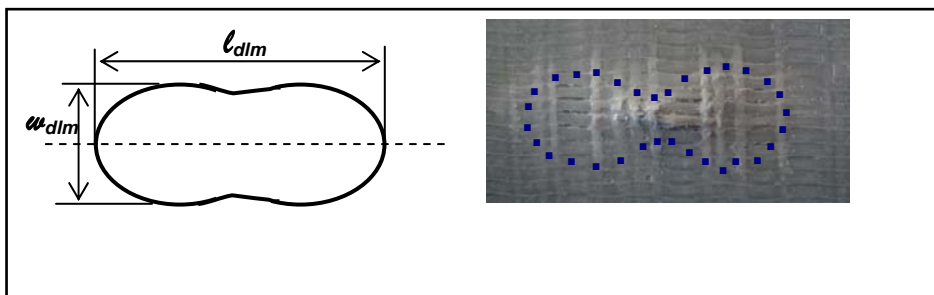
Çizelge 4.13. 4 mm E-Cam tek yönlü kompozitin 5 J – 27,5 J darbe enerjisi aralığında geri sekme karakterli darbe sonuçları

GERİ SEKME KARAKTERLİ DARBE SONUÇLARI						
E_d (J)	5	10	15	20	25	27,5
F_{max} (N)	3080,4	4729,2	5041	5170,4	5158,6	5443,7
$E(F_{max})$ (J)	5,53	10,61	12,08	13,70	13,04	13,49
E_a (J)	4,44	7,93	13,53	18,89	24,29	24,53
F_h (N)	1346,2	1288,2	1382,3	1370,5	1341,1	1334,5
E_h (J)	0,517	0,428	0,487	0,427	0,430	0,376
Matris ezilme çapı (mm)	5	5	7	8	9	9
Delaminasyon boyu (mm) l_{dlm}	-	-	35	40	42	45
Delaminasyon eni (mm) w_{dlm}	-	-	15	20	20	22

$E_d = [5-10]$ J seviyesinde gerçekleştirilen düşük hızlı darbe testlerinde kompozit malzemenin arka yüzünde eğilme etkisine bağlı olarak küçük bel vermeler dolayısıyla fiberlerde uzama yani genlemede artış meydana gelmektedir.

Kompozit malzemenin arka yüzünde meydana gelen hasar alanı darbe enerjisine bağlı olarak incelendiğinde (Resim 4.4); geri sekme bölgesinde artan başlangıç darbe enerjisi ile birlikte arka yüzde oluşan delaminasyon alanı da artmaktadır. Delaminasyonlar Şekil 4.16'da görüldüğü gibi yer fıstığı şeklindedir. Şekil 4.16'da görülen ve aynı zamanda delaminasyon alan büyüklüğü için de ölçüt olarak Çizelge 4.13 ve Çizelge 4.14'de kullanılan l_{dlm} , delaminasyon uzunluğunu (boyunu), w_{dlm} ise delaminasyon genişliğini (enini) ifade etmektedir.

Çizelge 4.13'de yer alan matris ezilme çapı, darbe ucunun hemen altında matris ezilmesi şeklinde meydana gelen dairesel hasar alanının çapını ifade etmektedir. Çizelge 4.14'de, kompozit malzemenin ön yüzündeki darbe ucunun (delici uç) penetrasyon derinliği çentik derinliği olarak ifade edilmiştir.

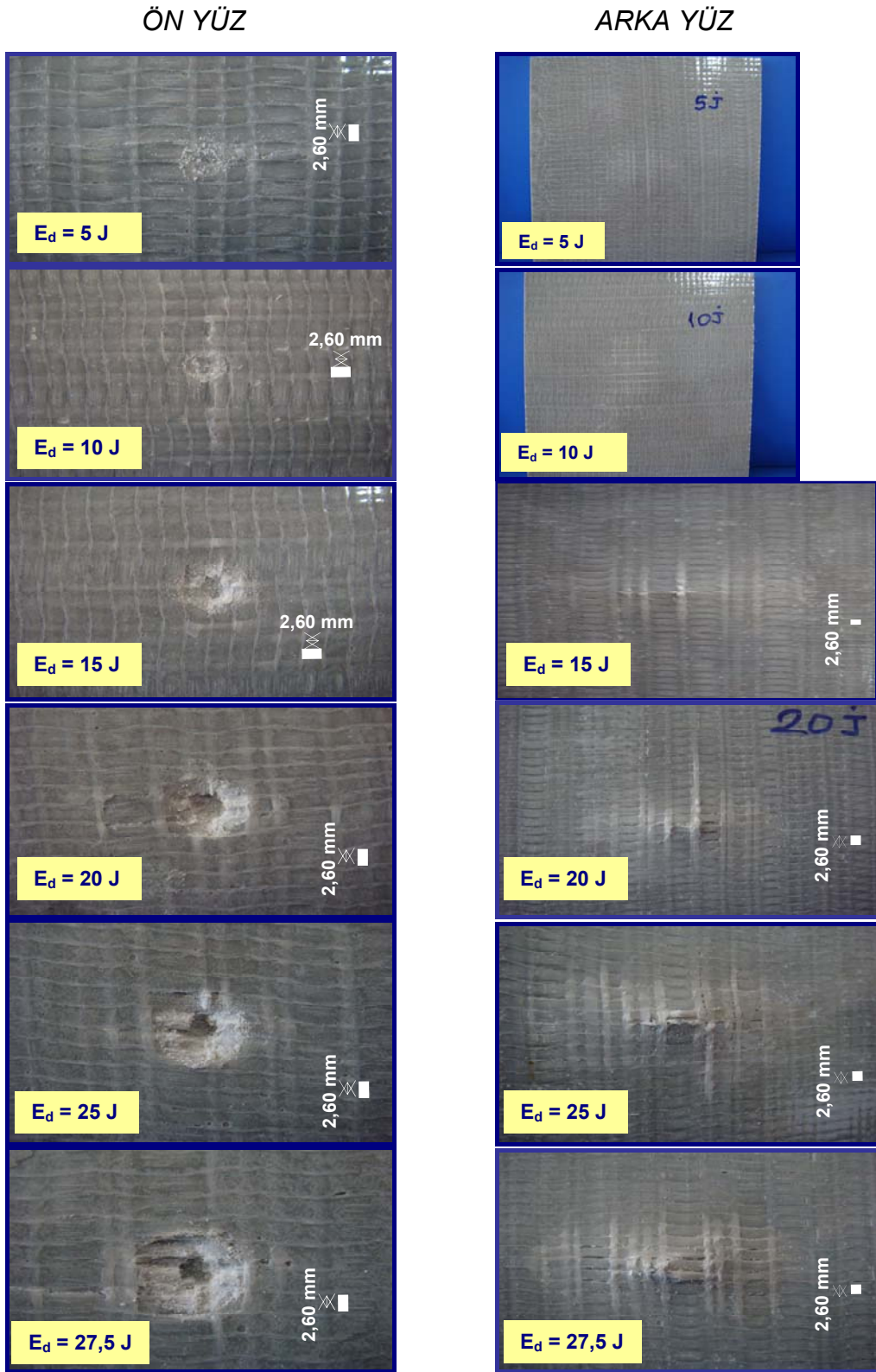


Şekil 4.16. 4 mm kalınlığında E-Cam tek yönlü kompozitin geri sekme karakterli düşük hızlı darbe testinde arka yüzünde meydana gelen yer fıstığı şeklindeki delaminasyon hasar yapısı

Matris çatlakları, katman ara yüzüne ulaşip ayrılmaya sebebiyet vermediği (yani delaminasyon oluşmadığı) müddetçe darbe sonrası malzeme mukavemetini olumsuz yönde en az etkileyen darbe hasar şeklidir.

Çizelge 4.14. 4 mm E-Cam tek yönlü kompozitin 5 J - 27,5 J darbe enerjisi aralığında geri sekme karakterli darbe hasar yapısı

Darbe Enerjisi (J)	GERİ SEKME KARAKTERLİ DARBE HASAR YAPISI	
	ÖN YÜZ	ARKA YÜZ
5	<ol style="list-style-type: none"> 1. Lokal basma gerilmeleri altında 5 mm çapında bir alanda matris yapıda ezilme; çatlak ve delaminasyon başlangıcı 2. Fiberlerde küçük ezilmeler 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Eğilme gerilmeleri altında fiberlerde boylamasına küçük esnemeler 2. Yüzeyde belirgin bir hasar yok 3. Bel verme şeklinde küçük kalıcı deformasyon
10	<ol style="list-style-type: none"> 1. Lokal basma gerilmeleri altında 5 mm çapında bir alanda matris yapıda ezilme; çatlak ve delaminasyon başlangıcı 2. Fiberlerde küçük ezilmeler 3. Matris yapıda ezilme alanına ait çentik yapısının 5 J'de yapılan teste göre daha belirgin olması 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Eğilme gerilmeleri altında fiberlerde boylamasına küçük esnemeler 2. Yüzeyde belirgin bir hasar yok 3. Bel verme şeklinde küçük kalıcı deformasyon
15	<ol style="list-style-type: none"> 1. Lokal basma gerilmeleri altında 7 mm çapında bir alanda matris yapıda ezilme; delaminasyon ve kırılma oluşumu 2. V şeklinde fiber kırılması 3. Delici uç batma (çentik) derinliği: 0,5 mm 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Eğilme gerilmeleri altında fiberlerde boyca artan genleme 2. Yüzeyde yer fıstığı şekline benzer delaminasyon oluşumu 3. $l_{dlm} = 35$ mm, $w_{dlm} = 15$ mm
20	<ol style="list-style-type: none"> 1. Lokal basma gerilmeleri altında 8 mm çapında bir alanda matris yapıda ezilme; delaminasyon ve kırılma gelişimi 2. 3 mm çapında dairesel kesme şeklinde fiber kırılması 3. Çentik derinliği: 1,5 mm 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Eğilme gerilmeleri altında fiberlerde boyca artan genleme 2. Fiberlerde kırılmalar 3. Yüzeyde yer fıstığı şekline benzer artan delaminasyon hasar alanı 4. $l_{dlm} = 40$ mm, $w_{dlm} = 20$ mm
25	<ol style="list-style-type: none"> 1. Lokal basma gerilmeleri altında 9 mm çapında bir alanda matris yapıda ezilme, delaminasyon ve kırılma gelişimi 2. Kesme gerilmeleri altında 3 mm çapında dairesel fiber kırılması 3. Çentik derinliği: 2 mm 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Eğilme gerilmeleri altında fiberlerde boyca artan genleme 2. Fiberlerde kırılma gelişimi 3. Yüzeyde yer fıstığı şekline benzer artan delaminasyon hasar alanı 4. $l_{dlm} = 42$ mm, $w_{dlm} = 20$ mm
27,5	<ol style="list-style-type: none"> 1. Lokal basma gerilmeleri altında 9 mm çapında bir alanda matris yapıda ezilme; delaminasyon ve kırılma gelişimi 2. Kesme gerilmeleri altında 3 mm çapında dairesel fiber kırılması 3. Çentik derinliği: 2 mm 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Eğilme gerilmeleri altında fiberlerde boyca artan genleme 2. Fiberlerde kırılma gelişimi 3. Yüzeyde yer fıstığı şekline benzer artan delaminasyon hasar alanı 4. $l_{dlm} = 45$ mm, $w_{dlm} = 22$ mm

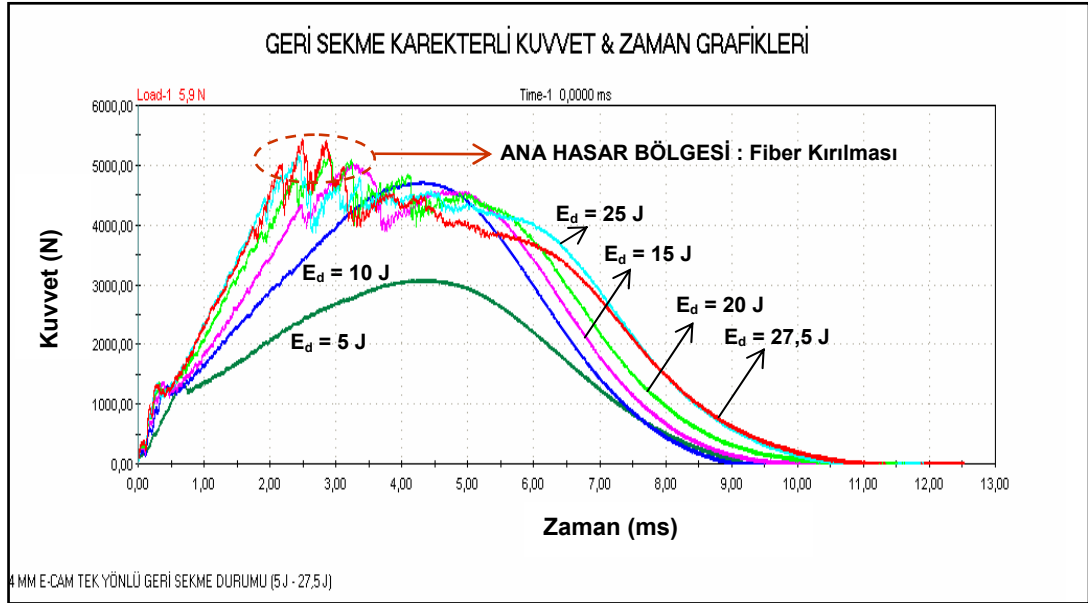


Resim 4.4. 4 mm E-Cam tek yönlü [90/0]₉ kompozitin 5 J - 27,5 J enerji ile geri sekme durumuna ait ön ve arka yüzlerinde oluşan hasar

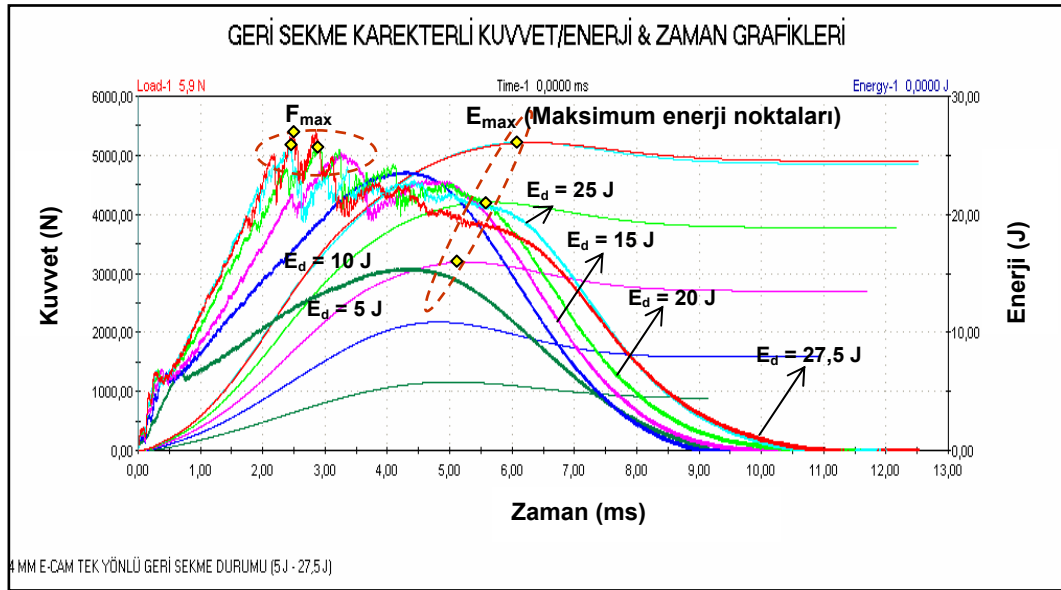
Delaminasyon oluşturmeyen matris çatlakları kompozit malzemenin mukavemetini önemli ölçüde etkilemez iken delaminasyon oluşması mukavemetin büyük ölçüde düşmesine neden olmaktadır. Delaminasyonlar kompozit yapıda fiber dizilişinin değiştiği ara yüzeylerde daha etkili olmaktadır. Fiber dizilişindeki farklılıklara bağlı olarak katmanların eğilme rijitliği de değişmektedir. Böylece eğilme altındaki katmanların eğilme davranışında katların şekil değiştirmesinde uyumsuzluk meydana gelir. Katmanlar arasındaki kayma dayanımını aşan gerilme halinde ise delaminasyon kaçınılmaz olmaktadır.

Resim 4.4'de görüldüğü gibi artan enerji seviyelerinde ($E_d = [15-27,5]$ J) kompozitin ön yüzünde fiber kırılması meydana gelmektedir. Şekil 4.17'deki kuvvet & zaman grafiklerinden görüleceği gibi fiber kırılmasının oluşmadığı $E_d = [5-10]$ J enerjilerinde yapılan darbe testlerinde kuvvet maksimum değerine düzgün bir kuvvet eğimiyle ulaşmakta, maksimum noktadan sonra da düzgün bir şekilde azalmaktadır. Fiber kırılmasının olduğu $E_d = [15-27,5]$ J enerjilerinde ise kuvvet malzemenin taşıyabileceği en büyük (F_{max}) değerine ulaşmaktadır. $F = F_{max}$ eşitliği sağlandığında ise malzemede ana hasar oluşmaktadır (Şekil 4.17). Söz konusu ana hasar, fiber kırılması ile gelişen hasar yapısıdır. Ana hasar bölgesi civarında kuvvet, maksimum hasar kuvveti (F_{max}) ile kompozit malzemeye aktarılan maksimum enerji (E_{max}) arasında salınım yaptıktan sonra hızla düşmektedir (Şekil 4.18).

Şekil 4.18'deki grafiklerde $E_d = [15-27,5]$ J darbe enerjileriyle yapılan ağırlık düşürme testlerine ait maksimum enerji noktaları küçük sarı karelerle işaretlenmiştir. Kompozit malzemede fiber kırılmasına bağlı ana hasarın meydana gelmesi halinde; malzeme içerisinde darbe yüklemesi kaynaklı oluşan kuvvetlerin, ana hasar noktası ile darbe etkileşim sürecinde kompozit malzemeye aktarılan toplam enerjinin maksimum değerine ulaştığı nokta arasında geçen sürede, salınım hareketi toplam darbe süresi içerisinde önemli bir bölümü oluşturmaktadır.



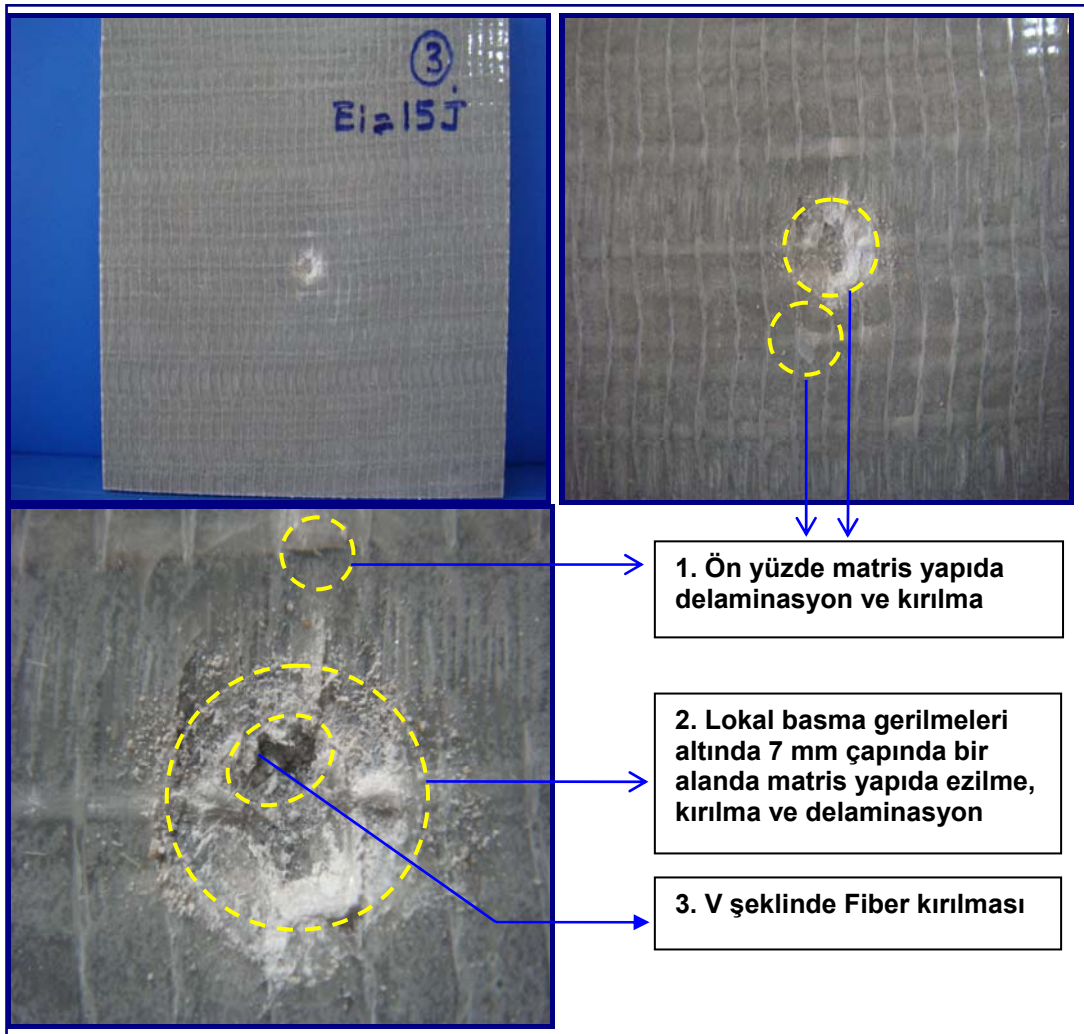
Şekil 4.17. 4 mm kalınlığındaki E-Cam tek yönlü kompozitin geri sekme karakterli düşük hızlı darbe testine ait kuvvet & zaman grafikleri



Şekil 4.18. 4 mm kalınlığındaki E-Cam tek yönlü kompozitin geri sekme karakterli düşük hızlı darbe testlerine ait kuvvet/enerji & zaman grafikleri

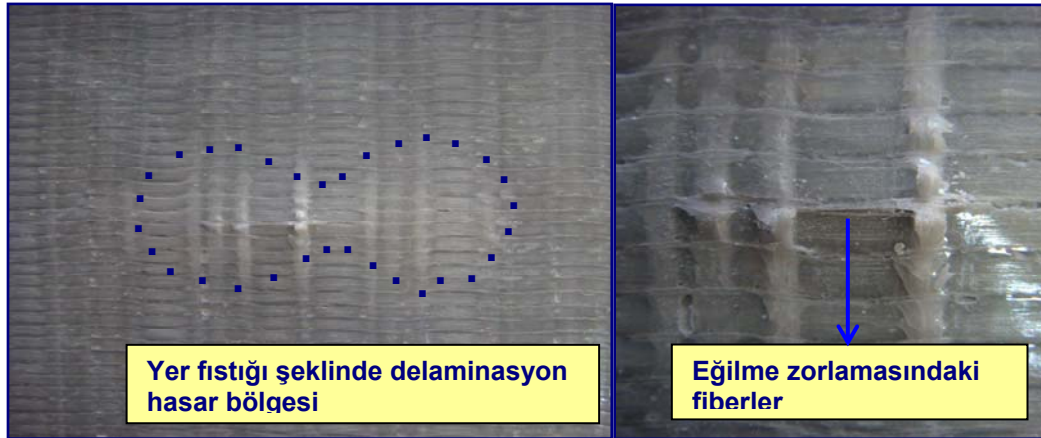
$E_d = 15$ J darbe enerjisi ile yapılan testte, Resim 4.4 ve Resim 4.5'de görüldüğü gibi numunenin ön yüzünde ilk fiber kırılması meydana gelmektedir. Bu kırılma kenar uzunlukları yaklaşık olarak 1 mm olan V

şeklindeki bir çentikten ibarettir. Kompozitin arka yüzünde ise; eğilmeye bağlı gerinme neticesinde fiberlerde kırılmaların meydana geldiği görülmektedir (Resim 4.6). Reçine ile fiber ara yüzün yapışma özelliğinin kaybolduğu buna bağlı olarak da delaminasyon, matris çatlakları ve kırılmaların meydana geldiği görülmektedir.

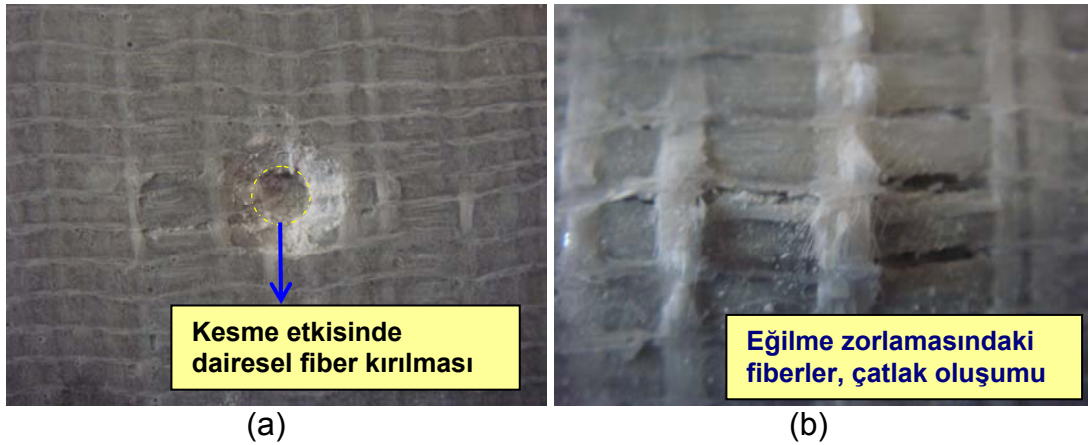


Resim 4.5. 4 mm E-Cam tek yönlü [90/0]₉ kompozitin 15 J ile darbe testi sonrası ön yüzünde meydana gelen hasar yapısı

$E_d = 20J$ darbe enerjisi ile yapılan testte, Resim 4.7'den de görüleceği gibi ön yüzde fiber kırık alanının genişlediği; arka yüzde ise eğilme altındaki fiberlerde gerinmenin iyice arttığı, fiber çatlak oluşumu ve gelişme aşamasının yaşandığı gözlemlenmiştir.

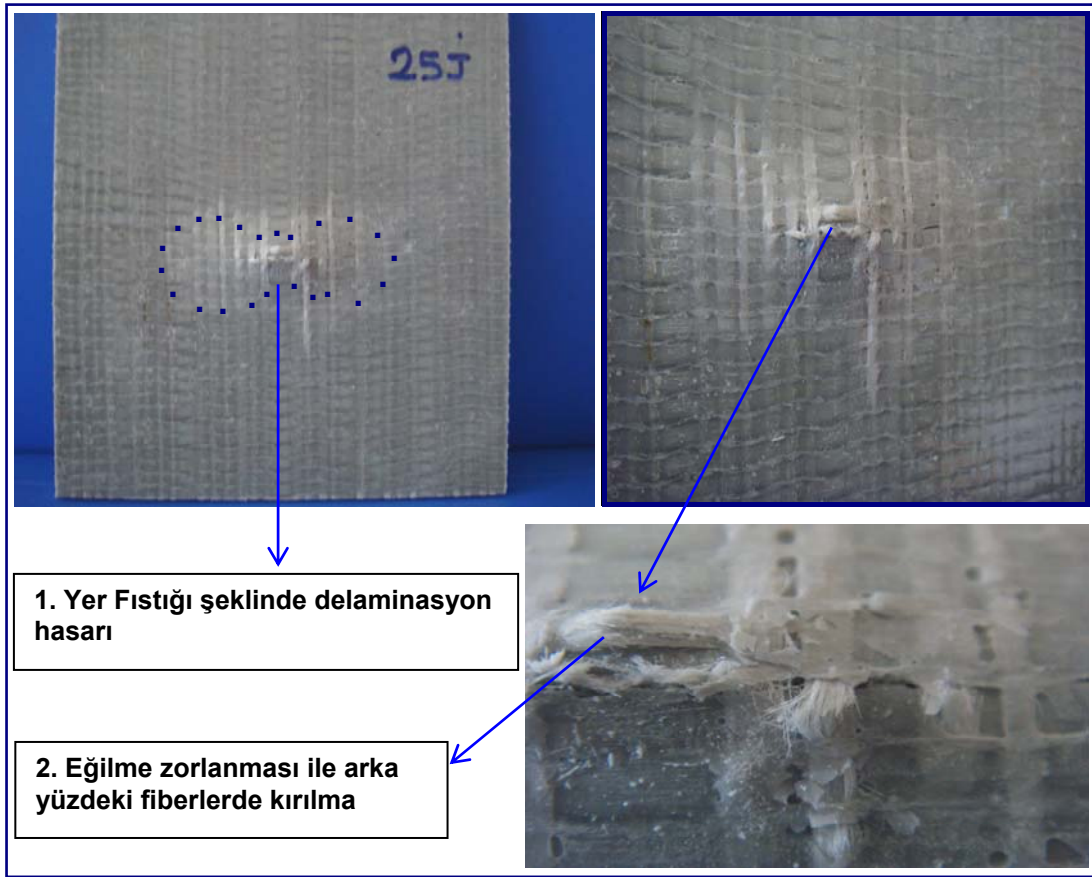


Resim 4.6. 4 mm E-Cam tek yönlü [90/0]₉ kompozitin 15 J darbe enerjisi ile ağırlık düşürme testine ait arka yüzünde oluşan hasar



Resim 4.7. 4 mm E-Cam tek yönlü kompozitin 20 J darbe enerjisi ile ağırlık düşürme testine ait, (a) ön yüzde (b) arka yüzde oluşan hasar

$E_d = 25 \text{ J}$, $E_d = 27,5 \text{ J}$ darbe enerjileri ile yapılan testlerde ön yüzde fiber kırılmasının görüldüğü hasar alanı çapı artan darbe enerjisiyle birlikte giderek artmıştır. Kompozit malzemenin arka yüzünde de yer fıstığı şeklinde görülen delaminasyon hasar alanı artan darbe enerjisi ile birlikte artmıştır. Daha düşük enerji seviyeleriyle yapılan darbe testlerinde arka yüzde eğilme gerilmelerinin etkisi altında fiberlerde gerinme, çatlak oluşumu ve gelişimi aşamaları etkili iken 25 J ve üzeri enerji yüklemesinde Resim 4.8'de de görüldüğü fiber kırılmaları meydana gelmiştir. Artan enerji ile birlikte fiber kırılmalarının etkili olduğu görülmektedir.



Resim 4.8. 4 mm E-Cam tek yönlü $[90/0]_9$ kompozitin 25 J ile darbe testi sonrası arka yüzünde meydana gelen hasar yapısı

E-Cam tek yönlü $[0/90]_9$ kompozitin ($t= 4,00$ mm) penetrasyon (kısmi nüfuziyet) karakterli ağırlık düşürme testleri

Ağırlık düşürme testlerinde, malzeme tarafından absorbe edilen enerjinin darbe enerjisine eşit olduğu eşik enerji değeri malzemenin penetrasyon enerjisi olarak ifade edilmektedir. Penetrasyon Eşik Enerjisi kompozit malzemenin karakterizasyonunda önemli bir parametredir.

30 J darbe enerjisi ile yapılan ağırlık düşürme testinde darbe enerjisinin tamamının malzeme tarafından absorbe edildiği görülmektedir. Darbe enerjisinin tamamının malzeme tarafından absorbe edildiği durum Penetrasyon Eşik Enerjisi ile ifade edilmektedir. 4 mm E-Cam tek yönlü $[90/0]_9$ kompozitin 30 J ile darbe testinde ön yüzünde meydana gelen

penetrasyon hasar yapısı incelendiğinde darbe ucunun malzemeye nüfuz etmesiyle birlikte malzemenin ön darbe yüzünden arka yüzüne doğru kalınlık boyunca kesme etkisinde gelişen fiber kırılmalarının meydana geldiği görülmektedir (Resim 4.9).



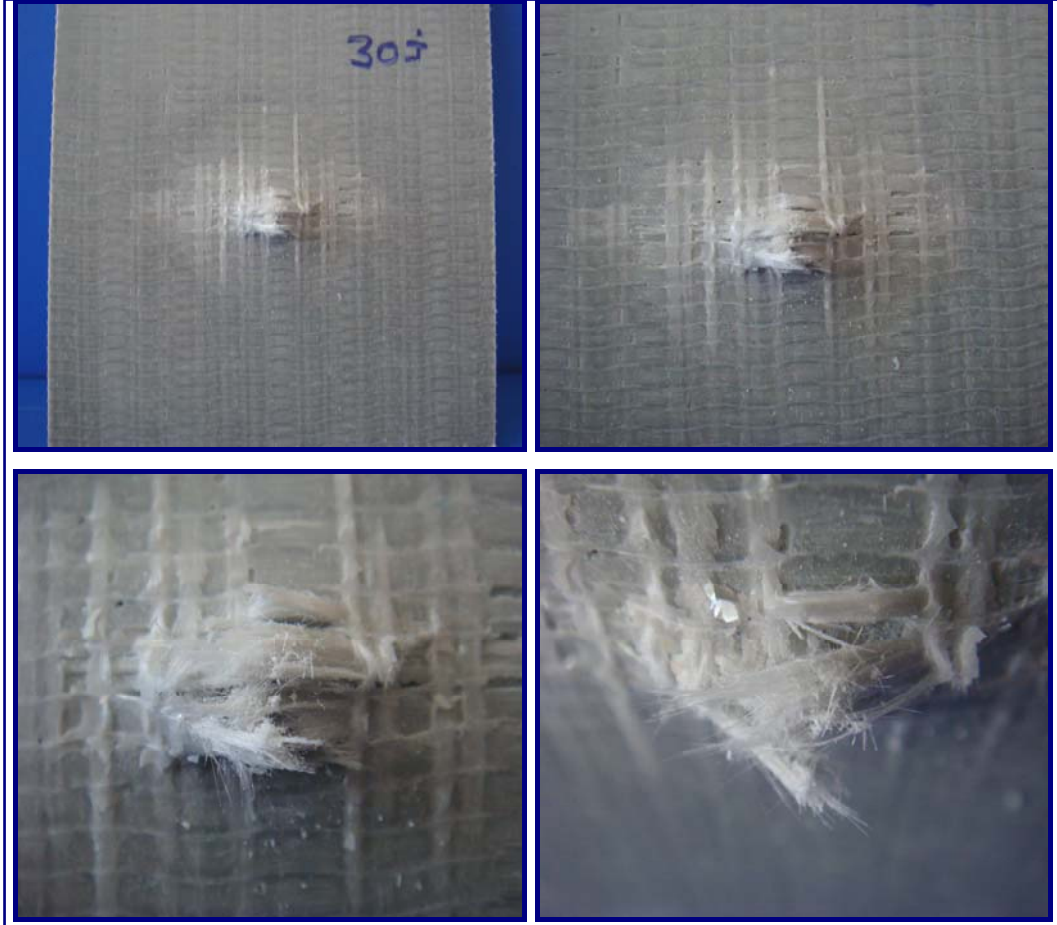
Resim 4.9. 4 mm E-Cam tek yönlü [90/0]₉ Kompozitin 30 J ile darbe testi sonrası ön yüzünde meydana gelen hasar yapısı

Ağırlık düşürme testinde darbe ucunun kompozit malzemeye penetrasyon sürecinde darbe ucu malzeme içerisine nüfuz ettiğinden darbe ön yüzündeki kırılma ile birlikte malzemenin arka yüzündeki fiberlerin kırılması da daha belirgin bir hal almaktadır. Resim 4.10'da görüldüğü gibi arka yüzde yer fıstığına benzer şekilde delaminasyon hasar alanı oluşmaktadır. Bununla birlikte darbe ucunun hemen altında kesme etkisiyle başlayan kırılma hasarını takip eden ve kompozitin arka yüzünde eğilme gerilmelerinin tesirinde meydana gelen fiber kırılmaları tespit edilmiştir.

Düşük hızlı darbe testlerinde kompozit malzemedeki meydana gelen penetrasyon hasarı ile ilgili tespit edilen hususlar şunlardır:

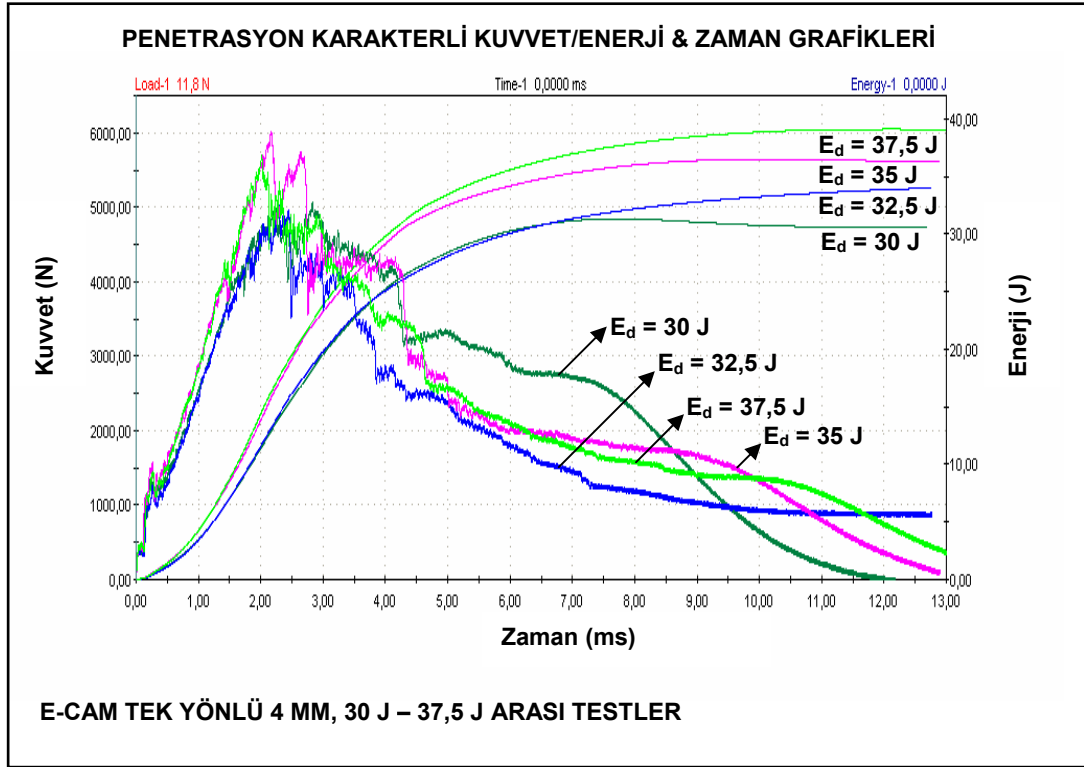
(1) Şekil 4.19'da verilen [30-37,5] J darbe enerjisi aralığında yer alan enerji & zaman grafikleri incelendiğinde penetrasyon eşik enerjisi, $E_{pen} = 30$ J ile

yapılan testte malzeme tarafından absorbe edilen enerjinin darbe enerjisine eşit olduğu görülmektedir.



Resim 4.10. 4 mm E-Cam tek yönlü $[90/0]_9$ kompozitin 30 J ile darbe testi sonrası arka yüzünde meydana gelen hasar yapısı

Penetrasyon eşik enerjisinin üstünde, 32,5 J ile 37,5 J darbe enerji aralığında yapılan testlerden de aynı sonuç alınmıştır. Geri sekme karakterli ağırlık düşürme testlerinde enerji & zaman grafikleri incelendiğinde darbe sürecinde enerji maksimum değerine ulaştıktan sonra düşüş göstermektedir. Penetrasyon karakterli ağırlık düşürme testlerinde ise darbe sonunda malzeme tarafından absorbe edilen enerji maksimum değerine ulaşmakta ve başlangıç darbe enerjisine eşit seviyeye gelmektedir (Şekil 4.19).

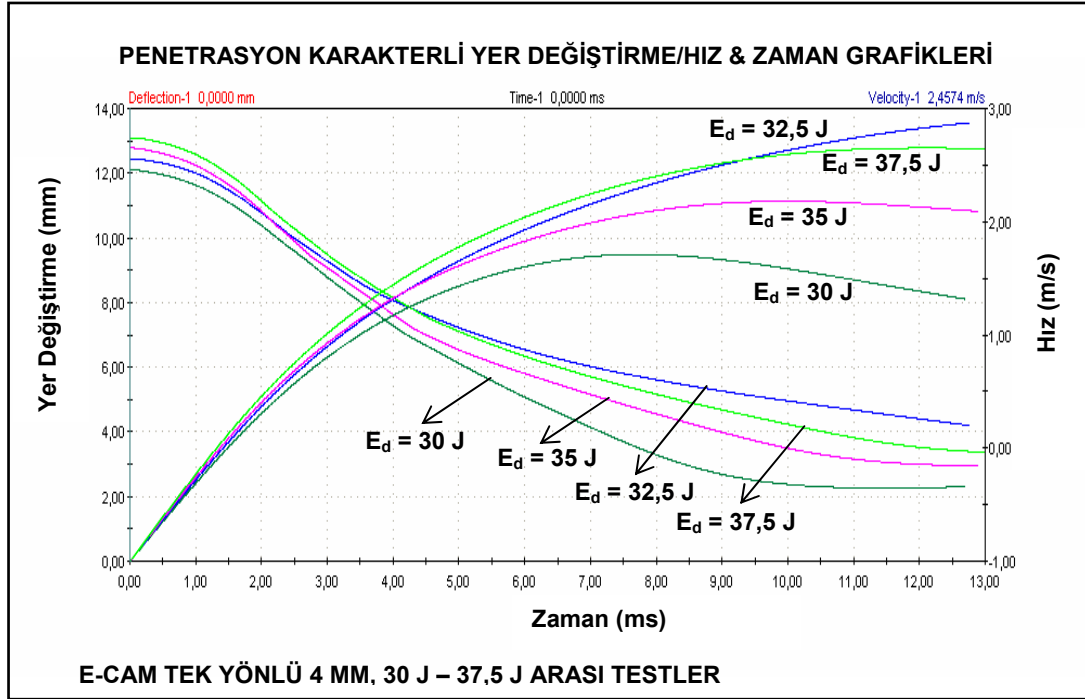


Şekil 4.19. 4 mm kalınlığındaki E-Cam tek yönlü kompozitin 30 - 37,5 J enerji ile ağırlık düşürme testlerine ait kuvvet/enerji & zaman grafikleri

(2) $E_d = 30$ J ve $E_d = 32,5$ J enerjileri ile yapılan testlerde $F_H = 1370,5$ N ve $F_H = 1241,8$ N bulunmuştur. Bu değerler geri sekme durumuna ait olan daha düşük enerji seviyelerindeki testlerde elde edilen Hertz Kuvveti değerleri ile uyumludur. Ancak $E_d = 35$ J ve $E_d = 37,5$ J enerjileri ile yapılan testlerde Hertz Kuvvetleri, $F_H = 1582,3$ N ve $F_H = 1451,2$ N bulunmuştur.

(3) Şekil 4.20' deki yer değiştirme/hız & zaman grafikleri incelendiğinde penetrasyon durumunda $E_d = 32,5$ J enerji ile yapılan testin haricinde hızın negatif değerler aldığı ve yer değiştirmelerde yine $E_d = 32,5$ J ile testin haricinde maksimum yer değiştirmeye ulaşıldıktan sonra bir miktar azalmanın görüldüğü yani küçük de olsa geri sekme yaşandığı tespit edilmiştir.

(4) Artan darbe enerjisine bağlı olarak darbe ucunun kompozit malzeme içerisindeki penetrasyon derinliğinin de arttığı görülmüştür.



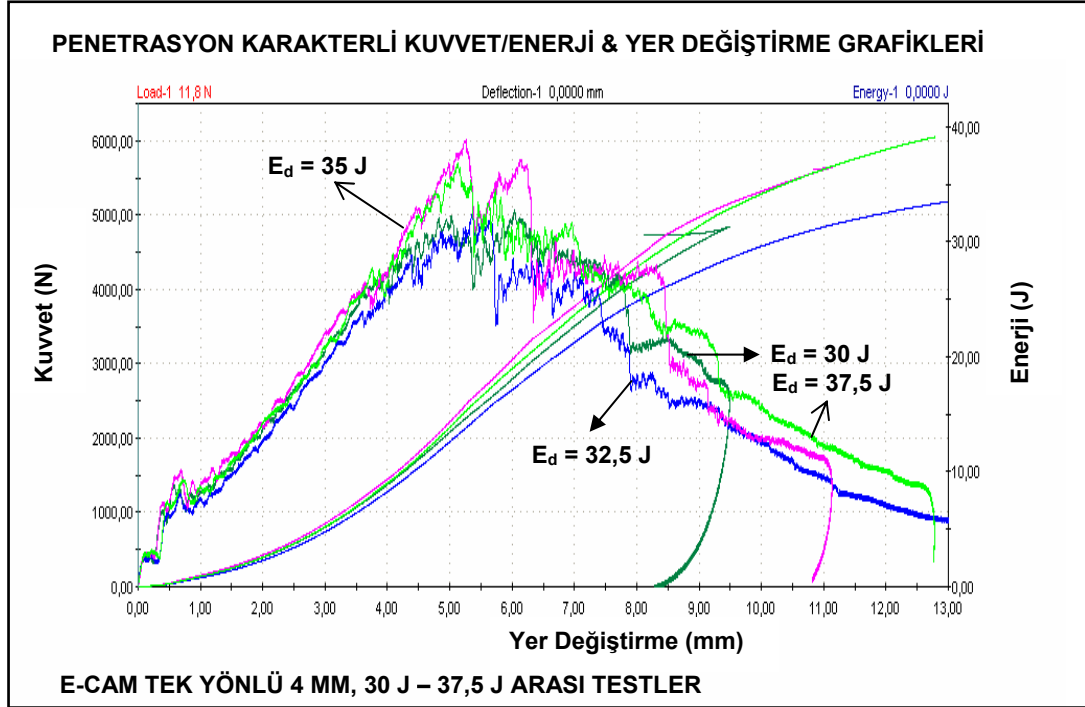
Şekil 4.20. 4 mm kalınlığındaki E-Cam tek yönlü kompozitin 30-37,5 J enerji ile ağırlık düşürme testlerine ait yer değiştirme/hız & zaman grafikleri

Penetrasyon (kısmi nüfuziyet) karakterli ağırlık düşürme testlerinde kuvvet - enerji ve hasar mekanizmaları ilişkisi

Penetrasyon ile sonuçlanan düşük hızlı darbe testlerine ($E_d = [30-37,5]$ J) ait kuvvet/enerji & yer değiştirme grafikleri Şekil 4.21'de, penetrasyon karakterli ağırlık düşürme testlerine ilişkin kritik kuvvet, enerji, hasar değerleri Çizelge 4.15'de, kompozitin ön ve arka yüzlerinde oluşan hasar yapısı Çizelge 4.16'da, hasar fotoğrafları ise Resim 4.11'de görülmektedir.

Artan darbe enerjisi ile birlikte penetrasyon derinliği ve kırılmaya maruz kalan fiber yüzey alanı da artmaktadır. Kompozitin arka yüzündeki fiber kırılma alanı enerjinin artmasına bağlı olarak genişlemektedir (Resim 4.11). 30-37,5 J enerji aralığında yapılan testlerden de açık olarak anlaşılacağı gibi kompozit içerisinde delaminasyon hasar yapısını fiber kırılması takip etmekte ve belli bir enerji değerinden sonra artan enerji seviyesinin delaminasyon

hasarının daha fazla gelişmesinde etkili olmadığı, ancak fiberlerde kırılma gelişiminin artarak devam ettiği görülmektedir.



Şekil 4.21. 4 mm kalınlığındaki E-Cam tek yönlü kompozitin 30 - 37,5 J enerji ile ağırlık düşürme testlerine ait kuvvet/enerji & yer değiştirme grafikleri

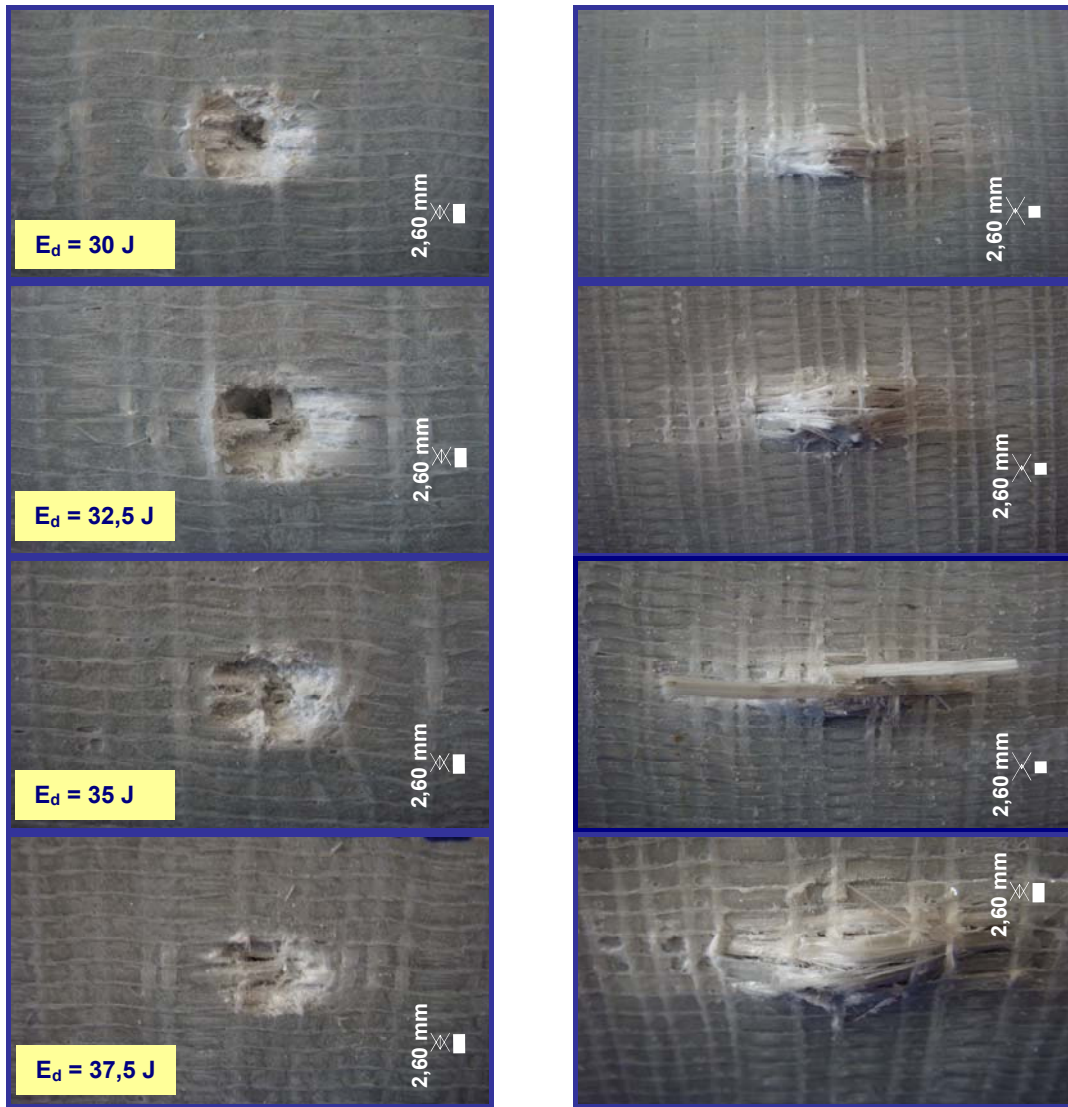
Çizelge 4.15. 4 mm E-Cam tek yönlü kompozitin [30–37,5] J darbe enerjisi aralığında penetrasyon karakterli darbe sonuçları

PENETRASYON KARAKTERLİ DARBE SONUÇLARI				
E_d (J)	30	32,5	35	37,5
F_{max} (N)	5064,5	5020,4	6011,5	5693,5
$E(F_{max})$ (J)	18,249	14,375	15,835	14,599
E_a (J)	30,005	32,501	35,103	37,507
F_h (N)	1370,5	1241,8	1582,3	1451,2
E_h (J)	0,3765	0,4117	0,5758	0,5258
Matris ezilme çapı (mm)	10	10	10	10
Delaminasyon uzunluğu (mm) l_{dlm}	45	42	42	42
Delaminasyon genişliği (mm) w_{dlm}	25	25	25	25

Çizelge 4.16. 4 mm E-Cam tek yönlü kompozitin [30-37,5] J darbe enerjisi aralığında penetrasyon karakterli darbe hasar yapısı

Darbe Enerjisi (J)	PENETRASYON KARAKTERLİ DARBE HASAR YAPISI	
	ÖN YÜZ	ARKA YÜZ
30	<ol style="list-style-type: none"> 1. Matris yapıda delaminasyon ve kırılma gelişimi 2. Lokal basma gerilmeleri altında 10 mm çapında bir alanda matris yapıda ezilme, delaminasyon ve kırılma 3. 4 mm çapında dairesel kesme şeklinde fiber kırılması 4. Penetrasyon derinliği: 3 mm 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Eğilme gerilmeleri altında fiberlerde 15 mm X 10 mm.lik alanda kırılma 2. Yüzeyde yer fıstığı şekline benzer artan delaminasyon hasar alanı 3. $I_{dlm} = 45$ mm, $w_{dlm} = 25$ mm
32,5	<ol style="list-style-type: none"> 1. Matris yapıda delaminasyon ve kırılma gelişimi 2. Lokal basma gerilmeleri altında 10 mm çapında bir alanda matris yapıda ezilme, delaminasyon ve kırılma 3. 6 mm çapında dairesel kesme şeklinde fiber kırılması 4. Penetrasyon derinliği: 3,2 mm 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Eğilme gerilmeleri altında fiberlerde 20 mm X 10 mm.lik alanda kırılma 2. Yüzeyde yer fıstığı şekline benzer artan delaminasyon hasar alanı 3. $I_{dlm} = 42$mm, $w_{dlm} = 25$ mm
35	<ol style="list-style-type: none"> 1. Matris yapıda delaminasyon ve kırılma gelişimi 2. Lokal basma gerilmeleri altında 10 mm çapında bir alanda matris yapıda ezilme, delaminasyon ve kırılma 3. 6 mm çapında dairesel kesme şeklinde fiber kırılması 4. Penetrasyon derinliği : 3,2 mm 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Eğilme gerilmeleri altında fiberlerde 25 mm X 10 mm lik alanda kırılma 2. Yüzeyde yer fıstığı şekline benzer artan delaminasyon hasar alanı 3. $I_{dlm} = 42$ mm, $w_{dlm} = 25$ mm
37,5	<ol style="list-style-type: none"> 1. Matris yapıda delaminasyon ve kırılma gelişimi 2. Lokal basma gerilmeleri altında 10 mm çapında bir alanda matris yapıda ezilme, delaminasyon ve kırılma 3. 6 mm çapında dairesel kesme şeklinde fiber kırılması 4. Penetrasyon derinliği : 3,2 mm 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Eğilme gerilmeleri altında fiberlerde 25 mm X 10 mm.lik alanda kırılma 2. Yüzeyde yer fıstığı şekline benzer artan delaminasyon hasar alanı 3. $I_{dlm} = 42$ mm, $w_{dlm} = 25$ mm

Penetrasyonla sonuçlanan ağırlık düşürme testlerinde; kompozit malzemedeki maksimum kuvvet, Hertz kuvveti ve Hertz Hasar enerjileri Çizelge 4.17’de görülmektedir. Dört farklı enerjide yapılan testlerin ortalaması



Resim 4.11. 4 mm E-Cam tek yönlü $[90/0]_9$ kompozitin 30 J - 37,5 J enerji ile penetrasyon durumuna ait ön ve arka yüzlerinde oluşan hasar

Çizelge 4.17. 4 mm E-Cam tek yönlü kompozitin $[30-37,5]$ J arası darbe testlerinde bulunan kritik kuvvet değerleri

Darbe Enerjisi E_d (J)	Maksimum Kuvvet F_{max} (N)	Hertz Kuvveti F_H (N)	Hertz Hasar Enerjisi E_H (J)
30	5064,5	1370,5	0,3765
32,5	5020,4	1241,8	0,4117
35	6011,5	1582,3	0,5758
37,5	5693,5	1451,2	0,5258
ORTALAMA	5447,48	1411,5	0,4725

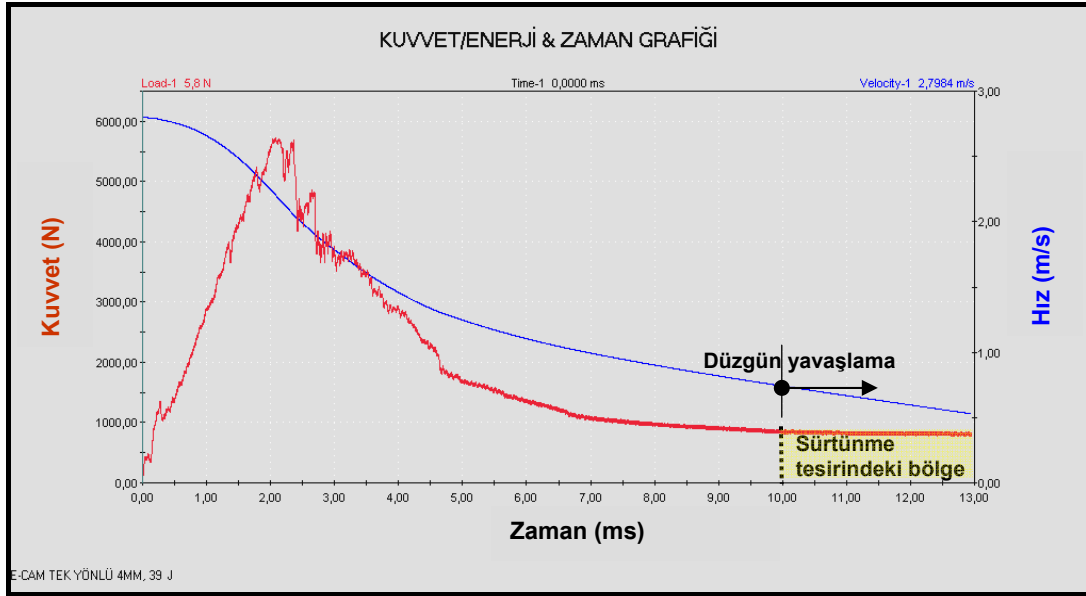
Çizelge 4.17'de son satırda yer almaktadır. Penetrasyon karakterli darbe testleri ile geri sekme karakterli darbe testleri karşılaştırıldığında ortalama maksimum kuvvet, Hertz kuvveti ve Hertz hasar enerjisi değerlerinin birbirine oldukça yakın olduğu görülmektedir.

E-Cam tek yönlü [0/90]₉ kompozitin (t= 4,00 mm) perforasyon (tam nüfuziyet) karakterli ağırlık düşürme testleri

Balistikte perforasyon; hedefin tam olarak delinmesi, merminin hedef içerisine tam olarak nüfuz etmesi anlamını taşımaktadır. Bu anlamda perforasyon tam penetrasyon demektir. 39 J darbe enerjisi ile yapılan testte kompozit malzeme tamamen penetrasyona uğramış yani perforasyon diye tabir edilen tam delinme hadisesi gerçekleşmiştir. Perforasyonun gerçekleştiği bu testte ters yönde yer değiştirme yani geri sekme yaşanmamıştır. Perforasyon eşik enerjisi, perforasyonla sonuçlanan testlerde malzeme tarafından absorbe edilen enerji değerlerinin ortalamasının alınmasıyla bulunur.

Şekil 4.22'deki kuvvet & zaman grafiği teste ilişkin analiz sonuçları ile birlikte incelendiğinde Hertz kuvvetinin daha düşük enerjili testlerdeki değere oldukça yakın olduğu ($F_H = 1354,4 \text{ N}$) görülmektedir. Hertz hasarına karşılık gelen Hertz kuvveti değerlerinin birbirlerine bu kadar yakın olması, Hertz kuvvetinin malzemeye özgün bir özellik olduğunu ortaya koymaktadır..

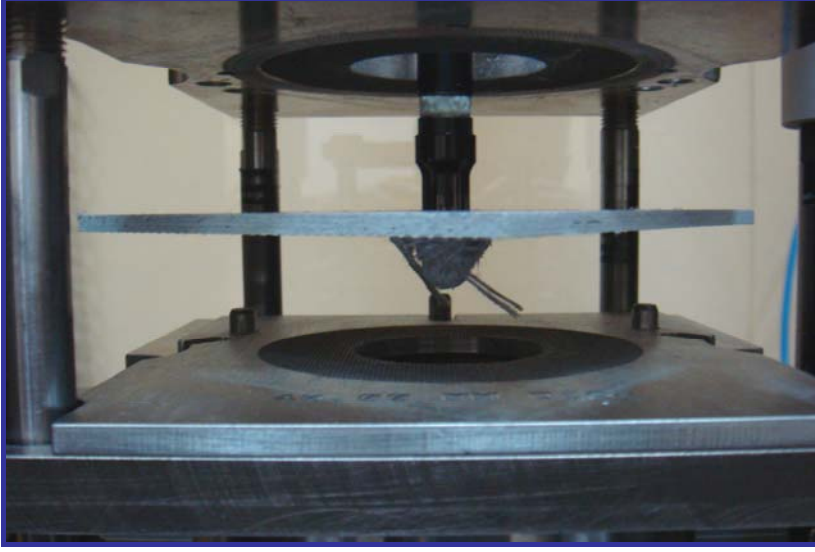
Şekil 4.22'de yer alan kuvvet & zaman grafiği incelendiğinde kuvvetin düşüşe geçtikten sonra oldukça geniş bir aralıkta sabit kaldığı görülmektedir. Kuvvetin sabit kaldığı bu bölge, sabit sürtünme kuvvetleri etkisi altında darbe ucunun malzeme içindeki düzgün yavaşlama hareketine aittir. Düzgün yavaşlama hareketinin hakim olduğu söz konusu bölge sürtünme tesirindeki bölge olarak adlandırılmıştır. Şekil 4.22'deki hız zaman grafiği incelendiğinde; kuvvetin yaklaşık olarak sabit kaldığı aralık başlangıcı olan $t = 10 \text{ ms}$ 'den sonra hızın tam anlamıyla, sabit sürtünme kuvvetlerinin etkisi altında düzgün yavaşladığı görülmektedir.



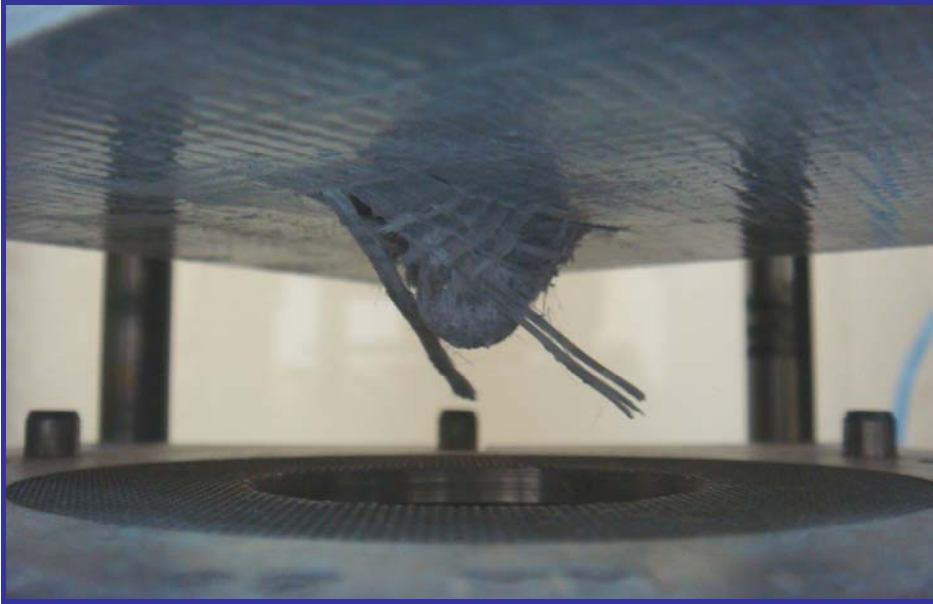
Şekil 4.22. 4 mm kalınlığındaki E-Cam tek yönlü Kompozitin 39 J enerji ile ağırlık düşürme testine ait kuvvet/hız & zaman grafikleri

Kompozit malzemenin perforasyon enerjisi, esasında test sisteminde hesaplanan E_a enerjisinden daha küçüktür. Kompozit malzemeye ait perforasyon enerjisi; sistem tarafından hesaplanan enerjiden sürtünme tesirindeki bölgede kuvvet & yer değiştirme grafiği altında kalan alanın çıkarılmasıyla hesaplanmalıdır.

Resim 4.12 ve Resim 4.13'de 39 J enerji ile perforasyona uğramış kompozitin hemen ağırlık düşürme sonrasındaki fotoğrafları görülmektedir. Resim 4.12 ve Resim 4.13'deki perforasyon fotoğrafları Resim 4.14 ve Resim 4.15 ile birlikte dikkatle incelendiğinde kompozit malzemenin ön yüzünde 10 mm çapındaki darbe ucunun çapına eşit büyüklükteki bir alanda fiberlerde kesme sonucu kopma oluştuğu, ancak söz konusu fiber kopmasının kalınlık boyunca devam etmediği, kompozitin arka yüzündeki fiberlerde oldukça büyük genleme altında fiber kırılmalarının meydana geldiği görülmektedir. Perforasyonla sonuçlanan testlerde darbe ucunun kompozit malzemede tam nüfuziyet oluşturduğu, dolayısıyla malzemenin delindiği açıkça görülmektedir.



Resim 4.12. 4 mm E-Cam tek yönlü $[90/0]_9$ kompozitin 39 J enerji ile perforasyonu (Ağırlık düşürme test düzeneği fotoğrafı)



Resim 4.13. 4 mm E-Cam tek yönlü $[90/0]_9$ kompozitin 39 J enerji ile perforasyonu (Kompozit arka yüz hasar görüntüsü)

Perforasyon hasar yapısında kompozitin ön yüzünden bakıldığında arka taraftaki ışık görülmektedir. Arka tarafta oluşan şiddetli fiber kırılmalarına rağmen fiberlerin malzeme yüzeyinden tamamen kopup ayrılaşmadığı da dikkati çekmektedir (Resim 4.15).



Resim 4.14. 4 mm E-Cam tek yönlü [90/0]₉ kompozitin 39 J ile darbe testi sonrası ön yüzünde oluşan perforasyon hasarı

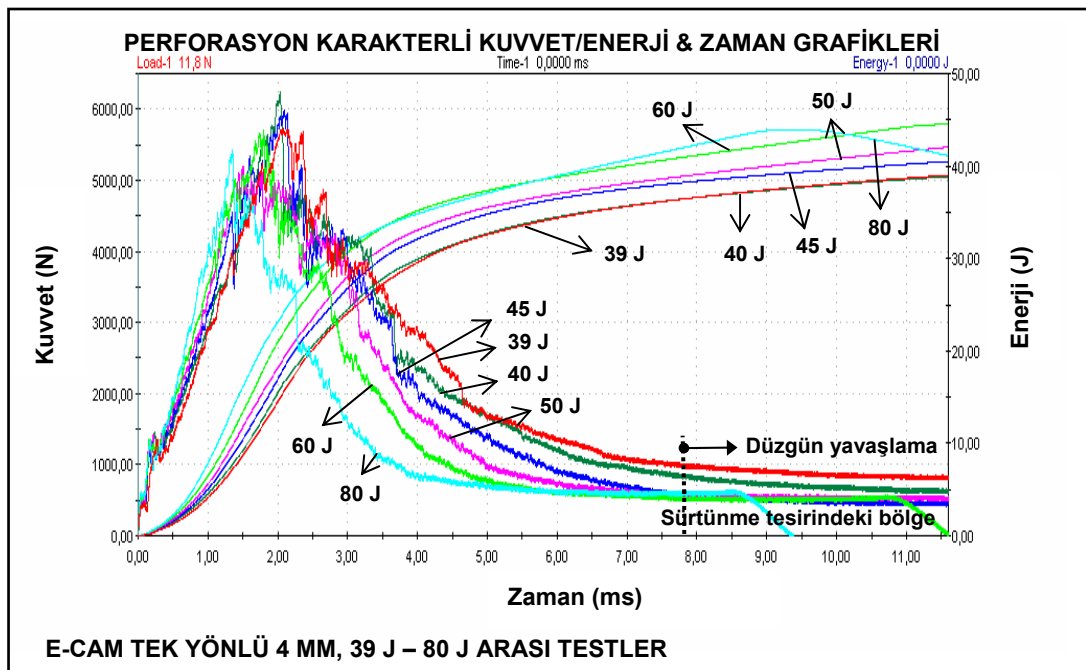


Resim 4.15. 4 mm E-Cam tek yönlü [90/0]₉ kompozitin 39 J ile darbe testi sonrası arka yüzünde oluşan perforasyon hasarı

Kompozit malzemenin perforasyon hasar yapısında önemli birkaç nokta dikkat çekmektedir:

(1) Şekil 4.23'deki kuvvet & zaman grafikleri incelendiğinde; kuvvetin maksimum değerinden başlayarak düşüş gösterdiği kısımda belli bir noktadan sonra sabit bir değere ulaştığı görülmektedir. Kuvvetin sabitlendiği

alan sürtünme tesirindeki bölge olarak adlandırılmıştır. Kuvvetin sabit kaldığı bu süreçte darbe ucu malzeme içerisinde perforasyon sonrası hareketine devam etmektedir. Bu bölgede darbe ucu çevresi ile malzemede oluşan delik yüzeyi arasında oluşan sürtünme kuvvetleri etkindir. Yaklaşık olarak sabit olan sürtünme kuvvetlerinin tesiri altında hareket eden darbe ucunun hızı düzgün olarak azalmaktadır.



Şekil 4.23. 4 mm kalınlığındaki E-Cam tek yönlü kompozitin 39-80 J enerji aralığında ağırlık düşürme testlerine ait kuvvet/enerji & zaman grafikleri

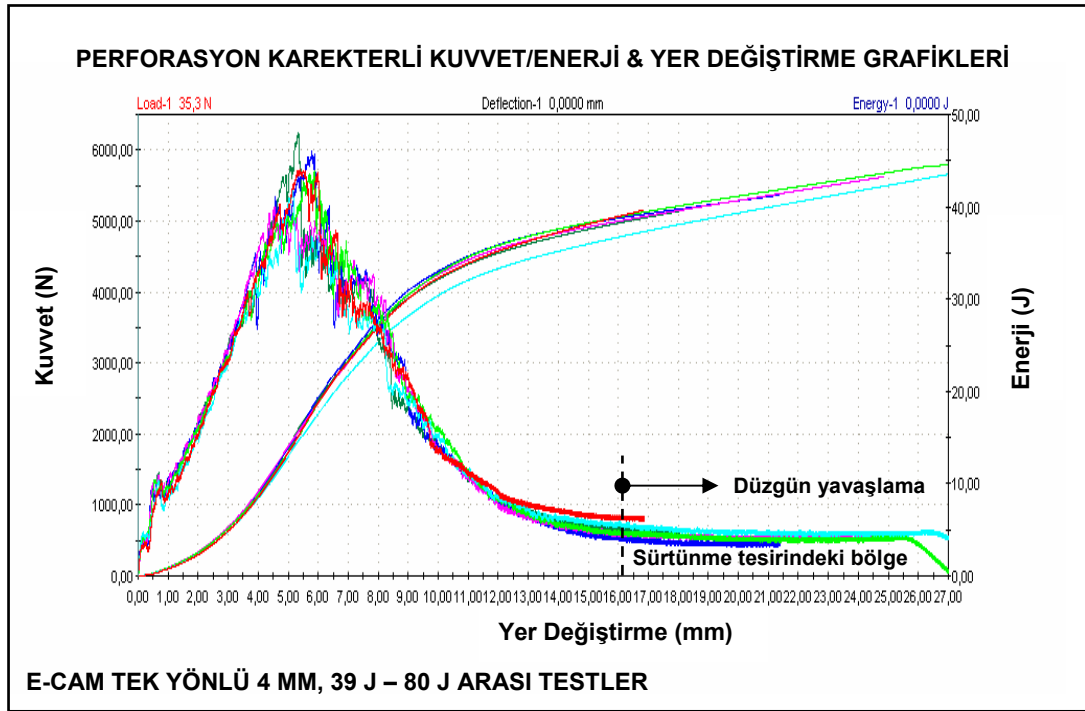
(2) Hızdaki düzensün azalma hareket yönüne ters yönde etki eden sabit bir kuvvet altında olmalıdır ki bu kuvvet, sürtünme kuvvetidir.

(3) Şekil 4.23'de verilen enerji & zaman grafikleri incelendiğinde enerjinin zaman içerisinde sürekli arttığı gözlemlenmektedir. Ağırlık düşürme test sistemi tarafından hesaplanan toplam enerji değerinin içerisinde malzemenin perforasyonunu sağlayacak enerji ile birlikte perforasyon sırasında etkili olan sürtünme kuvvetlerine karşı yapılan iş de bulunmaktadır. Dolayısıyla

perforasyon enerjisini hesaplamak için sistemin hesaplamış olduğu toplam enerjiden sürtünme ile harcanan enerjiyi çıkarmak gerekmektedir. Perforasyon enerjisini aşağıdaki formülle ifade etmek mümkündür.

$$E_{\text{per}} = E_t - W_{\text{sür}} \quad (4.1)$$

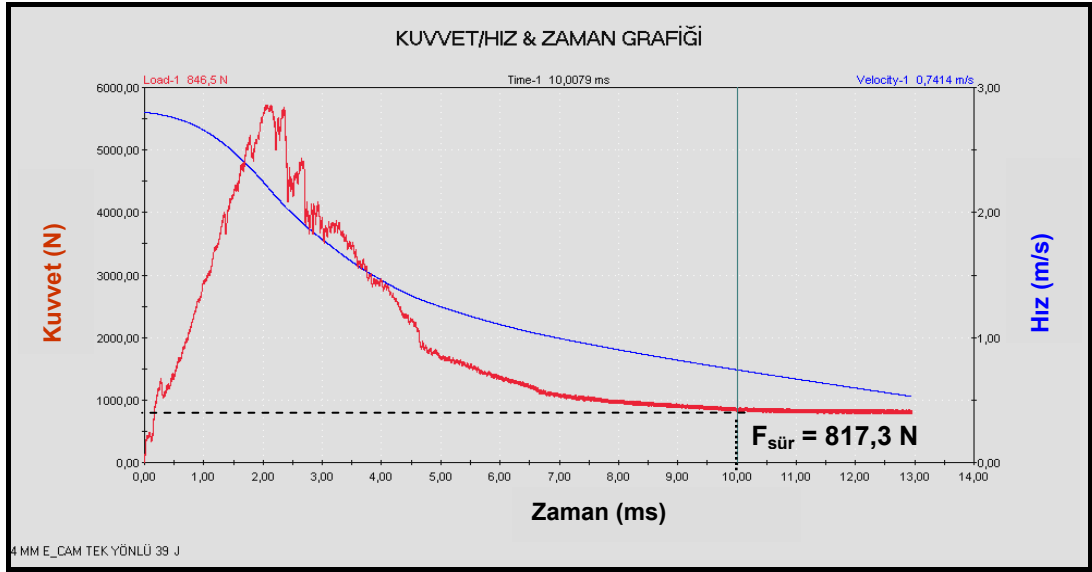
Bu eşitlikte yer alan E_{per} , kompozit malzemenin perforasyon enerjisini, E_t , test sistemi yazılımı ile hesaplanan kuvvet & yer değiştirme grafiği altındaki alanı ifade etmektedir. Eş. 4.1'de tanımlanan sürtünme kuvvetlerine karşı yapılan iş, $W_{\text{sür}}$ Şekil 4.24'de verilen kuvvet & yer değiştirme grafiğinde sürtünme tesirindeki bölge olarak gösterilen ve grafik altında kalan alanla hesaplanabilir.



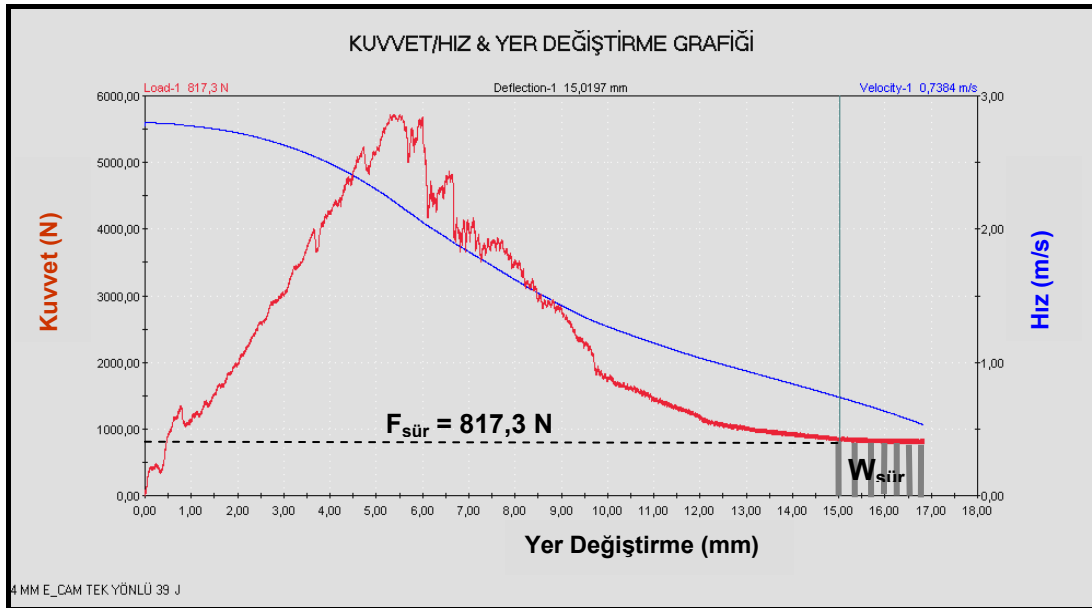
Şekil 4.24. 4 mm kalınlığındaki E-Cam tek yönlü kompozitin 39-80 J enerji aralığında ağırlık düşürme testlerine ait kuvvet/enerji & yer değiştirme grafikleri

39 J darbe enerjisi ile yapılan teste ait Şekil 4.25'de verilen kuvvet ve hız grafikleri incelendiğinde, $t = 10$ ms civarında kuvvetin 817,3 N büyüklüğünde

sabit bir değere ulaştığı, bu noktadan sonra hızın düzgün olarak azaldığı görülmektedir. Şekil 4.26'da kuvvetin sabit kaldığı 817,3 N değerindeki noktadan sonra kuvvet & yer değiştirme grafiğinin altında kalan taralı alan sürtünme kuvvetine karşı yapılan işi göstermektedir.



Şekil 4.25. 4 mm kalınlığındaki E-Cam tek yönlü kompozitin 39 J enerji ile ağırlık düşürme testine ait kuvvet/hız & zaman grafikleri



Şekil 4.26. 4 mm kalınlığındaki E-Cam tek yönlü kompozitin 39 J enerji ile ağırlık düşürme testine ait kuvvet/hız & yer değiştirme grafikleri

Perforasyonla sonuçlanan ağırlık düşürme testlerinde sürtünme tesirindeki bölgelere ait sürtünme işi hesaplarına (kuvvet & yer değiştirme grafiği altında kalan alan) ait sonuçlar Çizelge 4.18'de verilmiştir. Çizelge 4.18'de bulunan sürtünmeye bağlı iş değerleri Eş. 4.1'de yerine konularak perforasyon oluşturan her bir darbe enerjisi için perforasyon enerjisi bulunmuştur. Bu şekilde hesaplanan perforasyon enerjileri Çizelge 4.19'da verilmiştir.

Çizelge 4.18. 4 mm E-Cam tek yönlü kompozitin 39 J - 80 J darbe enerjisi aralığında, sürtünmeye bağlı iş hesabı

Darbe Enerjisi (J)	39	40	45	50	60	80
Sürtünme Kuvveti (N)	817,3	611,4	452,1	544,5	538,7	618,8
Sürtünme Altındaki Yer Değiştirme (mm)	1,85	1,68	3,46	7,77	8,57	9,24
Sürtünmeye Bağlı İş W _{sür} (J)	1,51	1,03	1,56	4,23	4,62	5,72

Çizelge 4.19. 4 mm E-Cam tek yönlü kompozitin 39 J - 80 J enerji aralığında perforasyonla absorbe edilen enerji değerleri

Darbe Enerjisi E _d (J)	39	40	45	50	60	80
Hesaplanan Enerji E _t (J)	39,04	39,55	41,27	43,28	44,51	43,98
Sürtünme İş W _{sür} (J)	1,51	1,03	1,56	4,23	4,62	5,72
Absorbe Edilen Enerji, [E _{per} = E _a] (J)	37,53	38,52	39,71	39,05	39,89	38,26

4 mm kalınlığındaki E-Cam tek yönlü kompozitin perforasyon eşik enerjisi, [39-80] J aralığındaki test sonuçlarının ortalamasını almak suretiyle hesaplandığında, E_{per} = 38,82 J bulunmuştur.

Perforasyon (tam nüfuziyet) karakterli ağırlık düşürme testlerinde kuvvet - enerji ve hasar mekanizmaları ilişkisi

Perforasyon ile sonuçlanan düşük hızlı darbe testlerine (E_d= [39-80] J) ait kritik kuvvet, enerji ve hasar büyüklüğü değerleri Çizelge 4.20'de verilmiştir.

Çizelge 4.20. 4 mm E-Cam tek yönlü kompozitin [39-80] J darbe enerjisi aralığında perforasyon karakterli darbe sonuçları

PERFORASYON KARAKTERLİ DARBE SONUÇLARI						
E_d (J)	39	40	45	50	60	80
F_{max} (N)	5721,3	6249,1	5995,2	5193,3	5696,8	5423,5
$E(F_{max})$ (J)	15,497	15,961	18,205	11,764	18,046	13,722
E_a (J)	39,044	39,546	41,275	43,277	44,508	43,975
F_h (N)	1354,4	1422,6	1368,1	1411,0	1352,5	1354,4
E_h (J)	0,5314	0,5234	0,4551	0,5014	0,4174	0,505
Matris ezilme çapı (mm)	10	10	10	10	10	10
Delaminasyon uzunluğu (mm) l_{dlm}	42	42	42	42	42	45
Delaminasyon genişliği (mm) w_{dlm}	25	25	25	25	25	25

Kompozit malzemedeki maksimum kuvvet, Hertz kuvveti ve Hertz hasar enerjilerine ait ortalama değerler Çizelge 4.21’de görülmektedir. Perforasyon karakterli darbe testleri, daha düşük enerjili diğer darbe testleri ile karşılaştırıldığında ortalama Hertz kuvveti ve ortalama Hertz hasar enerjisi değerlerinin birbirlerine oldukça yakın olduğu anlaşılmaktadır. Perforasyonla sonuçlanan testlere ait ortalama maksimum kuvvet değerleri penetrasyonla sonuçlanan testlere yakın iken geri sekme özellikli testlere nazaran % 10 mertebesinde daha büyük çıkmıştır.

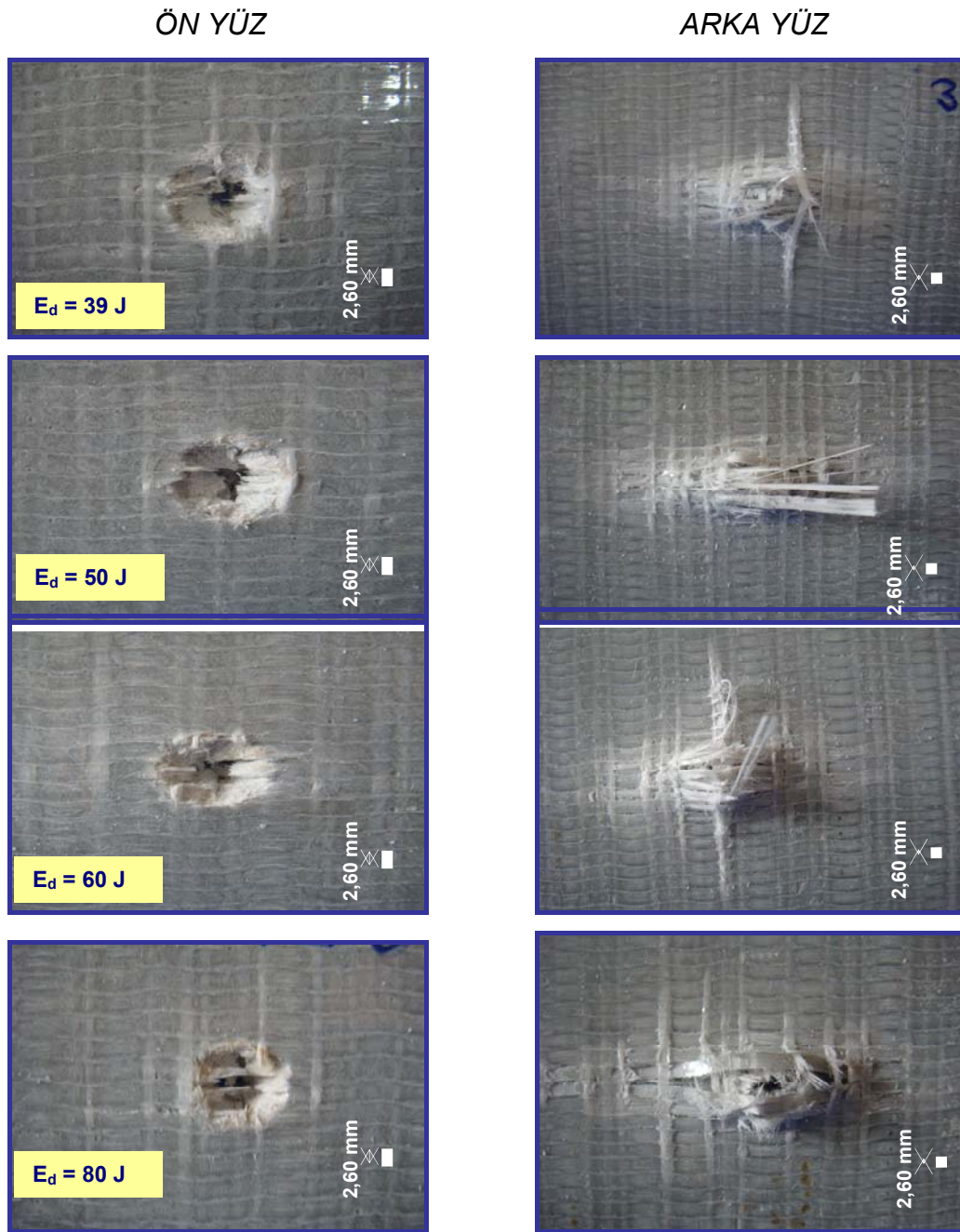
Çizelge 4.21. 4 mm E-Cam tek yönlü kompozitin [39-80] J enerji arası darbe testlerinde bulunan kritik kuvvet değerleri

Darbe Enerjisi E_d (J)	Maksimum Kuvvet F_{max} (N)	Hertz Kuvveti F_H (N)	Hertz Hasar Enerjisi E_H (J)
39	5721,3	1354,4	0,5314
40	6249,1	1422,6	0,5234
45	5995,2	1368,1	0,4551
50	5193,3	1411,0	0,5014
60	5696,8	1352,5	0,4174
80	5423,5	1354,4	0,5050
ORTALAMA	5713,2	1377,2	0,4889

Kompozit malzemenin ön ve arka yüzlerinde oluşan hasar yapısı Çizelge 4.22’de, hasar fotoğrafları ise Resim 4.16’da görülmektedir.

Çizelge 4.22. 4 mm E-Cam tek yönlü kompozitin [39-80] J enerji aralığında perforasyon karakterli darbe hasar yapısı

Darbe Enerjisi (J)	PERFORASYON KARAKTERLİ DARBE HASAR YAPISI	
	ÖN YÜZ	ARKA YÜZ
39	<ol style="list-style-type: none"> 1. Matris yapıda delaminasyon ve kırılma gelişimi 2. Ön yüzde 10 mm çapında dairesel kesme şeklinde fiber kırılması 3. Kalınlık boyunca tam delinme 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Eğilme gerilmeleri altında fiberlerde 18 mm X 12 mm.lik alanda kırılma 2. Yüzeyde yer fıstığı şeklinde 42 mm X 25 mm delaminasyon hasar alanı
45	<ol style="list-style-type: none"> 1. Matris yapıda delaminasyon ve kırılma gelişimi 2. Ön yüzde 10 mm çapında dairesel kesme şeklinde fiber kırılması 3. Kalınlık boyunca tam delinme 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Eğilme gerilmeleri altında fiberlerde 25 mm X 12 mm.lik alanda kırılma 2. Yüzeyde yer fıstığı şeklinde 42 mm X 25 mm delaminasyon hasar alanı
50	<ol style="list-style-type: none"> 1. Matris yapıda delaminasyon ve kırılma gelişimi 2. Ön yüzde 10 mm çapında dairesel kesme şeklinde fiber kırılması 3. Kalınlık boyunca tam delinme 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Eğilme gerilmeleri altında fiberlerde 25 mm X 12 mm.lik alanda kırılma 2. Yüzeyde yer fıstığı şeklinde 42 mm X 25 mm delaminasyon hasar alanı
60	<ol style="list-style-type: none"> 1. Matris yapıda delaminasyon ve kırılma gelişimi 2. Ön yüzde 10 mm çapında dairesel kesme şeklinde fiber kırılması 3. Kalınlık boyunca tam delinme 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Eğilme gerilmeleri altında fiberlerde 25 mm X 12 mm.lik alanda kırılma 2. Yüzeyde yer fıstığı şeklinde 42 mm X 25 mm delaminasyon hasar alanı
80	<ol style="list-style-type: none"> 1. Matris yapıda delaminasyon ve kırılma gelişimi 2. Ön yüzde 10 mm çapında dairesel kesme şeklinde fiber kırılması 3. Kalınlık boyunca tam delinme 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Eğilme gerilmeleri altında fiberlerde 35 mm X 12 mm.lik alanda kırılma 2. Yüzeyde yer fıstığı şeklinde 45 mm X 25 mm delaminasyon hasar alanı

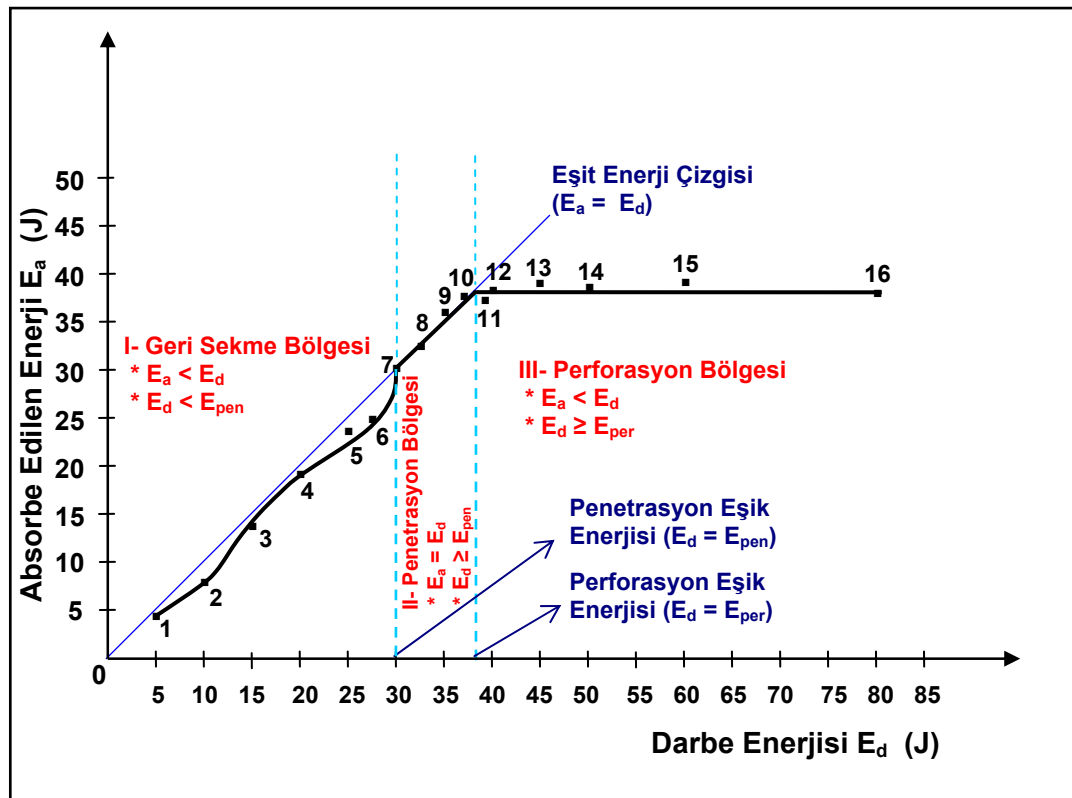


Resim 4.16. 4 mm E-Cam tek yönlü $[90/0]_9$ kompozitin 39 J - 80 J enerji ile perforasyon durumuna ait ön ve arka yüzlerinde oluşan hasar

Perforasyon karakterli darbe test sonuçları incelendiğinde; artan enerji seviyesinin kompozit malzemenin arka yüzünde oluşan delaminasyon alanında artışa neden olmadığı, ancak etkili fiber kırılmasının meydana geldiği yüzey alanının artan enerji ile birlikte arttığı görülmüştür.

E-Cam tek yönlü [0/90]₉ kompozitin ağırlık düşürme testlerine ait enerji dağılımı ve kritik eşik enerjileri

4 mm kalınlığındaki E tipi cam elyaf takviyeli kompozit malzemenin düşük hızlı ağırlık düşürme testlerine ait darbe enerjisi ile test numunesi tarafından absorbe edilen enerji değerlerinin mukayesesi kompozit malzemenin darbe karakterizasyonu için önemli sonuçlar içermektedir. E-Cam Tek Yönlü kompozit malzemenin düşük enerjili darbe davranışı, Şekil 4.27'de görülen grafikte, malzeme tarafından absorbe edilen enerjinin başlangıç darbe enerjisine bağlı olarak bulunmasıyla ortaya konmuştur.



Şekil 4.27. 4 mm kalınlığındaki E-Cam tek yönlü kompozitin düşük hızlarda darbe testlerine ait enerji dağılımı ve kritik enerji eşikleri

Şekil 4.27'de yer alan grafikteki enerji dağılımı incelendiğinde, kompozit malzemenin darbe davranışını belirleyen iki kritik eşik enerjisi ve buna bağlı olarak üç ayrı bölge önem kazanmaktadır:

(1) Geri Sekme Bölgesi ($E_a < E_d$): Şekil 4.27'de I. Bölge olarak gösterilen aralıkta yapılan testlerin ortak olan yönü malzeme tarafından absorbe edilen enerjinin test darbe enerjisinden daha küçük olmasıdır. Darbe enerjisi ile absorbe edilen enerji arasındaki fark, düşen ağırlık - darbe ucu sisteminin geri sekmesinde kullanılmıştır. Geri sekmenin yaşandığı tüm testlerde maksimum yer değiştirme noktasında hız sıfırlanmış ve düşen ağırlık sistemi geri sekerken kompozit malzemede aksi yönde hız kazanarak ters yönde belli bir miktar yer değiştirme olmuştur. I. Bölgede 1, 2, 3, 4, 5 ve 6 numaralı testlerin tamamı Şekil 4.27'de gösterilen $E_a = E_d$ eşit enerji çizgisinin altında yer almaktadır.

(2) Penetrasyon Bölgesi ($E_a = E_d$): Darbe enerjisinin kademeli olarak artması sonucunda, 30 J darbe enerjisiyle yapılan 7 numaralı testte malzeme tarafından absorbe edilen enerjinin darbe enerjisine eşit olduğu tespit edilmiştir. Darbe enerjisinin tamamının malzeme tarafından absorbe edildiği en küçük değeri Penetrasyon Eşik Enerjisi ile tanımlanmaktadır. Penetrasyon Eşik Enerjisi, kompozit malzemenin karakterizasyonu için önemli bir parametredir. 8, 9 ve 10 numaralı testlerde de eşik enerjisi ile yapılan 7 numaralı testte olduğu gibi malzeme tarafından absorbe edilen enerji darbe enerjisine yaklaşık olarak eşittir. Yani 7, 8, 9 ve 10 numaralı noktaların tamamı $E_a = E_d$ eşit enerji çizgisi üzerinde yer almaktadır.

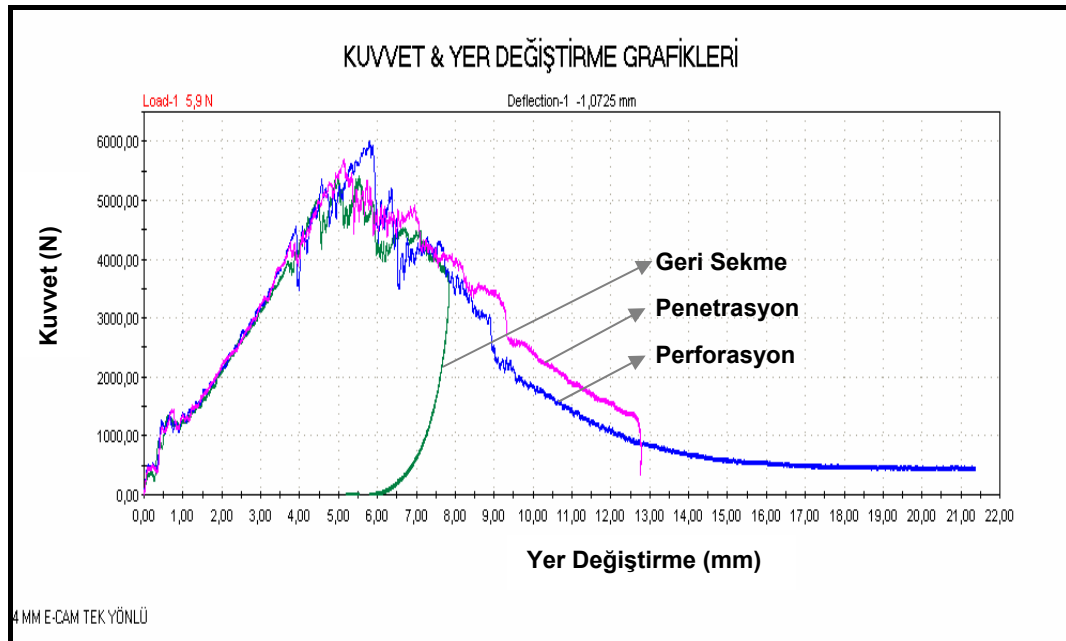
Penetrasyonla sonuçlanan testlerde, enerji grafikleri geri sekme bölgesinde yapılan testlere ait grafiklerde olduğu gibi maksimum değere ulaştıktan sonra azalma göstermemektedir. Penetrasyon bölgesinde artan enerji seviyesi ile birlikte darbe ucunun kompozit malzeme içerisindeki penetrasyon derinliğinin de arttığı görülmüştür.

(3) Perforasyon Bölgesi ($E_a < E_d$): Şekil 4.27'de III. Bölge olarak gösterilen kısımdır. Darbe enerjisinin penetrasyon enerjisinin daha üstünde kademeli olarak artırılması sonucunda 39 J enerji ile yapılan 11 numaralı testte delici ucun 4 mm kalınlığındaki kompozit malzemeyi tamamen deldiği görülmüştür.

Bu enerjinin üstünde yapılan tüm testler de aynı sonucu vermiştir. 11, 12, 13, 14, 15 ve 16 numaralı testlerin tamamında malzeme tarafından absorbe edilen enerjinin darbe enerjisinden daha küçük olduğu görülmektedir. 4 mm kalınlığındaki kompozit malzemeye ait perforasyon eşik enerjisi, tam delinme durumunun gerçekleştiği testlere ait perforasyon enerjilerinin ortalaması hesaplanarak bulunmuştur.

Perforasyon durumundaki enerji & zaman grafikleri incelendiğinde enerjinin zaman içerisinde sürekli arttığı görülmüştür. Kuvvet & zaman grafiklerinde ise kuvvetin belli bir noktadan sonra sabit bir değere ulaştığı görülmektedir. Kuvvetin sabitlendiği alan sürtünme tesirindeki bölge olarak adlandırılmıştır. Kuvvetin sabit kaldığı bu süreçte darbe ucu malzeme içerisinde perforasyon sonrasındaki hareketini tamamlamaktadır.

Şekil 4.28'deki kuvvet & yer değiştirme grafiklerinde geri sekme, penetrasyon ve perforasyon karakterli darbe testlerinin ortak ve farklı yönleri daha iyi görülmektedir. Grafikler incelendiğinde belirgin ilk hasar noktasına karşılık



Şekil 4.28. 4 mm kalınlığındaki E-Cam tek yönlü kompozitin geri sekme, penetrasyon ve perforasyon karakterli darbe testleri

gelen Hertz kontak kuvvetlerinin ve ana hasara neden olan maksimum kuvvet değerlerinin fazla farklılık göstermediği, grafiklerin yükseliş eğimlerinin ise aynı olduğu anlaşılmaktadır. Geri sekme durumunda yer değiştirmenin maksimum değerinden geriye doğru azalması ve ters yönlü hareketi, penetrasyon durumunda maksimum yer değiştirme noktasında delme hareketinin tamamlanması (hızın sıfır olması), perforasyon durumunda ise malzemenin tüm kalınlık boyunca delinmesini müteakip sabit sürtünme kuvveti tesirindeki hareketi grafiklerde açık olarak görülmektedir.

4.2.2. E-Cam düz dokuma kompozitin ($t= 3,85$ mm) darbe test sonuçları (Geri sekme, penetrasyon ve perforasyon durumu)

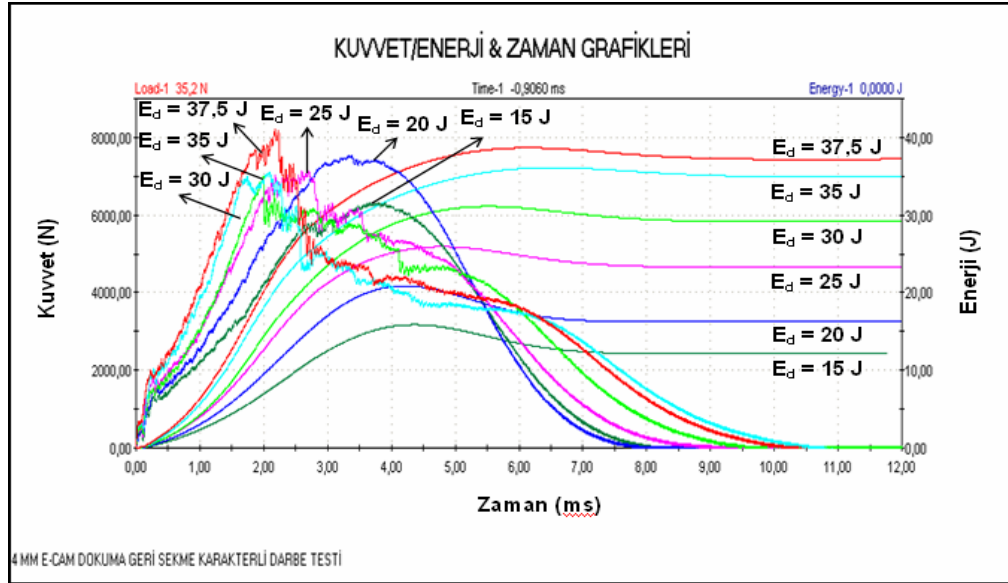
Ortalama 3,85 mm kalınlıktaki E-Cam düz dokuma kompozit numunelere 15 J ile 80 J darbe enerjisi aralığında Çizelge 4.14'de verilen enerji seviyelerinde ağırlık düşürme testleri uygulanmıştır. Testler sonucunda düşük enerjili darbe hasarını karakterize eden geri sekme aralığı, penetrasyon aralığı ve penetrasyon eşik enerjisi, perforasyon aralığı ve perforasyon eşik enerjisi değerleri bulunmuştur.

E-Cam düz dokuma kompozitin ($t= 3,85$ mm) geri sekme karakterli ağırlık düşürme testleri

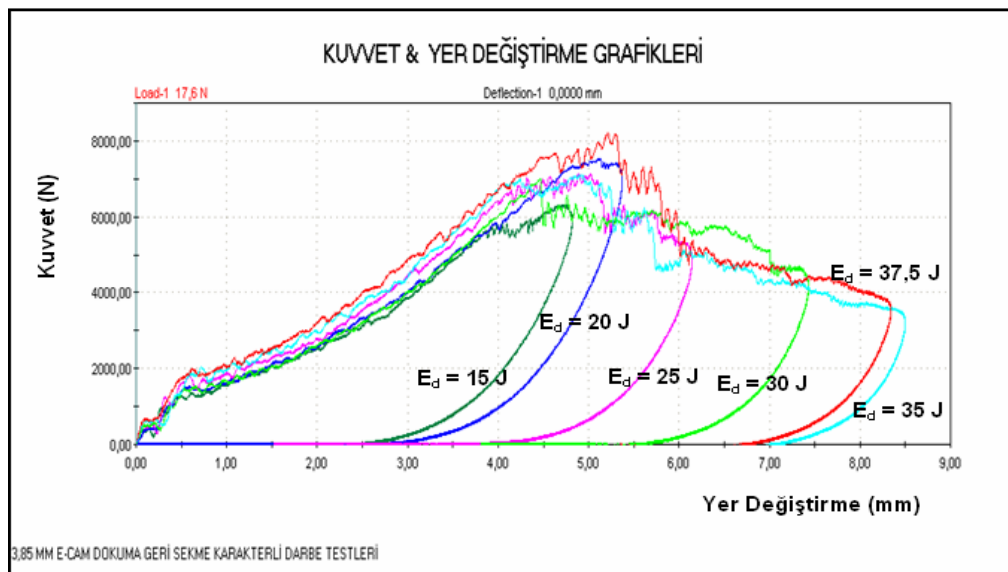
Darbe enerji aralığı [15-37,5] J içinde yer alan ağırlık düşürme testlerinin tamamında geri sekme meydana gelmiştir. Şekil 4.29'da [15-37,5] J arası geri sekme ile sonuçlanan ağırlık düşürme testlerinin kuvvet/enerji & zaman grafikleri, Şekil 4.30'da kuvvet & yer değiştirme grafikleri, Şekil 4.31'de ise yer değiştirme/hız & zaman grafikleri verilmiştir.

Geri sekme ile sonuçlanan ağırlık düşürme testlerinde kompozit malzeme tarafından absorbe edilen enerji darbe enerjisinden daha küçüktür. Düz dokuma kompozit malzemenin ağırlık düşürme testlerine ait kuvvet, enerji ve yer değiştirme bağıntıları genel olarak tek yönlü kompozit malzeme ile şekil

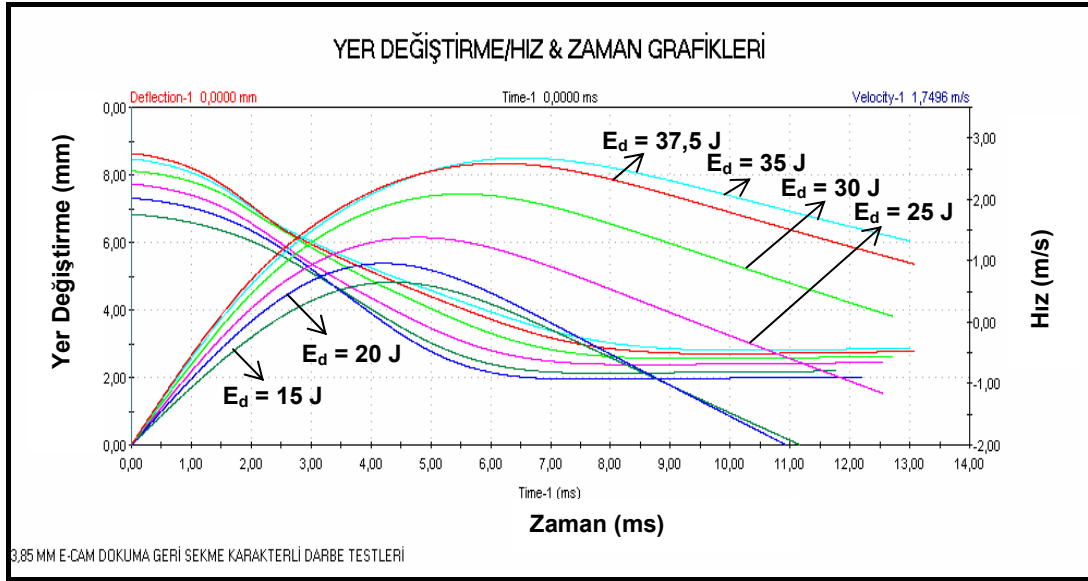
açısından benzer özellikler taşımaktadır. Ağırlık düşürme testlerine ait grafiklerin yükseliş ve düşüş biçim ve özellikleri benzer davranış göstermektedir. Ancak malzemeye özgün değerlerde (Hertz temas kuvveti, maksimum kuvvet değeri, kuvvet grafiği eğimi gibi) farklılıklar bulunmaktadır.



Şekil 4.29. 3,85 mm E-Cam düz dokuma kompozitin 15-37,5 J enerji ile ağırlık düşürme testlerine ait kuvvet/enerji & zaman grafikleri



Şekil 4.30. E-Cam dokuma kompozitin ($t=3,85$ mm) 15-37,5 J enerji ile ağırlık düşürme testlerine ait kuvvet & yer değiştirme grafikleri



Şekil 4.31. E-Cam düz dokuma kompozitin ($t=3,85$ mm) 15-37,5 J enerji ile ağırlık düşürme testlerine ait yer değiştirme/hız & zaman grafikleri

Geri sekme karakterli ağırlık düşürme testlerinden elde edilen kritik kuvvet ve ortalama değerleri farklı darbe enerjilerine göre Çizelge 4.23'de verilmiştir. 15 J ile 37,5 J arasında yapılan tüm testlerin ortalaması dikkate alındığında 3,85 mm E-Cam düz dokuma kompozit için Hertz hasar kuvveti $F_H = 1707,2$ N, Hertz hasar enerjisi $E_{FH} = 0,5847$ J ve $F_{max} = 7210,7$ N bulunmuştur.

Çizelge 4.23. 3,85 mm E-Cam düz dokuma kompozitin 15 J - 37,5 J arası darbe testlerinde bulunan kritik kuvvet değerleri

Darbe Enerjisi E_d (J)	Maksimum Kuvvet F_{max} (N)	Hertz Kuvveti F_H (N)	Hertz Hasar Enerjisi E_H (J)
15	6313,0	1371,6	0,4868
20	7533,8	1534,9	0,4517
25	7124,3	1813,4	0,5499
30	6995,2	1525,8	0,5484
35	7100,9	2012,9	0,7768
37,5	8197,2	1984,7	0,6943
ORTALAMA	7210,7	1707,2	0,5847

3,85 mm kalınlığındaki E-Cam düz dokuma kompozitin düşük enerjili darbe testlerinde ön yüzde oluşan hasar ve kırılma dairesel iken arka yüzde atkı ve

çözgü ipliklerin oluşturduğu hücrelerle sınırlı kare veya dikdörtgen şeklinde delaminasyon veya kırılma hasarının meydana geldiği gözlemlenmiştir. Çizelge 4.24'de geri sekme ile sonuçlanan değişik seviyelerdeki darbe enerjilerine karşılık gelen ağırlık düşürme testlerine ait kritik kuvvet, enerji değerleriyle birlikte kompozit malzemenin ön ve arka yüzünde meydana gelen hasar yapısının boyutları verilmiştir.

Çizelge 4.24'de ön yüzde darbe ucunun hemen altında meydana gelen dairesel matris ezilmesi çap büyüklüğü ile, arka yüzde meydana gelen dikdörtgensel delaminasyon veya fiber kırılmasına ait hasar alanı büyüklüğü ise uzunluk ve genişlik ölçüleriyle tanımlanmıştır. Arka yüzde oldukça düşük enerji seviyelerinde sadece delaminasyon veya fiber çatlakları görülürken artan enerji seviyesiyle birlikte hasar yapısının fiber kırılmalarına dönüştüğü görülmüştür. Çizelge 4.25'de malzeme ön ve arka yüzlerinde oluşan hasar yapısı, Resim 4.17'de ise hasar fotoğrafları detaylarıyla verilmiştir.

Çizelge 4.24. 3,85 mm E-Cam düz dokuma kompozitin [15-37,5] J ile darbe testlerine ait kritik kuvvet, enerji değerleri ve hasar boyutu

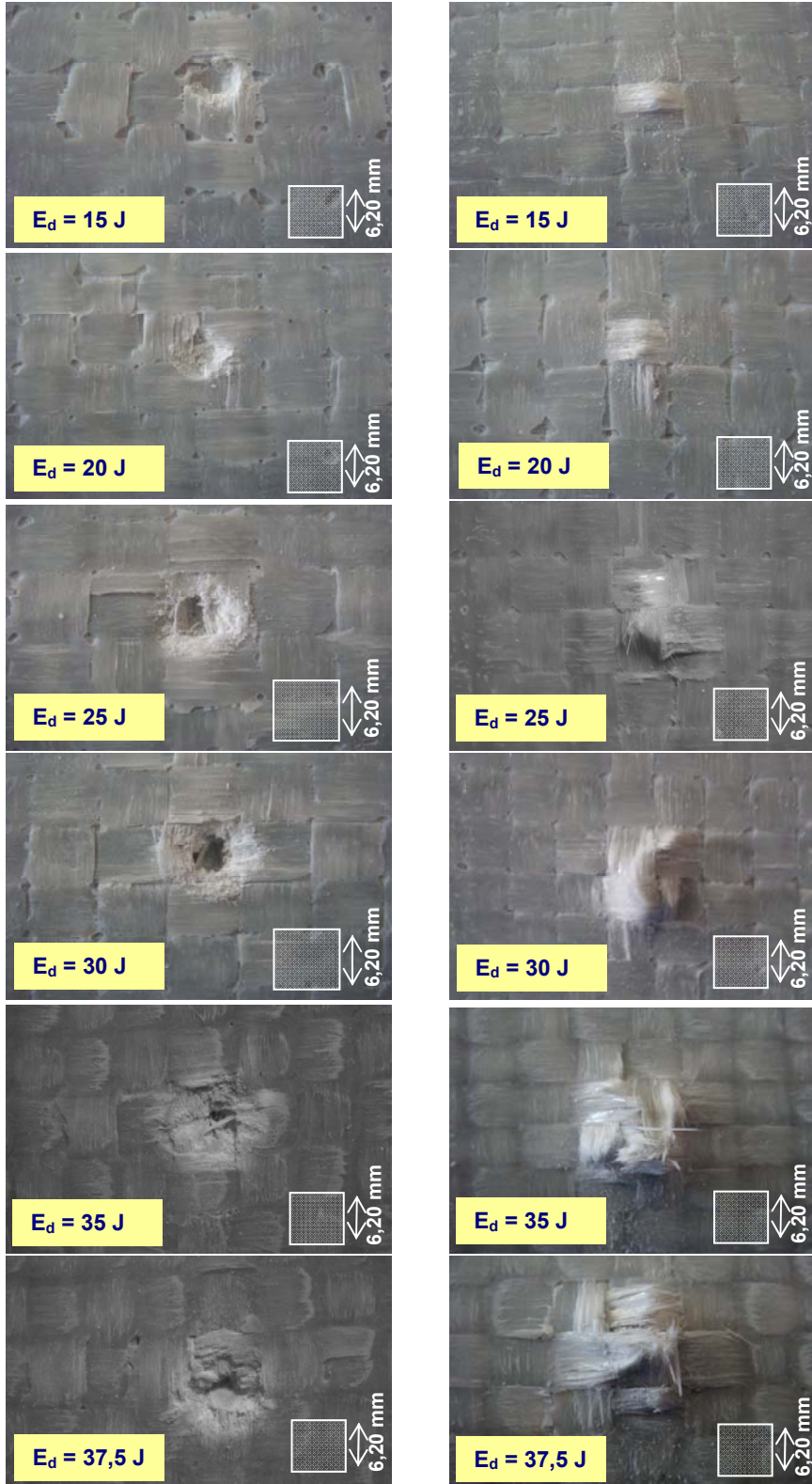
GERİ SEKME KARAKTERLİ DARBE SONUÇLARI						
E_d (J)	15	20	25	30	35	37,5
F_{max} (N)	6313,0	7533,8	7124,3	6995,2	7100,9	8197,2
$E(F_{max})$ (J)	15,1979	19,0651	19,2935	14,3576	19,1879	22,6341
E_a (J)	12,1734	16,2645	23,3066	29,1721	34,9151	37,1786
F_H (N)	1371,6	1534,9	1813,4	1525,8	2012,9	1984,7
E_H (J)	0,4868	0,4517	0,5499	0,5484	0,7768	0,6943
Ön yüz matris ezilme çapı (mm)	5,56	6,45	7,55	8,83	9,47	9,93
Arka yüz delaminasyon/kırılma uzunluğu (mm)	6,46	9,62	15,04	17,80	20,15	19,80
Arka yüz delaminasyon/kırılma genişliği (mm)	3,16	5,87	13,81	17,50	17,81	19,54
Ön yüz çentik derinliği	0,26	0,41	1,02	2,99	3,21	3,05

Çizelge 4.25. 3,85 mm E-Cam düz dokuma kompozitin [15-37,5] J aralığında geri sekme karakterli darbe hasar yapısı

Darbe Enerjisi (J)	GERİ SEKME KARAKTERLİ DARBE HASAR YAPISI	
	ÖN YÜZ	ARKA YÜZ
15	<ol style="list-style-type: none"> 1. Lokal basma gerilmeleri altında 5,56 mm çapında bir alanda matris yapıda ezilme; çatlak ve delaminasyon başlangıcı 2. Fiberlerde küçük ezilmeler 3. Malzemede çentik derinliği: 0,26 mm 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Eğilme gerilmeleri altında fiberlerde küçük esnemeler 2. 6,46X3,16 mm² lik bir alanda gözle görülebilen delaminasyon
20	<ol style="list-style-type: none"> 1. Lokal basma gerilmeleri altında 6,45 mm çapında bir alanda matris yapıda ezilme; çatlak ve delaminasyon başlangıcı 2. Fiberlerde küçük ezilmeler 3. Malzemede çentik derinliği: 0,41 mm 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Eğilme gerilmeleri altında fiberlerde küçük esnemeler 2. 9,62X5,87 mm² lik bir alanda gözle görülebilen delaminasyon
25	<ol style="list-style-type: none"> 1. Lokal basma gerilmeleri altında 7,55 mm çapında bir alanda matris yapıda ezilme; delaminasyon ve kırılma oluşumu 2. 3,42x4,08 mm² lik dikdörtgensel bir alanda oluşan fiber kırılması 3. Malzemede çentik derinliği: 1,02 mm 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Darbe sonucu oluşan basma gerilmelerinin malzeme arka yüzünde çekme gerilmelerine dönüşmesiyle fiberlerde kırılmaların oluşması 2. 15,04X13,81 mm² lik bir alanda gözle görülebilen delaminasyon oluşumu
30	<ol style="list-style-type: none"> 1. Lokal basma gerilmeleri altında 8,83 mm çapında bir alanda matris yapıda ezilme; delaminasyon ve kırılma gelişimi 2. 3,04 mm çapında dairesel kesme şeklinde fiber kırılması 3. Malzemede çentik derinliği: 2,99 mm 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Darbe sonucu oluşan basma gerilmelerinin malzeme arka yüzünde çekme gerilmelerine dönüşmesiyle fiberlerde kırılmaların oluşması 2. 17,80X17,50mm² lik bir alanda fiber kırılması ile birlikte gözle görülebilen, 26 mm uzunluğa sahip paralelkenar şeklinde bir alanda ise arka yüzün hemen altında oluşan delaminasyon
35	<ol style="list-style-type: none"> 1. Lokal basma gerilmeleri altında 9,47 mm çapında bir alanda matris yapıda ezilme, delaminasyon ve kırılma gelişimi 2. Kesme gerilmeleri altında 3,05 mm çapında dairesel fiber kırılması 3. Malzemede çentik derinliği: 3,11 mm 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Darbe sonucu oluşan basma gerilmelerinin malzeme arka yüzünde çekme gerilmelerine dönüşmesiyle fiberlerde kırılmaların oluşması 2. 20,15X17,81mm² lik bir alanda fiber kırılması ile birlikte gözle görülebilen, 26 mm uzunluğa sahip paralelkenar şeklinde bir alanda ise arka yüzün hemen altında oluşan delaminasyon
37,5	<ol style="list-style-type: none"> 1. Lokal basma gerilmeleri altında 9,93 mm çapında bir alanda matris yapıda ezilme; delaminasyon ve kırılma gelişimi 2. Kesme gerilmeleri altında 3,05 mm çapında dairesel fiber kırılması 3. Çentik derinliği: 3,25 mm 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Darbe sonucu oluşan basma gerilmelerinin malzeme arka yüzünde çekme gerilmelerine dönüşmesiyle fiberlerde kırılmaların oluşması 2. 19,80X19,54mm² lik bir alanda fiber kırılması ile birlikte gözle görülebilen, 26 mm uzunluğa sahip paralelkenar şeklinde bir alanda ise arka yüzün hemen altında oluşan delaminasyon

ÖN YÜZ

ARKA YÜZ

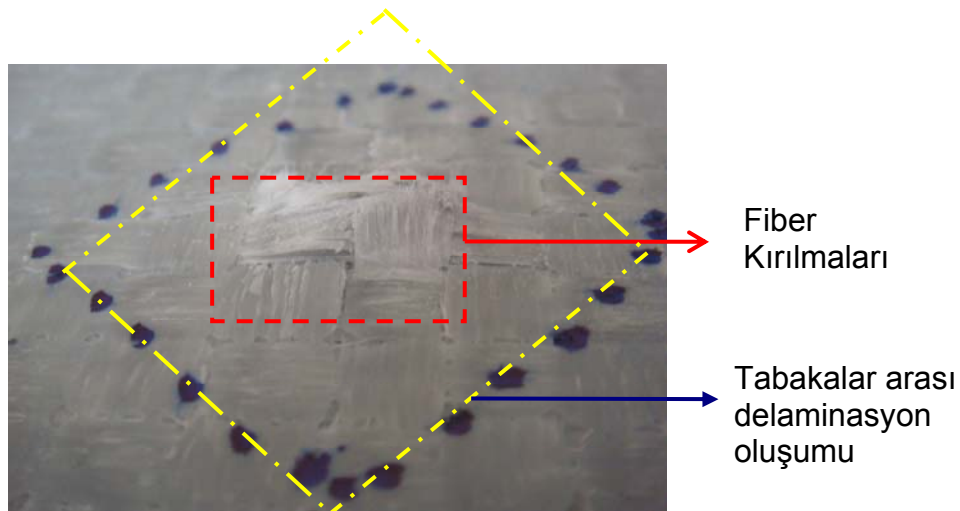


Resim 4.17. 3,85 mm E-Cam düz dokuma kompozitin 15 J - 37,5 J enerji ile geri sekme durumuna ait ön ve arka yüzlerinde oluşan hasar

Geri sekme karakterli darbe testlerinde artan enerji ile birlikte kompozit malzemenin ön yüzünde matris ezilmesi sonucu oluşan delaminasyon ve fiber kırılma alanları giderek büyümektedir. 15 J ile 37,5 J enerji aralığında yapılan testlerde, $E_d = 37,5$ J darbe enerjisi için ön yüzdeki matris malzemede meydana gelen kırılma alanı en büyük değeri olan 9,93 mm çapa çıkmış ve darbe ucu çapına (10 mm) en yakın değere ulaşmıştır. Artan enerji seviyesi ile paralel olarak kompozit ön yüzünde oluşan çentik derinliği de artmıştır.

[15-37,5] J enerji aralığında yapılan darbe testlerinde kompozit malzemenin arka yüzünde fiber kırılmasıyla birlikte meydana gelen delaminasyon hasar alanında enerji artışına bağlı olarak büyüme görülmüştür (Resim 4.17).

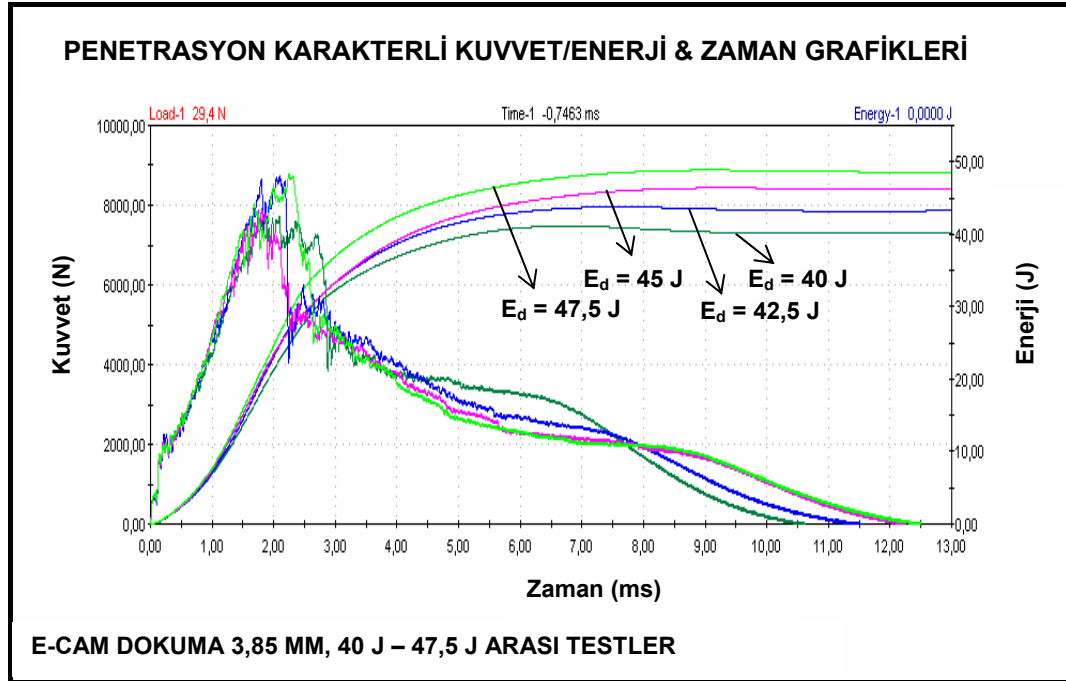
$E_d = 25$ J ve üzerinde gerçekleştirilen testlerde kompozit malzemenin arka yüzünde küçük kabarma şeklinde tespit edilebilen paralel kenara benzer delaminasyon hasarı görülmüştür. E-Cam kumaş katları arasında (tabakalar arası) meydana gelen bu delaminasyon arka yüzde ayrışma ile sonuçlanmamış alt tabakalarla sınırlı kalmıştır. Resim 4.18'de 30 J ile yapılan ağırlık düşürme testinde kompozitin arka yüzünde meydana gelen ve kenar uzunluğu yaklaşık olarak 26 mm uzunluğunda olan paralel kenar şeklindeki delaminasyon hasar yapısı ve merkezde oluşan fiber kırılması görülmektedir.



Resim 4.18. 3,85 mm E-Cam düz dokuma kompozitin 30 J ile darbe testinde arka yüzünde oluşan delaminasyon ve fiber kırılmaları

E-Cam düz dokuma kompozitin (t= 3,85 mm) penetrasyon (kısmi nüfuziyet) karakterli ağırlık düşürme testleri

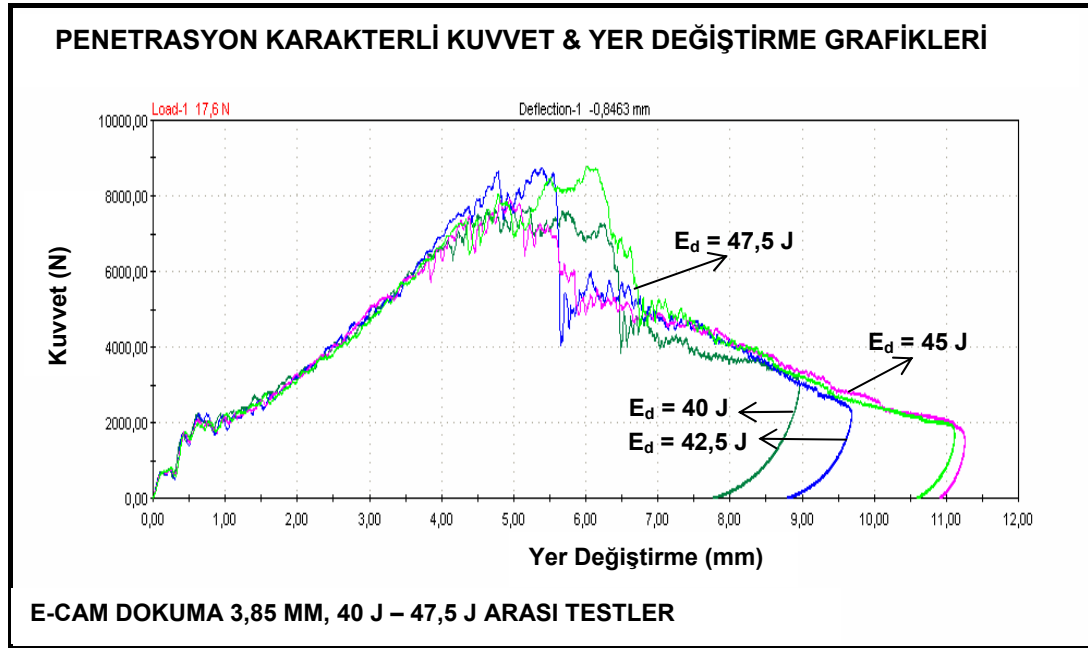
E-Cam düz dokuma kompozitin 40 J ile 47,5 J darbe enerjisi aralığında yapılan ağırlık düşürme testlerinde, Şekil 4.32'den de anlaşılacağı gibi kompozit malzeme tarafından absorbe edilen enerjinin başlangıç darbe enerjisine eşit olduğu görülmüştür. Bu nedenle [40-47,5] J enerji aralığı 3,85 mm kalınlığındaki E-Cam düz dokuma kompozitin penetrasyon karakterli ağırlık düşürme testlerine karşılık gelmektedir.



Şekil 4.32. 3,85 mm E-Cam düz dokuma kompozitin 40-47,5 J enerji ile ağırlık düşürme testlerine ait kuvvet/enerji & zaman grafikleri

Şekil 4.33'den anlaşılacağı gibi kompozit malzeme ve çarpan darbe ucunda küçük de olsa bir geri sekmenin yaşandığı gerçektir. [40-47,5] J enerji aralığında gerçekleştirilen darbe testlerinin tamamında malzemedeki toplam yer değiştirme darbe sonucu oluşan maksimum yer değiştirmeden daha küçüktür. Bu aralıkta yapılan testlerin tümünde darbe ucu ve kompozit malzemenin hızı sıfırlanmakta, sonrasında ise ters yönde bir miktar hız

kazanmaktadır. Ancak ters yöndeki hareket geri sekme karakterli ağırlık düşürme testlerinde olduğu gibi uzun süreli değildir, buna bağlı olarak da ters yönlü yer değiştirme miktarı oldukça küçüktür.



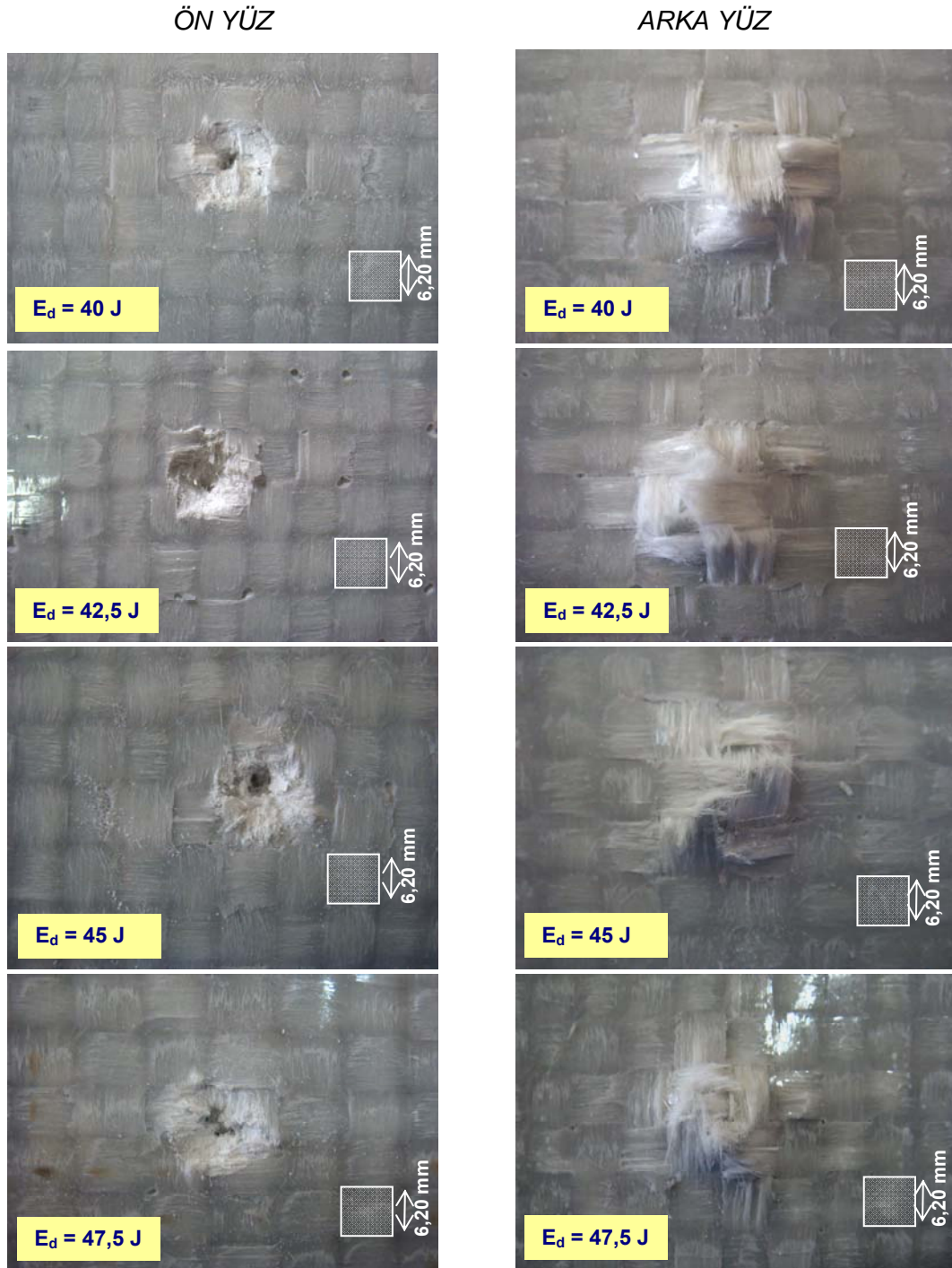
Şekil 4.33. 3,85 mm E-Cam düz dokuma kompozitin 40-47,5 J enerji ile ağırlık düşürme testlerine ait kuvvet & yer değiştirme grafikleri

Çizelge 4.26'da 3,85 mm kalınlığındaki dokuma kompozitin [40:47,5] J enerji aralığındaki ağırlık düşürme testlerine ait maksimum kuvvet, Hertz Hasar kuvveti, Hertz Hasarı enerjisi ve bunlara ait ortalama değerler verilmiştir.

Çizelge 4.26. 3,85 mm E-Cam düz dokuma kompozitin 40J - 47,5 J arası darbe testlerinde bulunan kritik kuvvet değerleri

Darbe Enerjisi E_d (J)	Maksimum Kuvvet F_{max} (N)	Hertz Kuvveti F_H (N)	Hertz Hasar Enerjisi E_H (J)
40,0	7714,3	2191,5	0,6956
42,5	8754,2	2209,1	0,9151
45,0	7914,0	2062,2	0,6700
47,5	8789,4	2003,5	0,9850
ORTALAMA	8293,0	2116,6	0,8164

Kompozit numunelerin ön ve arka yüzlerinde oluşan darbe hasar fotoğrafları Resim 4.19'da verilmiştir. Çizelge 4.27'de kompozitin ön ve arka yüzlerinde oluşan kırılma ve delaminasyon hasar alanı boyutları da verilmiştir.



Resim 4.19. 3,85 mm E-Cam düz dokuma kompozitin 40 J - 47,5 J enerji ile penetrasyon durumuna ait ön ve arka yüzlerinde oluşan hasar

Çizelge 4.27. 3,85 mm E-Cam dokuma kompozitin [40 - 47,5] J arası darbe testlerine ait kritik kuvvet, enerji değerleri ve hasar boyutu

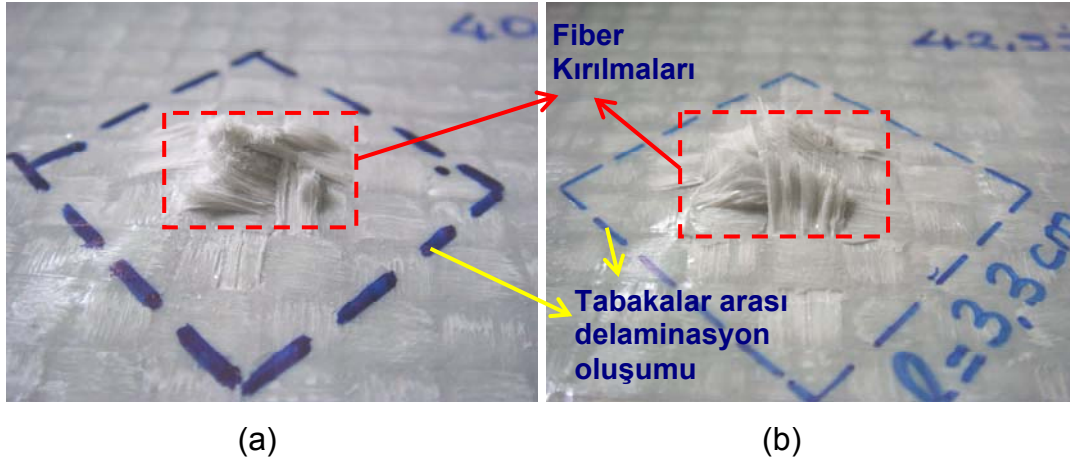
PENETRASYON KARAKTERLİ DARBE SONUÇLARI				
Ed (J)	40	42,5	45	47,5
Fmax (N)	7714,3	8754,2	7914,0	8789,4
E(Fmax) (J)	22,603	24,702	20,429	28,790
Ea (J)	40,009	42,508	45,183	47,575
Fh (N)	2191,5	2209,1	2062,2	2003,5
Eh (J)	0,6956	0,9151	0,6700	0,9850
Ön yüz matris ezilme/kırılma çapı (mm)	10	10	10	10
Ön yüz çentik derinliği (mm)	3,53	3,64	3,80	3,82
Arka yüz fiber etkili kırılma alanı uzunluğu (mm)	19,53	20,23	19,76	20,97
Arka yüz fiber etkili kırılma alanı genişliği (mm)	17,43	16,82	16,94	16,98

Gerek Resim 4.19'dan gerekse Çizelge 4.27'den anlaşılacağı gibi penetrasyonla sonuçlanan testlerin tamamında kompozit malzemenin ön yüzünde oluşan matris ezilme ve kırılma alanı darbe ucunun çapına eşittir. Ön yüzde oluşan çentik derinliği artan enerji ile birlikte artmaktadır. Kompozit malzemenin arka yüzünde, darbe ucunun çarpma noktası merkezli oluşan fiber kırılmalarına ait hasar alanı büyüklüğünün tüm testlerde yaklaşık olarak aynı olduğu görülmüştür. Bu gözlem doğrultusunda dokuma hücre yapısının kırılma hasar yapısını sınırladığı sonucuna varılmıştır.

[40-47,5] J enerji aralığında gerçekleştirilen ağırlık düşürme testlerinde kompozit malzemenin arka yüzünde fiber kırılması ile birlikte gözle görülebilen, yaklaşık olarak 33 mm uzunluğa sahip paralelkenar şeklinde delaminasyon hasar alanı tespit edilmiştir (Resim 4.20).

Penetrasyon eşik enerjisi penetrasyonun gerçekleştiği en küçük darbe enerjisi ile tanımlanmaktadır. 3,85 mm kalınlığındaki E-Cam düz dokuma

kompozitin ağırlık düşürme testleri sonucunda absorbe ettiği enerjinin başlangıç darbe enerjisine eşit olduğu ve darbe uç çapına yakın bir kesitte kısmi nüfuziyet sağladığı en küçük enerji seviyesi 40 J olduğundan, söz konusu dokuma kompozitin penetrasyon eşik enerjisi $E_{pen}=40$ J'dür.

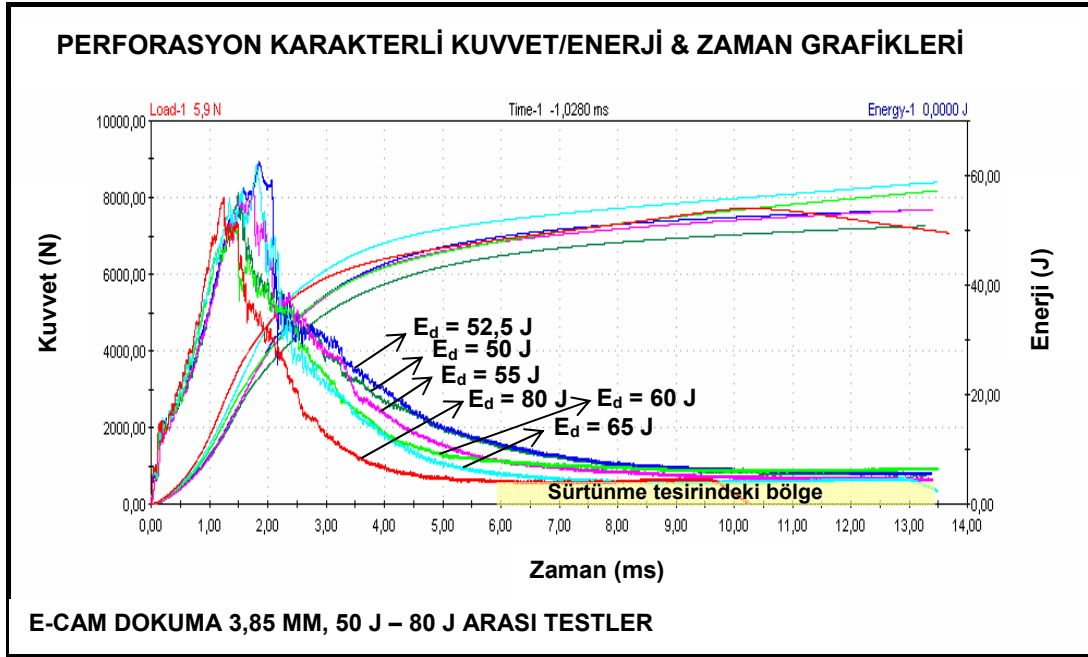


Resim 4.20. 3,85 mm E-Cam düz dokuma kompozitin 40 J ve 42,5 J enerji ile darbe testlerinde arka yüzlerinde oluşan delaminasyon hasarı (a) 40 J ile arka yüz hasarı, (b) 42,5 J ile arka yüz hasarı

E-Cam düz dokuma kompozitin ($t= 3,85$ mm) perforasyon (tam nüfuziyet) karakterli ağırlık düşürme testleri

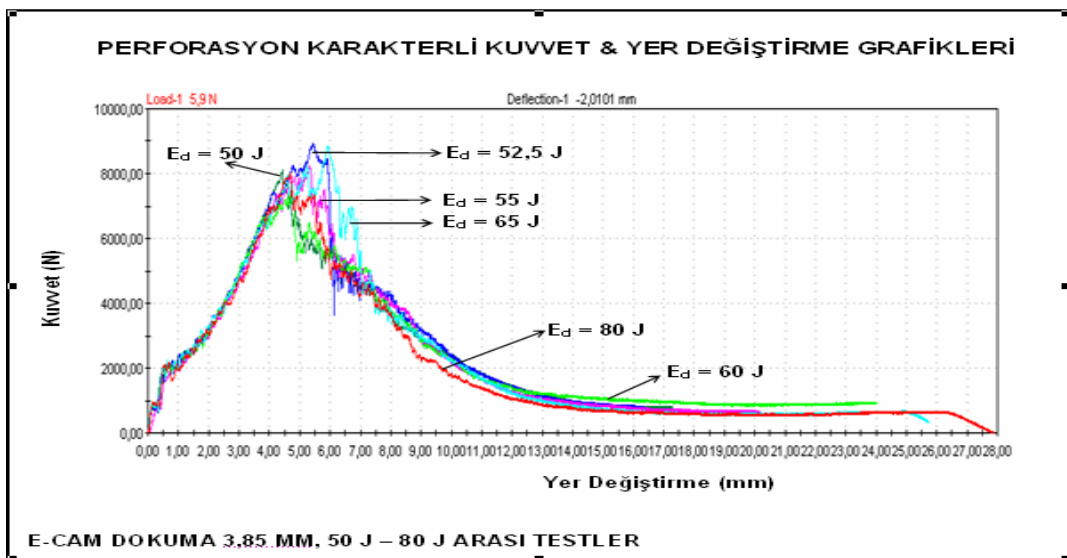
E-Cam düz dokuma kompozitin 50 J ile 80 J darbe enerjisi aralığında yapılan ağırlık düşürme testlerinin tamamında darbe ucu kompozit malzemede tam nüfuziyet sağlamış, yani kompozit malzeme tamamiyle delinmiştir. Şekil 4.34'de perforasyon karakterli ağırlık düşürme testlerine ait kuvvet/enerji & zaman grafikleri verilmiştir. Grafikler incelendiğinde enerjinin test süresince arttığı görülmektedir. Malzeme tarafından absorbe edilen toplam enerji malzemeye aktarılan enerjiye eşittir. Testlerde geri sekme yaşanmamıştır.

Kuvvet & zaman grafiğinin belli bir noktadan sonra yatay bir seyir izlediği tespit edilmiştir. Darbe sonuna doğru kuvvetin değişmeden yatay kaldığı sürtünme tesirindeki bölge Şekil 4.34'de görülmektedir.



Şekil 4.34. 3,85 mm E-Cam dokuma kompozitin 50-80 J enerji aralığında ağırlık düşürme testlerine ait kuvvet/enerji & zaman grafikleri

Şekil 4.35’de verilen kuvvet & yer değiştirme grafikleri incelendiğinde; [50:80] J enerji aralığında kuvvet grafiklerinin yükseliş ve düşüş bölümlerinde, tüm enerji seviyelerinde, eğimlerin aynı trendi izlediği görülmektedir.



Şekil 4.35. 3,85 mm E-Cam dokuma kompozitin 50-80 J enerji aralığında ağırlık düşürme testlerine ait kuvvet & yer değiştirme grafikleri

Tek yönlü kompozit malzemedede olduğu gibi Hertz hasar kuvveti ve malzemenin taşıyabileceği maksimum kuvvet değeri malzemeyi karakterize eden önemli özelliklerdir. Hertz hasarından önce ve sonrası olarak incelendiğinde kuvvetin yükseliş eğimlerinin farklı olduğu açık bir şekilde anlaşılmaktadır.

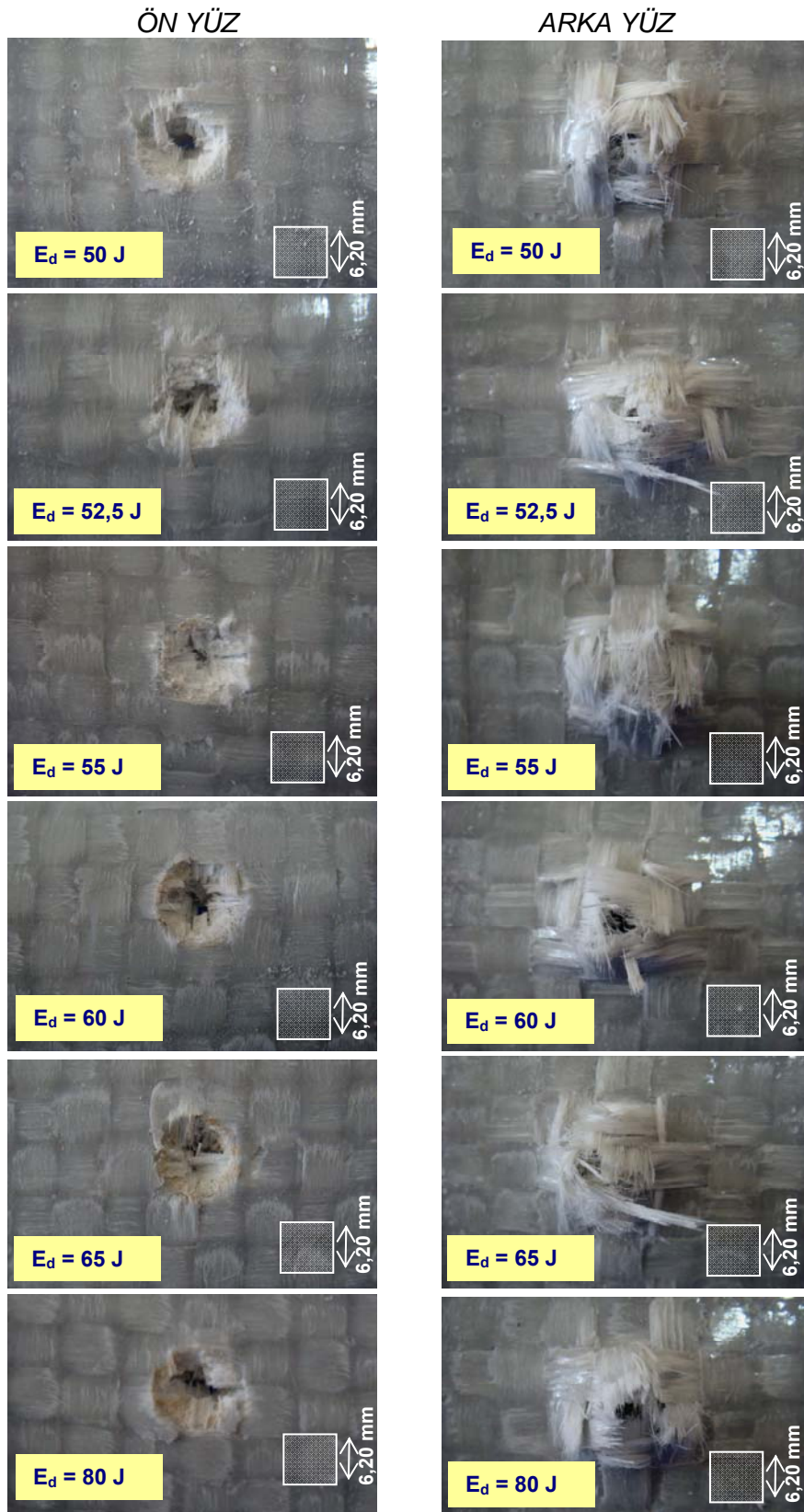
Çizelge 4.28'de 3,85 mm E-Cam düz dokuma kompozitin 50J - 80 J arası darbe testlerinde bulunan maksimum kuvvet, Hertz kuvveti ve Hertz hasar enerjisi değerleri ve ortalamaları verilmiştir. Perforasyonla sonuçlanan testlerin ortalama sonuçları penetrasyonla sonuçlanan testlere yakındır.

Çizelge 4.28. 3,85 mm E-Cam düz dokuma kompozitin [50-80] J enerji aralığında darbe testlerinde bulunan kritik kuvvet değerleri

Darbe Enerjisi E_d (J)	Maksimum Kuvvet F_{max} (N)	Hertz Kuvveti F_H (N)	Hertz Hasar Enerjisi E_H (J)
50,0	8107,9	2138,6	0,7868
52,5	8937,7	2206,5	1,0169
55,0	8229,8	2010,6	1,0517
60,0	7362,3	2116,1	1,2564
65,0	8841,7	2141,7	0,7112
80,0	7984,0	2156,7	0,8709
ORTALAMA	8243,9	2128,4	0,9490

Resim 4.21'de [50-80] J darbe enerjisi aralığında yapılan ağırlık düşürme testleri neticesinde kompozit numunelerin ön ve arka yüzlerinde oluşan hasar yapısı fotoğrafları verilmiştir. Kompozitin ön yüzündeki matris yapıda oluşan ezilme ve kırılma alanı darbe çubuğunun kesit alanı ile eşit büyüklüğe sahiptir. Perforasyonla sonuçlanan testlerin tümünde kompozit numunelerin ön yüzünde penetrasyon testlerinde olduğu gibi, darbe uç çapı olan 10 mm çapında kırılmalar oluşmuştur. Bu kırılmalar darbe ucunun zımbalama şeklindeki delme etkisiyle meydana gelmiştir.

Kompozit numunelerin arka yüzünde meydana gelen fiber kırılmaları Resim 4.21'de görülmektedir. Fiber kırılmalarının etkili olduğu alan büyüklüğü ise

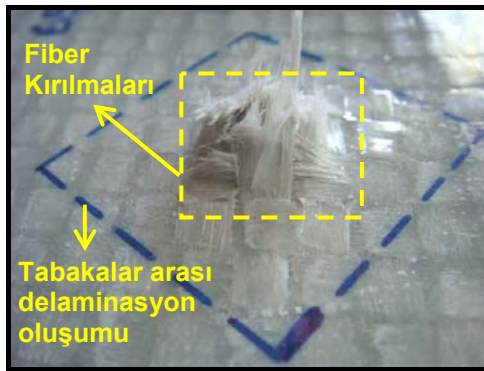


Resim 4.21. 3,85 mm E-Cam düz dokuma kompozitin [50-80] J enerji ile perforasyon durumuna ait ön ve arka yüzlerinde oluşan hasar

Çizelge 4.29'da arka yüz delaminasyon/kırılma uzunluğu ve genişliği ile tanımlanmıştır. Resim 4.22'de ise kompozit arka yüzünde tabakalar arası delaminasyon sonucu oluşan ve dikkatle incelendiğinde gözle de görülebilen yüzey kabartısının sınırladığı alana ait fotoğraf verilmiştir. Tabaka ayrışması şeklinde oluşan bu alan paralel kenar şeklinde olup kenar uzunluğu perforasyon testlerinin tamamında yaklaşık olarak 33 mm'dir.

Çizelge 4.29. 3,85 mm E-Cam düz dokuma kompozitin [50-80] J arası darbe testlerine ait kritik kuvvet, enerji değerleri ve hasar boyutu

PERFORASYON KARAKTERLİ DARBE SONUÇLARI						
Ed (J)	50	52,5	55	60	65	80
Fmax (N)	8107,9	8937,7	8229,8	7362,3	8841,7	7984,0
E(Fmax) (J)	17,3806	25,3678	23,2193	18,7391	28,6113	18,6310
Ea (J)	50,7699	53,7359	53,8623	57,2486	58,7458	53,9925
Fh (N)	2138,6	2206,5	2010,6	2116,1	2141,7	2156,7
Eh (J)	0,7868	1,0169	1,0517	1,2564	0,7112	0,8709
Ön yüz matris ezilme/kırılma çapı (mm)	10	10	10	10	10	10
Ön yüz çentik derinliği (mm)	3,85	3,85	3,85	3,85	3,85	3,85
Arka yüz delaminasyon/kırılma uzunluğu (mm)	21,77	19,74	19,51	21,72	20,95	22,17
Arka yüz delaminasyon/kırılma genişliği (mm)	17,48	18,42	18,25	18,30	17,82	17,73



Resim 4.22. 3,85 mm E-Cam düz dokuma kompozitin 65 J enerji ile darbe testinde arka yüzünde oluşan delaminasyon hasarı

Perforasyon testlerinde artan enerji seviyesinin kompozitin arka yüzünde meydana gelen fiber kırılma alanı büyüklüğünde hissedilebilir bir artışa neden olmadığı Çizelge 4.29'daki sonuçlardan anlaşılmaktadır. Tek yönlü kompozitlerde, perforasyon testlerinde artan enerjinin özellikle kompozit arka yüzündeki fiber kırılmalarında etkili olduğu gözlemlenmiş iken dokuma kompozitlerde etkili fiber kırılma alanı dokuma hücre yapısı içerisinde sınırlı kalmıştır.

Perforasyonla sonuçlanan ağırlık düşürme testlerinde sürtünme tesirindeki bölgelere ait sürtünme işi hesaplarına (kuvvet & yer değiştirme grafiği altında kalan alan hesaplaması) ait sonuçlar Çizelge 4.30'da verilmiştir. Çizelge 4.30'da bulunan sürtünmeye bağlı iş değerleri Eş. 4.1'de yerine konularak perforasyonla sonuçlanan testlerde perforasyon enerjileri bulunmuş, hesaplanan perforasyon enerjileri Çizelge 4.31'de verilmiştir.

Çizelge 4.30. 4 mm E-Cam tek yönlü kompozitin 50 J - 80 J darbe enerjisi aralığında, sürtünmeye bağlı iş hesabı

Darbe Enerjisi (J)	50	52,5	55	60	65	80
Sürtünme Kuvveti (N)	804,9	856,8	721,0	914,4	643,7	566,9
Sürtünme Altında Yer Değiştirme (mm)	1,812	1,344	4,040	7,145	9,247	8,680
Sürtünmeye Bağlı İş $W_{sür}$ (J)	1,459	1,152	2,913	6,533	5,952	4,921

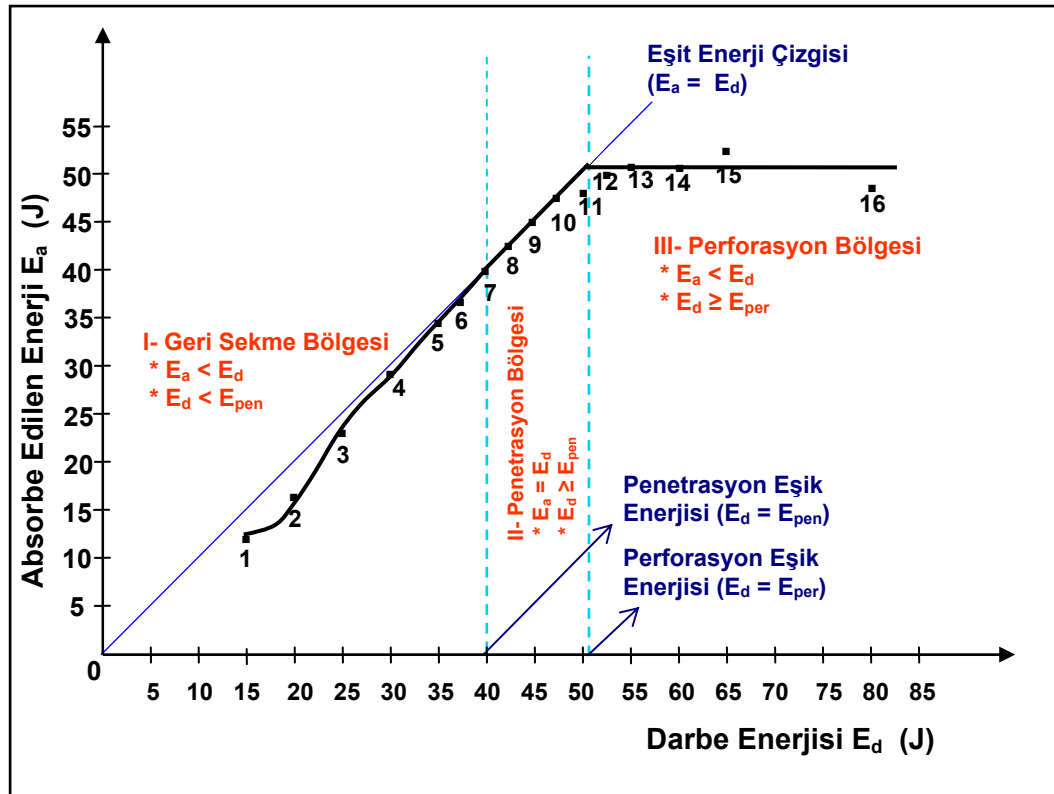
Çizelge 4.31. 4 mm E-Cam tek yönlü kompozitin 50 J - 80 J darbe enerjisi aralığında perforasyon sonucu absorbe edilen enerji değerleri

Darbe Enerjisi E_d (J)	50	52,5	55	60	65	80
Hesaplanan Enerji E_t (J)	50,169	52,536	53,862	57,249	58,746	53,993
Sürtünme İş $W_{sür}$ (J)	1,459	1,152	2,913	6,533	5,952	4,921
Absorbe Edilen Enerji E_a (J) ($E_{per} = E_a$)	48,711	51,384	50,949	50,715	52,793	49,072

3,85 mm kalınlığındaki E-Cam düz dokuma kompozitin perforasyon eşik enerjisi, [50-80] J darbe enerjisi aralığındaki test sonuçlarının ortalamasını almak suretiyle hesaplandığında, $E_{per} = 50,604$ J bulunmuştur.

3,85 mm E-Cam düz dokuma kompozitin ağırlık düşürme testlerine ait enerji dağılımı ve kritik eşik enerjileri

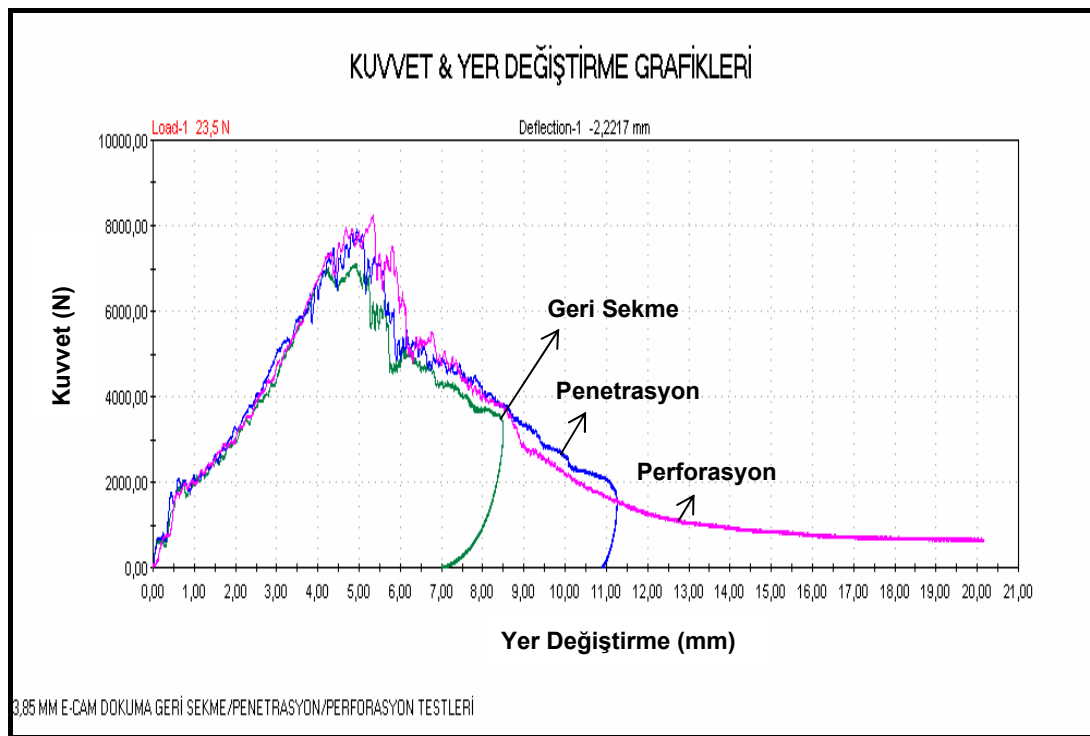
3,85 mm kalınlığındaki E-Cam düz dokuma kompozit malzemenin düşük enerjili darbe davranışı, Şekil 4.36'da görülen grafikte, malzeme tarafından absorbe edilen enerjinin başlangıç darbe enerjisine bağlı olarak bulunmasıyla ortaya konmuştur. Söz konusu kompozit malzeme için penetrasyon eşik enerjisi $E_{pen} = 40$ J, perforasyon eşik enerjisi $E_{per} = 50,604$ J bulunmuştur.



Şekil 4.36. 3,85 mm kalınlığındaki E-Cam Düz Dokuma kompozitin düşük hızlarda darbe testlerine ait enerji dağılımı ve kritik enerji eşikleri

Şekil 4.37'deki grafiklerde geri sekme, penetrasyon ve perforasyon karakterli

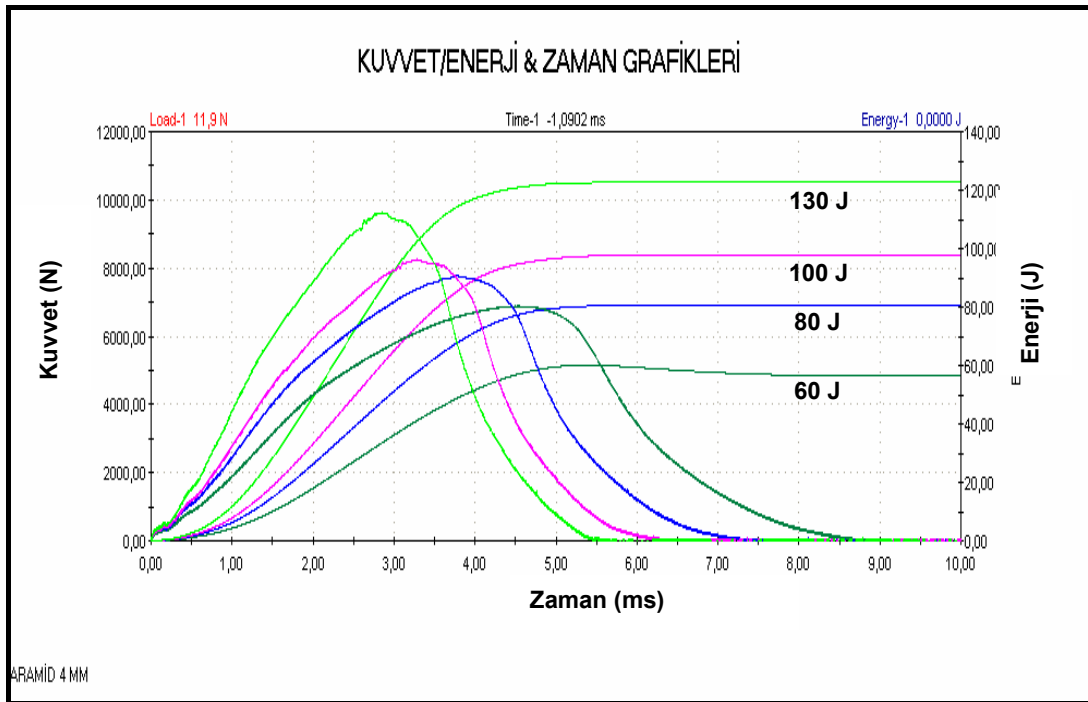
darbe testlerinde bulunan kuvvet & yer değiştirme ilişkisi görülmektedir. Bulunan sonuçlar incelendiğinde; düz dokuma kumaşlardan üretilen kompozit numuneler üzerinde gerçekleştirilen darbe testlerinde malzeme davranışının tek yönlü fiber kumaşlardan üretilen kompozit malzemeye benzer, kritik kuvvet ve enerji eşiklerinin etkisinin aynı temel özelliklere sahip olduğu görülmektedir.



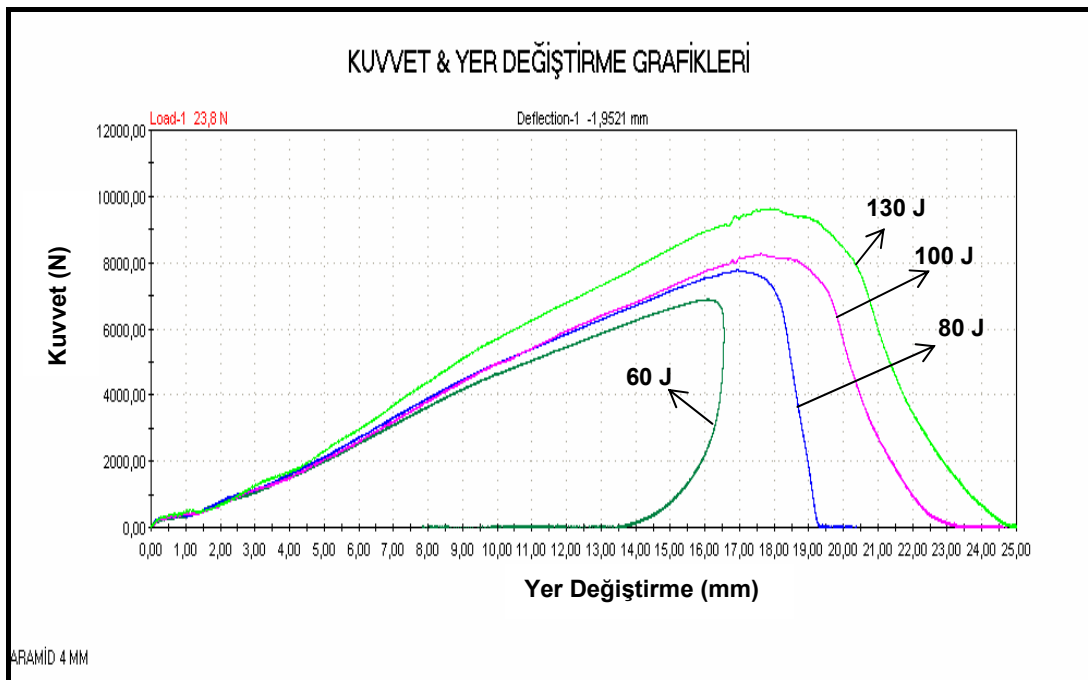
Şekil 4.37. 3,85 mm kalınlığındaki E-Cam dokuma kompozitin geri sekme, penetrasyon ve perforasyon karakterli darbe testleri

4.2.3. Aramid kompozitin (t= 4,00 mm) darbe test sonuçları

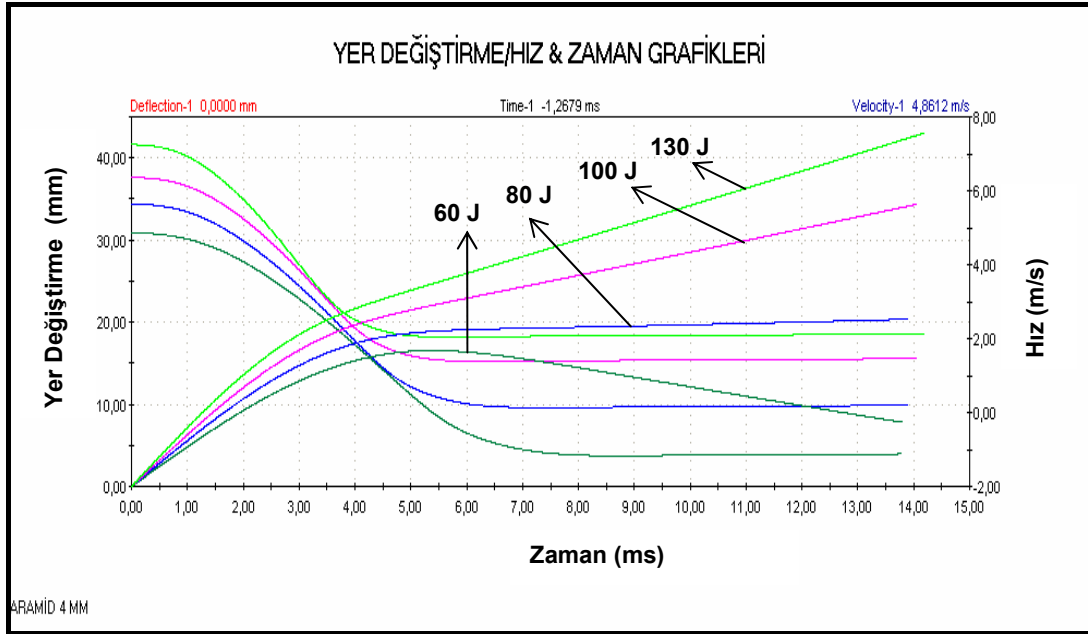
4 mm kalınlığındaki Aramid kompozitin 60, 80, 100 ve 130 J darbe enerjisiyle yapılan ağırlık düşürme testlerine ait kuvvet/enerji & zaman grafikleri Şekil 4.38'de, kuvvet & yer değiştirme grafikleri Şekil 4.39'da, yer değiştirme/hız & zaman grafikleri Şekil 4.40'da verilmiştir. Söz konusu enerji seviyelerinin hiçbirinde Aramid kompozit malzemede perforasyon meydana gelmemiştir.



Şekil 4.38. 4 mm kalınlığındaki Aramid kompozitin darbe testlerine ait kuvvet/enerji & zaman grafikleri



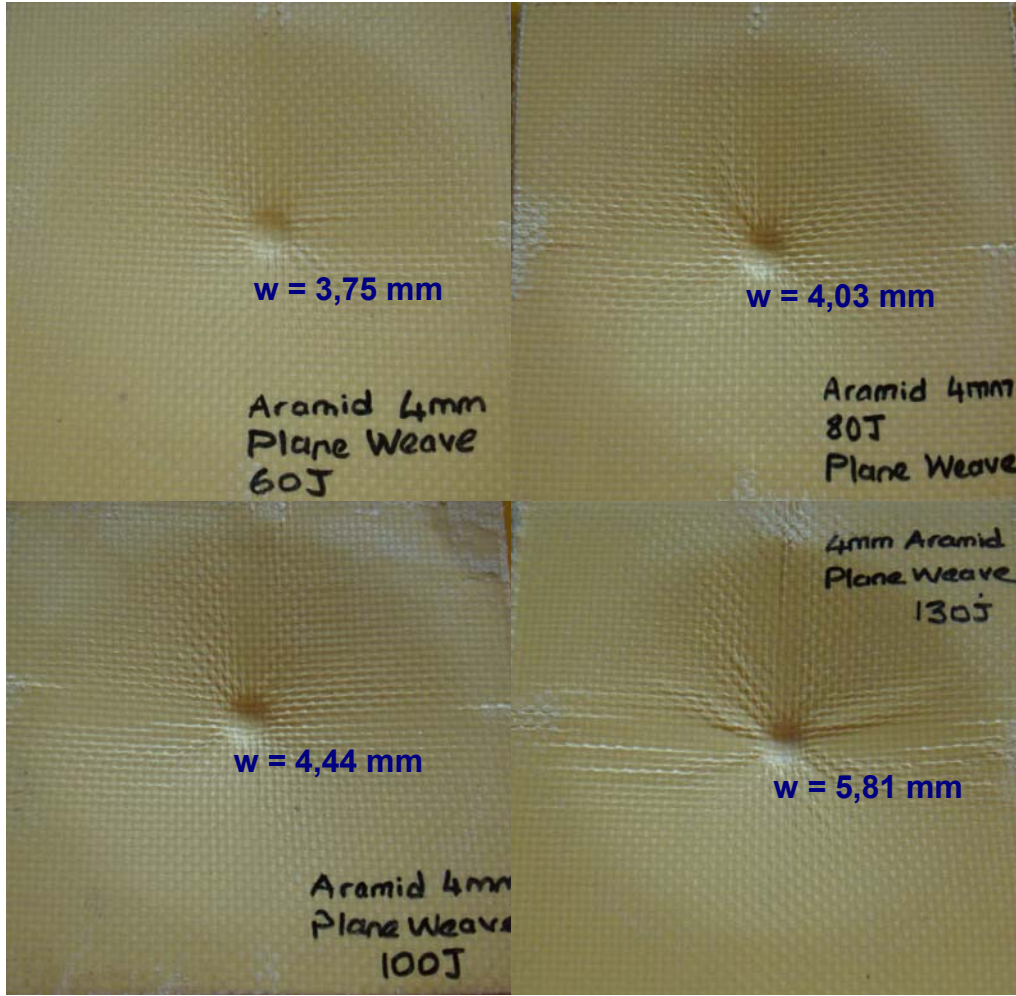
Şekil 4.39. 4 mm kalınlığındaki Aramid kompozitin darbe testlerine ait kuvvet & yer değıştirme grafikleri



Şekil 4.40. 4 mm kalınlığındaki Aramid kompozitin darbe testlerine ait yer değiştirme/hız & zaman grafikleri

Aramid kompozitin 60 J enerji ile yapılan testinde geri sekme görülmüştür. Şekil 4.39 ve Şekil 4.40'daki grafikler geri sekme davranışını açıkça göstermektedir. 60-130 J enerji aralığında yapılan testlerin tamamında aramid kompozit numunelerde plastik deformasyon meydana gelmiştir. Resim 4.23'den de görüleceği gibi darbe eksenli kalıcı deformasyon (merkezdeki çöküntü derinliği: w) artan enerji ile birlikte artmaktadır. Darbe sonrası kalıcı deformasyon kompozit numunenin bağlandığı fikstürde tutucu plaka delik çapı ile sınırlı olup Resim 4.24'deki fotoğraflarda görülen baskı izi çap ölçümleri yaklaşık olarak 78 mm'dir.

Darbe testlerinde kompozit ön yüzündeki çöküntü yakından incelendiğinde fiberlerde ve matris yapıda herhangi bir kırılma veya ayrışma görülmemektedir. Arka yüzdeki fiberlerde çekme etkisinde meydana gelen gerilmenin dışında gözle görülebilen bir hasar mevcut değildir. Aramid malzemenin düzleme dik yönde uygulanan kuvvete karşı davranışı oldukça sünektir. Şekil 4.40'dan da görüleceği gibi 130 J ile yapılan testte 43 mm'ye varan yer değiştirmeye karşılık kalıcı deformasyon sadece 5,81 mm'dir.



Resim 4.23. 4 mm kalınlığındaki Aramid kompozitin darbe testlerinde ön yüzünde meydana gelen deformasyon fotoğrafları

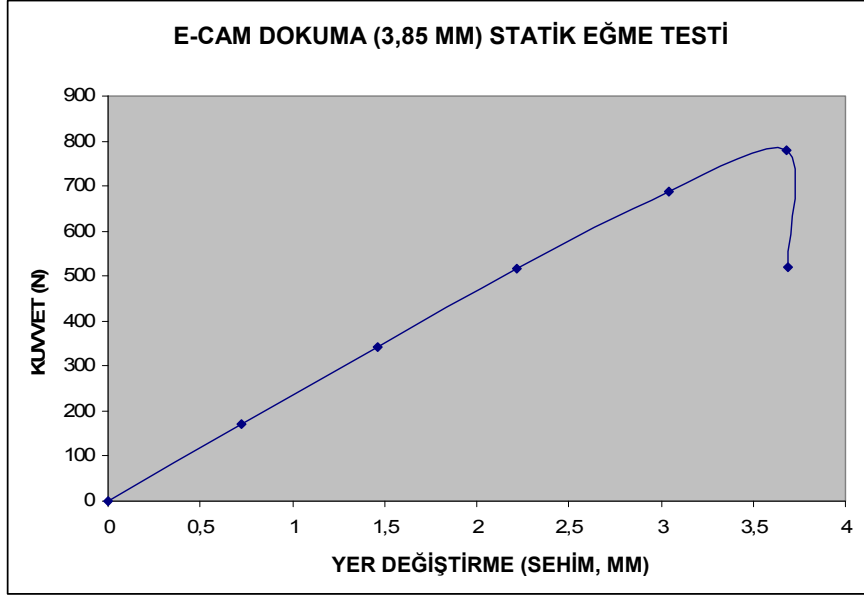
E-Cam kompozit, düzleme dik yönde uygulanan düşük enerjili darbe kuvveti altında gevrek kırılmaya maruz kalırken aramid kompozit sünek davranış göstermektedir. Üç noktadan eğme testinde 80 N düzeyinde küçük bir kuvvetin tesirinde eğilen aramid kompozit darbe yüklemesinde 10000 N büyüklüğündeki bir kuvveti taşıyabilmektedir. Aramid kompozitin plastik şekil değiştirme biçimini malzemenin bağlı olduğu sınır şartı belirlemektedir. Ağırlık düşürme testlerinde malzemedeki kalıcı deformasyon bölgesi, test düzeneğine ait olan malzeme bağlama fikstürü klapelerinin geometrisiyle sınırlanmıştır.



Resim 4.24. 4 mm kalınlığındaki Aramid kompozitin darbe testlerinde arka yüzünde meydana gelen deformasyon fotoğrafları

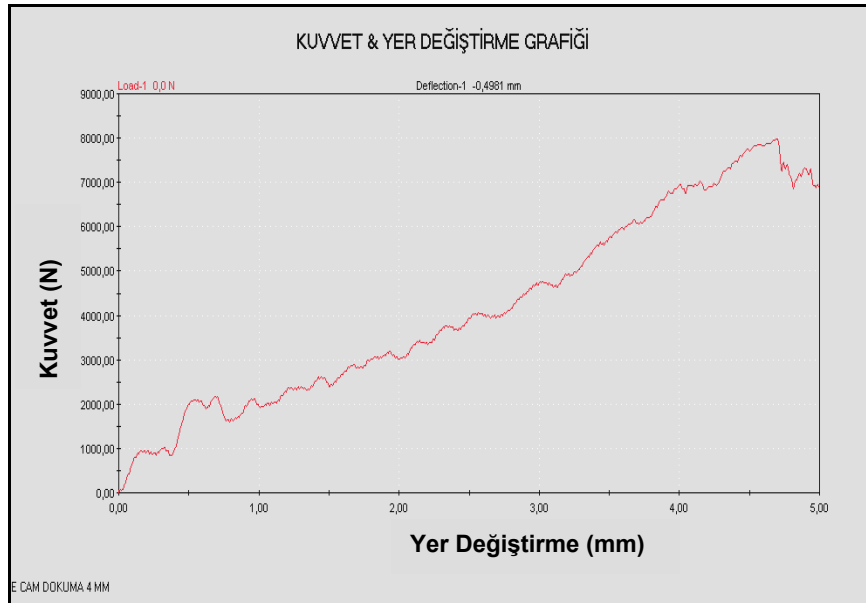
4.2.4. Üç noktadan eğme (statik) ve ağırlık düşürme (dinamik) test sonuçlarının mukayesesi

Dinamik yükleme altında, gerek dokuma gerekse tek yönlü kompozit malzemenin dayanım kuvvetinin statik yüklemeye nazaran arttığı görülmüştür. E-Cam kompozitlerde ağırlık düşürme ve üç noktadan eğme testleri sonucunda dinamik/statik dayanım kuvveti oranının 10 kata kadar çıkabildiği tespit edilmiştir. Aramid kompozitle yürütülen testlerde de benzer davranış görülmüştür. Şekil 4.41'de 3,85 mm kalınlığındaki E-Cam dokuma kompozitin statik kabul edilebilecek kadar düşük hızda yükleme ile gerçekleştirilen üç noktadan eğme testine ait kuvvet & yer değiştirme grafiği verilmiştir.



Şekil 4.41. 3,85 mm E-Cam dokuma kompozitin statik yükleme grafiği

Şekil 4.42'de ise 80 J ile ağırlık düşürme testine ait dinamik kuvvet & yer değiştirme grafiği görülmektedir. Statik ve dinamik yükleme grafikleri birlikte incelendiğinde; dinamik yükleme sonucunda bulunan kuvvet & yer değiştirme grafiğine ait ortalama eğimin statik yükleme grafiği eğiminden yedi kat büyük



Şekil 4.42. 3,85 mm E-Cam dokuma kompozitin dinamik yükleme grafiği

olduğu, dinamik yük altında kırılma öncesinde malzemenin taşıyabileceği maksimum kuvvetin ise statik yükleme durumunun on katına çıktığı görülmektedir. Bulunan sonuçlarda statik yükleme ile dinamik yüklemeye kullanılan test numunelerinin boyutlarındaki farklılık da etkili olmakla birlikte genel davranışın bu çerçevede olduğu, şekil değiştirme hızının artmasına bağlı olarak malzeme dayanımının arttığı birçok çalışmada ortaya konmuştur.

Jadhav ve Mantena (2007), otomotiv sanayinde kullanılmak üzere tasarlanan E-Cam tek yönlü kaburgalarla destekli E-Cam dokuma kompozit panellerin çarpışma tehlikesine karşı darbe dayanımını artırmayı amaçlamış, ürettikleri numuneleri statik ve dinamik yüklerle test etmişlerdir. Çalışmada önemle vurgulanan sonuçlardan birisi de dinamik yükleme durumunda kuvvet & yer değiştirme grafiği eğiminin statik yüklemeye göre 20 kat daha büyük olduğu, yük taşıma kapasitesinin ise 3 kat arttığına yönelik yapılan tespit olmuştur [85].

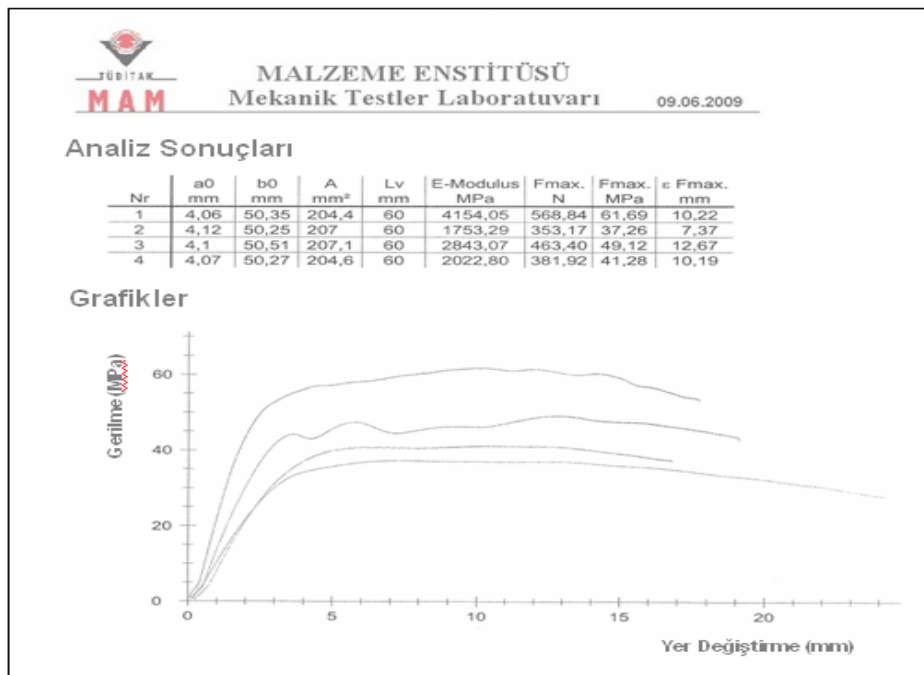
Statik ve dinamik test sonuçlarının mukayesesinde test numunesi büyüklüğü de dikkate alınarak üç noktadan eğme testlerinde standartta belirtilen büyüklüğün dışına çıkmış ve ağırlık düşürme testinde kullanılan numunelere yakın büyüklükte kompozitlerle testler tekrarlanmıştır. Test sonuçları Çizelge 4.32'de verilmiştir.

Çizelge 4.32. E-Cam düz dokuma kompozitin üç noktadan eğme test sonuçları

Test No	h (mm)	b (mm)	A (mm ²)	$\epsilon_{F_{max}}$ (mm)	F _{max} (N)
1	3,85	49,94	192,3	3,47	3216,45
2	3,86	49,80	192,2	3,46	3285,10
3	3,85	50,07	192,8	3,14	3039,17

Çizelge 4.32'deki sonuçlar dikkate alınarak dinamik ve statik yüklemeler mukayese edildiğinde grafik eğimlerinde yaklaşık 2 kat, maksimum yükleme dayanımında ise yaklaşık 2,5 kat fark olduğu görülmüştür.

Dinamik test numunelerine yakın boyutlardaki aramid kompozit malzeme ile yapılan üç noktadan eğme testlerine ait grafikler ve analiz sonuçları Şekil 4.43'de verilmiştir. Bu sonuçlar ağırlık düşürme testlerinde bulunan kompozit malzemeye ait dayanım kuvvetinin statik yükleme durumundan 20 kat, kuvvet & yer değiştirme grafiklerine ait ortalama eğimin ise yaklaşık 10 kat daha büyük olduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 4.43. 4 mm Aramid kompozitin statik üç noktadan eğme testleri

4.2.5. Aramid, E-Cam tek yönlü ve dokuma kompozitlerin darbe test sonuçlarının mukayesesi

4 mm E-Cam tek yönlü kompozit ile 3,85 mm E-Cam düz dokuma kompozitin düşük hızlı darbe test sonuçları karşılaştırıldığında; takviye malzeme olarak kullanılan cam elyaf yoğunluğu ve kompozit yapımında kullanılan cam elyaf

kumaşların geometrik şekline bağlı olarak kompozit malzemenin taşıyabileceği darbe kuvveti değişmektedir. Fiber ağırlık oranı %10 daha fazla olan düz dokuma (örgü) tip kompozit malzemede kritik kuvvet eşik değerlerinin tek yönlü fiber takviyeli kompozit malzemeye göre daha yüksek olduğu görülmüştür (Çizelge 4.33).

Çizelge 4.33. 3,85 mm E-Cam dokuma ile 4 mm tek yönlü kompozitin penetrasyon, perforasyon ve kritik kuvvet değerleri

Kompozit Malzeme	Hertz Kontak Kuvveti (N)	Maksimum Perforasyon Kuvveti (N)	Penetrasyon Enerjisi (J)	Perforasyon Enerjisi (J)
E-Cam Dokuma	2040,1	8243,9	40,00	50,604
E-Cam Tek Yönlü	1371,4	5713,2	30,00	38,825

Çizelge 4.33’de verilen 3,85 mm kalınlığındaki dokuma tip E-Cam takviyeli kompozit ile 4 mm kalınlığındaki tek yönlü E-Cam takviyeli kompozitin penetrasyon, perforasyon ve kritik kuvvet değerleri mukayese edildiğinde; lokal Hertz gerilmelerine bağlı olarak gelişen Hertz hasarı eşik değerinin dokuma kompozit için tek yönlü kompozite göre yaklaşık olarak % 48 seviyesinde, kompozit malzemenin taşıyabileceği maksimum yükün % 43 seviyesinde, penetrasyon eşik enerjisinin % 33 seviyesinde, perforasyon eşik enerjisinin ise %38 seviyesinde daha yüksek olduğu anlaşılmaktadır.

Kompozit malzemelere uygulanan ve sonuçları Bölüm 4.1.1’de verilen üç noktadan eğme testlerinde; $\sigma_{\max(\text{dokuma})} = 449 \text{ MPa}$ ve $\sigma_{\max(\text{tek yönlü})} = 625 \text{ MPa}$ bulunmuştur. Bu sonuçlara göre statik yükleme durumunda dokuma kompozit malzemenin mukavemeti (eğilme dayanımı) tek yönlü kompozitin mukavemetinin yaklaşık olarak % 70’i kadardır.

Statik yükleme durumunda tek yönlü kumaştan imal edilmiş kompozit malzeme daha büyük kuvvet taşıma kapasitesine sahip iken dinamik yüklemelerde durum tam tersini ortaya koymaktadır. Dokuma kumaştan imal kompozit malzemenin ağırlık düşürme testinde taşıyabileceği maksimum yük

tek yönlü kompozit malzemenin taşıyabileceği yükün yaklaşık olarak % 44'ü kadar daha fazladır (Çizelge 4.33).

Tam penetrasyon yani perforasyon sınırındaki ağırlık düşürme testlerinden en düşük perforasyon hızının \pm %20 aralığında bulunan eşit sayıda tam nüfuziyet sağlayan (tam delme) ve sağlayamayan (kısmi delme) testlerin ortalamasının alınması suretiyle düşük hızlı darbe testlerine ait V_{50} limit değerleri bulunabilir. Çizelge 4.34'de tek yönlü ve dokuma kumaşlardan imal kompozit malzemelerin kısmi penetrasyon ve tam penetrasyon durumuna ait darbe hızları verilmiştir. Tek yönlü kompozitin tam penetrasyon sağlayan en küçük darbe hızı 2,7784 m/s'dir. Dolayısıyla V_{50} limit hız hesaplamasında perforasyonla sonuçlanan ilk hızın \pm %20 aralığı olarak [2,2227-3,3341] m/s bulunmuştur. Dokuma kompozit için bu aralık [2,4517-3,6775] m/s'dir.

Tek yönlü E-Cam kompozitin [2,2227-3,3341] aralığında, Çizelge 4.34'de verilen, 4 adeti kısmi penetrasyon, 4 adeti tam penetrasyonla sonuçlanan 8 adet ağırlık düşürme testine ait hız değerlerinin ortalaması alınarak $V_{50_E-CamTekYönlü} = 2,755$ m/s bulunmuştur. Dokuma E-Cam kompozitin [2,4517-3,6775] aralığındaki eşit sayıdaki kısmi ve tam penetrasyon sonuçlu toplam 8 adet ağırlık düşürme testine ait hız değerlerinin ortalaması alınarak $V_{50_E-CamDokuma} = 3,108$ m/s bulunmuştur.

Çizelge 4.34. Ağırlık düşürme testlerine ait V_{50} hızları

Tek Yönlü E-Cam		Kısmi Penetrasyon				Tam Penetrasyon (Perforasyon)				
		E_d (J)	30	32,5	35	37,5	39	40	45	50
	V_{imp} (m/s)	2,4349	2,5336	2,6312	2,7231	2,7784	2,8136	2,9809	3,1445	
	V_{50} (m/s)	2,755								
Dokuma E-Cam		Kısmi Penetrasyon				Tam Penetrasyon (Perforasyon)				
		E_d (J)	40	42,5	45	47,5	50	52,5	55	60
		V_{imp} (m/s)	2,8103	2,8991	2,9832	3,0646	3,1435	3,2222	3,2935	3,4459
		V_{50} (m/s)	3,108							

Dokuma ve tek yönlü kumaşların düşük enerjili darbe hız limitlerinin oranı,

$V_{50_E-CamDokuma} / V_{50_E-CamTek\ Yönlü} = 1,128$ bulunmuştur. Dokuma tip kompozitle tek yönlü kompozitin V_{50} düşük enerjili darbe limit değerleri arasında %12,8 fark bulunmuştur.

Aramid kompozitle yapılan testlerin hiçbirinde penetrasyon oluşmamıştır. Ağırlık düşürme test sisteminin müsaade ettiği maksimum yükleme (15 kN) altında aramid kompozit elastik, plastik şekil değiştirme ve kompozitin ön ve arka yüzlerinde hiçbir şekilde ayrılmaya neden olmayan iç tabakalarda oluşan küçük delaminasyonlarla darbe enerjisini absorbe etmiştir.

Bulunan sonuçlar ve yapılan mukayese çerçevesinde; dokuma ve tek yönlü kumaşlardan imal edilen kompozitlerin düzleme dik yönde etki eden yükler altındaki davranışına ilişkin önemli çıkarımlar aşağıda verilmiştir:

(1) Tek yönlü cam elyaf kumaştan [0/90] dizilişte üretilen kompozitlerin aynı kalınlıktaki dokuma kumaştan üretilen kompozitlere göre statik olarak mukavemeti daha yüksektir. Bu nedenle statik yükleme altında tek yönlü kumaşlardan üretilen kompozit malzemenin taşıyabileceği maksimum kuvvet değeri aynı kalınlıktaki dokuma kumaştan üretilen kompozite göre daha büyüktür.

(2) Ağırlık düşürme testleriyle gerçekleştirilen düşük enerjili darbe testlerini kapsayan dinamik yükleme durumunda ise ilk maddedeki tespitin tam tersi geçerlidir. E-Cam dokuma kumaştan imal edilen kompozitlerin dayanımı dinamik yükleme altında aynı kalınlıktaki E-Cam tek yönlü kumaştan imal edilen kompozitlere göre daha iyidir. Dokuma kumaştan üretilen kompozit malzemenin taşıyabileceği dinamik kuvvet (düşük enerjili darbe yükü) tek yönlü kumaştan üretilen kompozite göre daha yüksektir.

(3) Cam elyaf dokuma kumaştan imal edilen kompozitlerin düşük enerjili darbe hız limiti aynı kalınlıktaki tek yönlü cam elyaf kumaştan [0/90] dizilişte üretilen kompozitlerin darbe hız limitinden daha yüksektir.

(4) Darbe sonucu ortaya çıkan hasar ve tabakalar arası delaminasyonların ve fiber kırılmalarının dokuma kumaştan üretilmiş kompozitlerde atkı ve çözgü ipliklerinin oluşturduğu hücre yapısı içerisinde hapsoldüğü, hücre dışına doğru fazla gelişemediği görülmüştür. Bu nedenle aynı darbe enerjisiyle gerçekleştirilen ağırlık düşürme testlerinde cam elyaf dokuma kumaştan imal kompozitlerde darbe hasar alanının tek yönlü cam elyaf kumaştan imal edilen kompozitlere nazaran daha küçük olduğu tespit edilmiştir.

(5) E-Cam dokuma veya tek yönlü kompozitlerde perforasyon oluşturan enerji seviyelerinin üç katı seviyesindeki darbe enerjisiyle gerçekleştirilen ağırlık düşürme testlerinde Aramid kompozitte darbe hasarının belli bir alanda lokalize olmuş plastik deformasyondan ibaret olduğu, penetrasyonun bile oluşmadığı görülmüştür.

(6) İlk beş maddede yer alan tespitler çerçevesinde balistik uygulamalarda dokuma kumaş yapısının tek yönlü [0/90] konfigürasyona göre daha etkin koruma sağlayacağı ve Aramid kumaşın balistik performansının E-Cam kumaştan daha iyi olacağı değerlendirilmiştir. Buna ilişkin detaylı mukayese balistik test sonuçlarında yer almaktadır.

4.2.6. Alumina, bor karbür ve silisyum karbür seramik plakaların darbe test sonuçları

Bu tez kapsamında alumina, bor karbür ve silisyum karbür seramik plakaların düşük enerjili darbe testleri yürütülmüş; sonuçlar enerji seviyelerine bağlı olarak gelişen kırılmalar ve numunelere etki eden darbe kuvvetleri açısından değerlendirilmiştir. Seramiklerin darbe özelliklerine, üretim maliyet etkinliğine göre balistik uygulamalarda tercih nedeni ve ihtiyaca uygun kullanım yeri ve durumu belirlenmiştir. Düşük enerjili darbe testlerindeki kırılma hadisesi balistik testlerdeki kırılma ile de mukayese edilmiştir. Seramiklerin zırh sistemi içerisine kenarları destekli olarak yerleştirilmesinin balistik korumaya olan etkisi incelenmiştir.

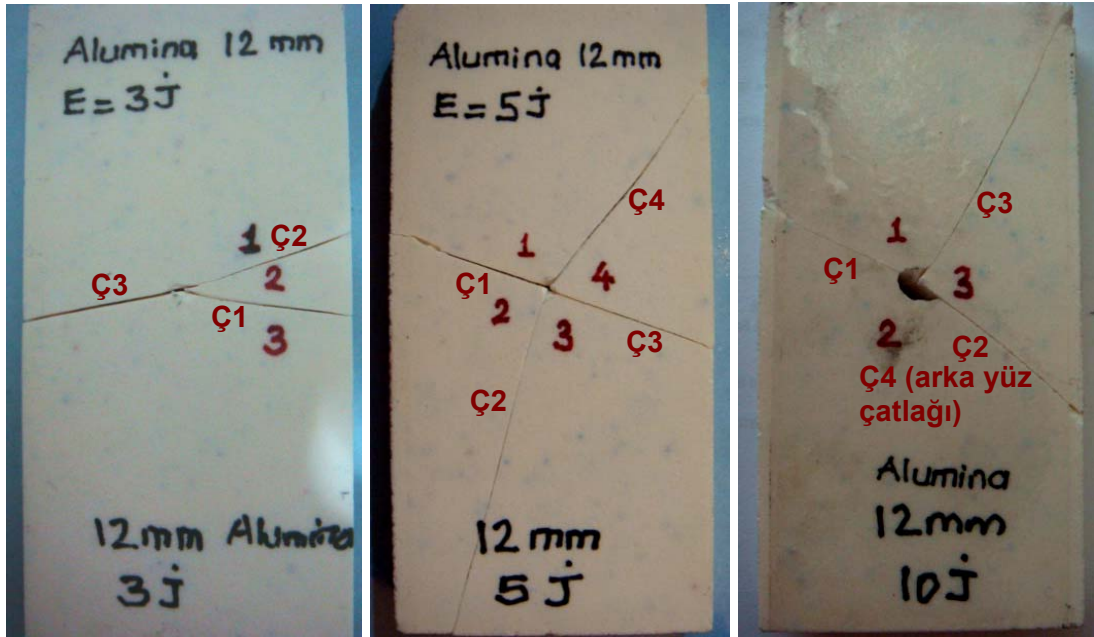
Alumina seramik plakaların darbe test sonuçları

Seramik malzemenin ağırlık düşürme testlerinde kompozit malzemede olduğu gibi darbe enerjisine bağlı olarak geri sekme, penetrasyon ve perforasyon davranışı tespit edilmiştir. Ancak seramiğin oldukça kırılğan yapısına bağlı olarak geri sekme durumunda dahi malzemede kırılmaların etkili olduğu görülmüştür.

Geri sekme karakterli, oldukça düşük darbe enerjisi ile yapılan ağırlık düşürme testlerinde seramiğin ön yüzünde meydana gelen kırılma yapısının seramik kalınlığı boyunca gelişerek arka yüzünde de aynı şekilde devam ettiği (Resim 4.25 (a:b) ve Resim 4.26 (a:b)'da yer alan 12 mm kalınlığındaki alumina fotoğraflarında görüldüğü gibi) tespit edilmiştir. Darbe ucunun hemen altında oluşan darbe çentiğinin dışında delinme şeklinde bir kırılmanın oluşmadığı görülmüştür. 12 mm kalınlığındaki alumina seramiğin 5 J darbe enerjisi ile gerçekleştirilen geri sekme karakterli ağırlık düşürme testlerine ait kuvvet/enerji & zaman grafikleri Şekil 4.44'de, kuvvet/enerji & yer değiştirme grafikleri Şekil 4.45'de verilmiştir.

Şekil 4.44'deki grafik incelendiğinde H noktasında yarı küresel darbe ucu ile sert seramik yüzeyin temasından kaynaklanan Hertz kontak gerilmelerinin tesiri altında ilk çatlak oluşumu meydana gelmektedir. Hertz kontak hasarına yol açan kuvvet büyüklüğü $F_H = 4099,1$ N olarak ölçülmüştür.

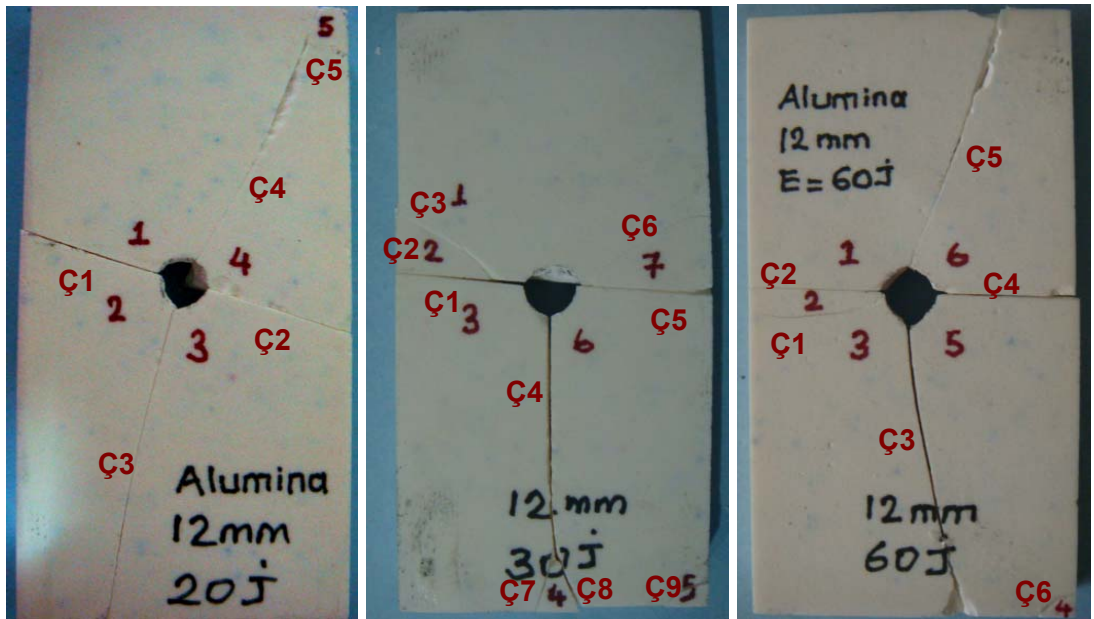
Seramik malzemede başlangıçta elastik şekil değiştirme görülmektedir. Darbe enerjisinin malzemeye aktarılmasıyla birlikte Şekil 4.44'deki kuvvet grafiğinin H – 1 aralığında çatlak ilerlemesi ve gelişimi devam etmekte, ortaya çıkan darbe kuvvetinin atomlar arasındaki çekim kuvvetini yenmesiyle birlikte 1 noktasında kırılma meydana gelmektedir. Darbe enerjisinin belli bir miktarının kırılma yüzeyinin oluşması için harcanmasına bağlı olarak kuvvet grafiğinde çok ani bir düşüş olmuştur (Şekil 4.44: Nokta 2).



(a)

(b)

(c)



(d)

(e)

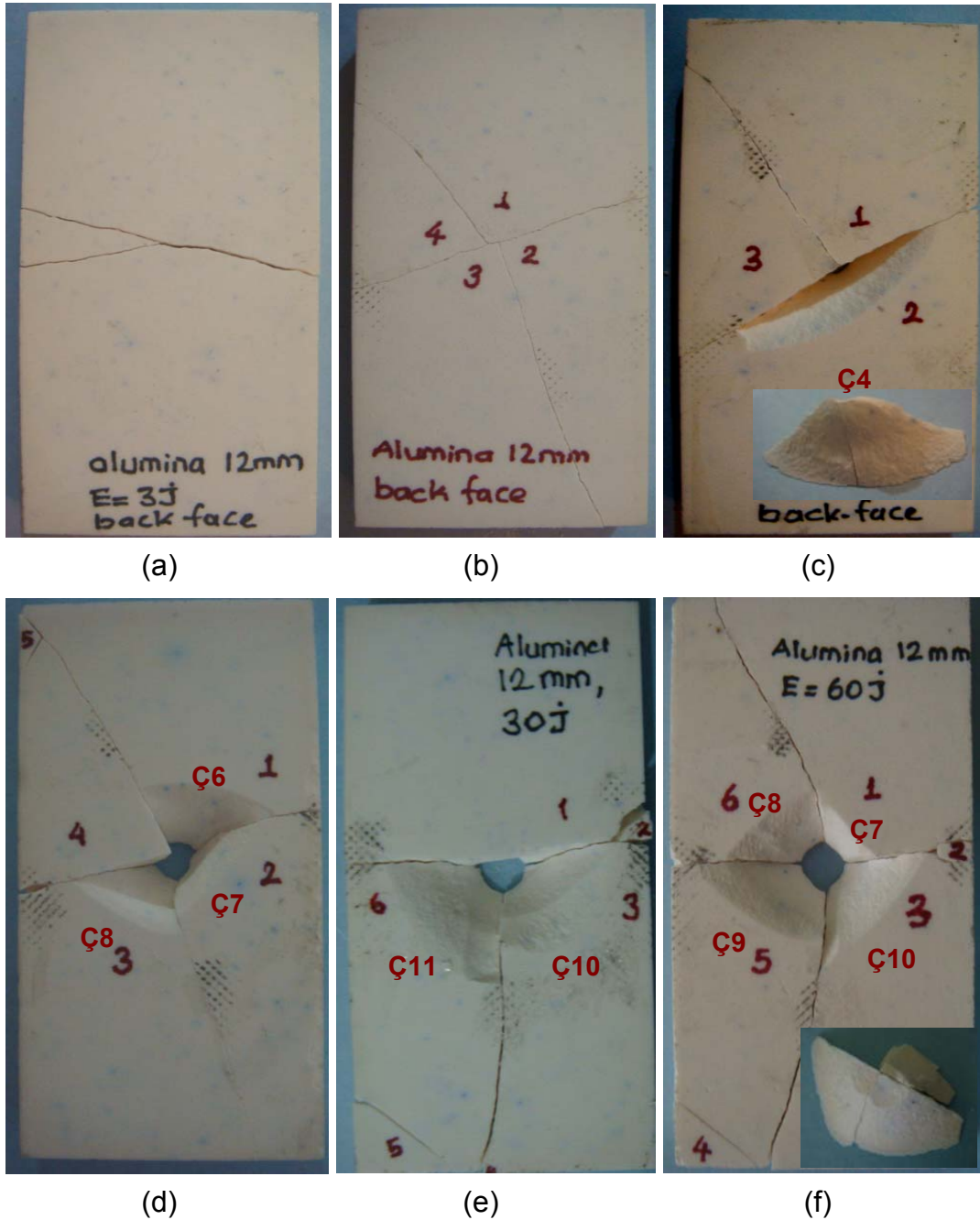
(f)

Resim 4.25. 12 mm Aluminanın 3-60 J darbe enerjileriyle ağırlık düşürme testlerine ait seramik ön yüz fotoğrafları

(a) $E_d = 3$ J, (b) $E_d = 5$ J, (c) $E_d = 10$ J, (d) $E_d = 20$ J, (e) $E_d = 30$ J, (f) $E_d = 60$ J

Şekil 4.44'de 1 noktasında oluşan ilk kırılma yüzeyine rağmen seramik malzeme rijit ve bütün bir malzeme olarak deformasyona devam etmiştir. Kırılma sonrasında belli bir hızla ve enerjiyle altındaki seramik plaka ile

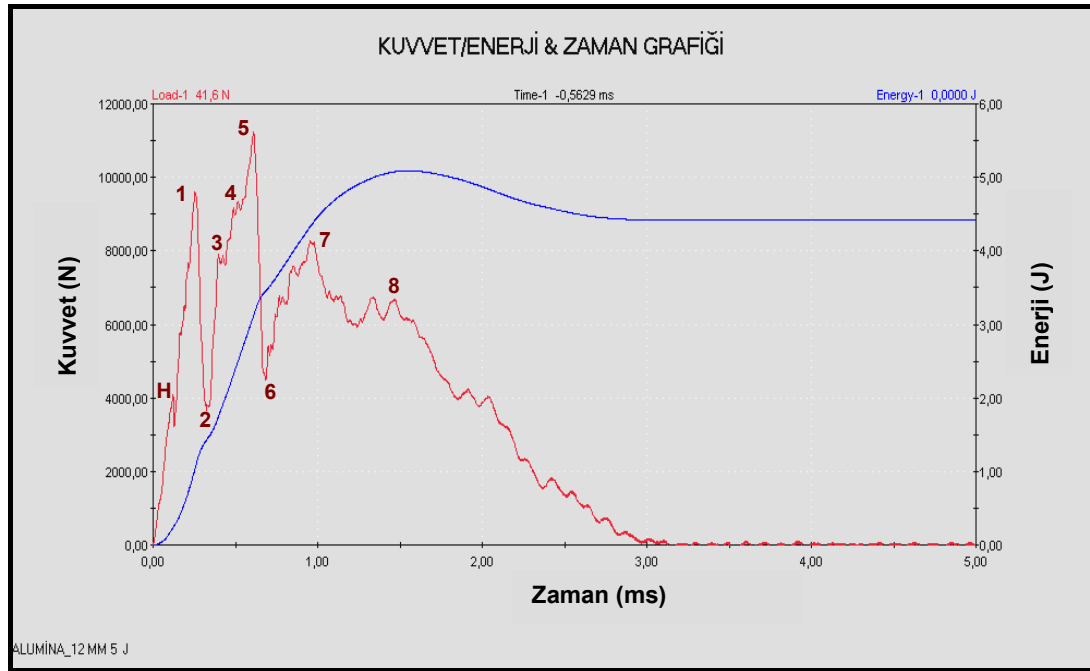
birlikte hareketine devam eden darbe ucunun malzemeye uyguladığı kuvvetin yeniden artmaya başladığı görülmektedir. Grafikte yer alan 3 ve 4 noktaları yeni çatlak oluşumu ve gelişiminin etkili olduğu bölgeye karşılık gelmektedir.



Resim 4.26. 12 mm Aluminanın 3-60 J darbe enerjileriyle ağırlık düşürme testlerine ait seramik arka yüz fotoğrafları
(a) $E_d= 3$ J, (b) $E_d= 5$ J, (c) $E_d= 10$ J, (d) $E_d= 20$ J, (e) $E_d= 30$ J, (f) $E_d= 60$ J

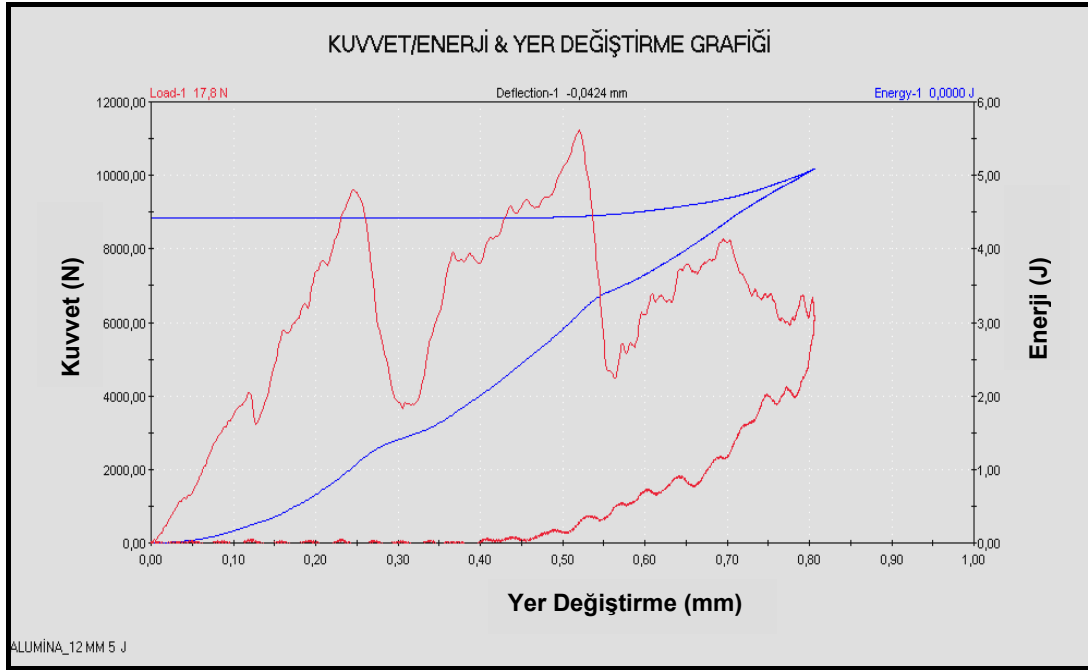
Darbe kuvveti artarak 5 noktasına gelindiğinde ise yeni bir kırılma yüzeyinin oluşması için gerekli doyum enerjisine ulaşılmıştır. Grafikteki 7 nolu noktada meydana gelen kırılma da 5 noktasına benzer şekilde oluşmaktadır.

8 noktasında oluşan kırılma maksimum enerji noktasına karşılık gelmekte olup Şekil 4.45'den de görüleceği gibi bu nokta aynı zamanda maksimum deformasyon noktasıdır ve sonrasında geri sekme olayı yaşanmaktadır. Maksimum deformasyon noktasına kadar olan süreçte seramik ön yüzündeki çatlaklar basma zorlaması altında iken geri sekme ile birlikte çekme gerilmeleri etkili olmaktadır. Bu durum ise çatlak açılması şeklinde tesir ederek çatlak gelişimi ve kırılmalarını hızlandırmış, sonuçta malzeme bütünlüğünü koruyamamıştır.

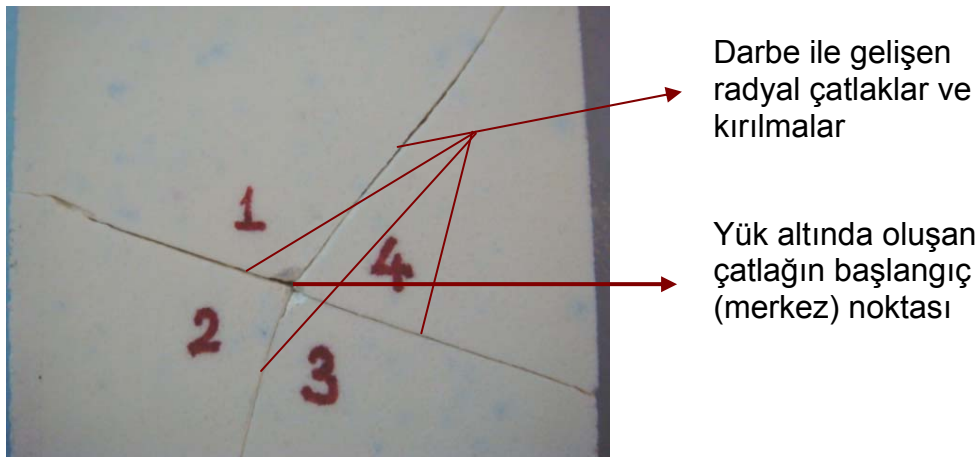


Şekil 4.44. 12 mm kalınlığındaki alumina seramik plakanın ağırlık düşürme testlerine ait kuvvet/enerji & zaman grafikleri ($E_d=5$ J)

Kuvvet grafiğindeki her ani düşüş muhtemel yeni bir kırılma yüzeyinin oluşmasına karşılık gelmektedir. Resim 4.27'de darbe merkezinde meydana gelen çentik ile etrafında gelişen radyal kırılmalar görülmektedir.



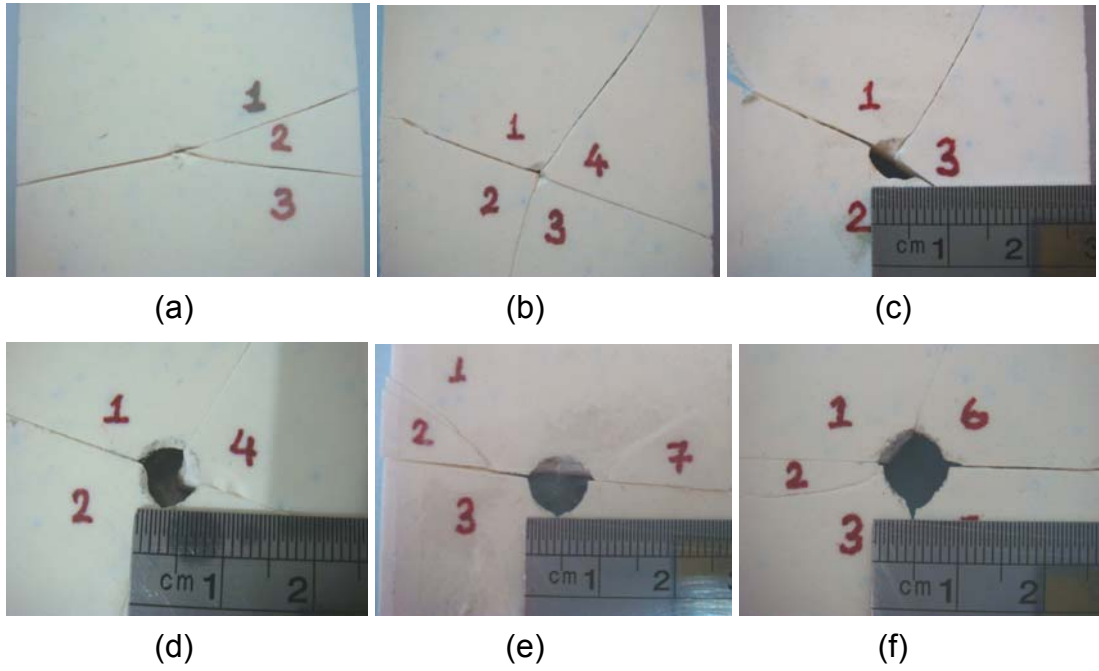
Şekil 4.45. 12 mm kalınlığındaki alumina seramik plakanın ağırlık düşürme testlerine ait kuvvet/enerji & yer değıştirme grafikleri ($E_d = 5 \text{ J}$)



Resim 4.27. 12 mm kalınlıkta Alumina seramiğın 5 J darbe enerjisi ile yüklenmesi neticesinde oluşan kırılmalar

Resim 4.28'den açıkça görüldüğü gibi artan darbe enerjisi ile birlikte hem kırılan yüzey alanı hem de oluşan çentik/penetrasyon deliği çapı artmaktadır. Geri sekme karakterli enerji aralığında ön yüzde darbe ucunun hemen altında küçük ölçüde çentik meydana gelmiştir. Penetrasyon karakterli darbe

testlerinde $E_d= 10$ J darbe enerjisinde penetrasyon deliği yarım oluşmuş iken $E_d= 20$ J ve $E_d= 30$ J darbe enerjilerinde tam deliğe yakın kırılma meydana gelmiştir. Perforasyon karakterli darbe testlerinde ($E_d= 60$ J) tam delik oluşumu gözlemlenmiştir.

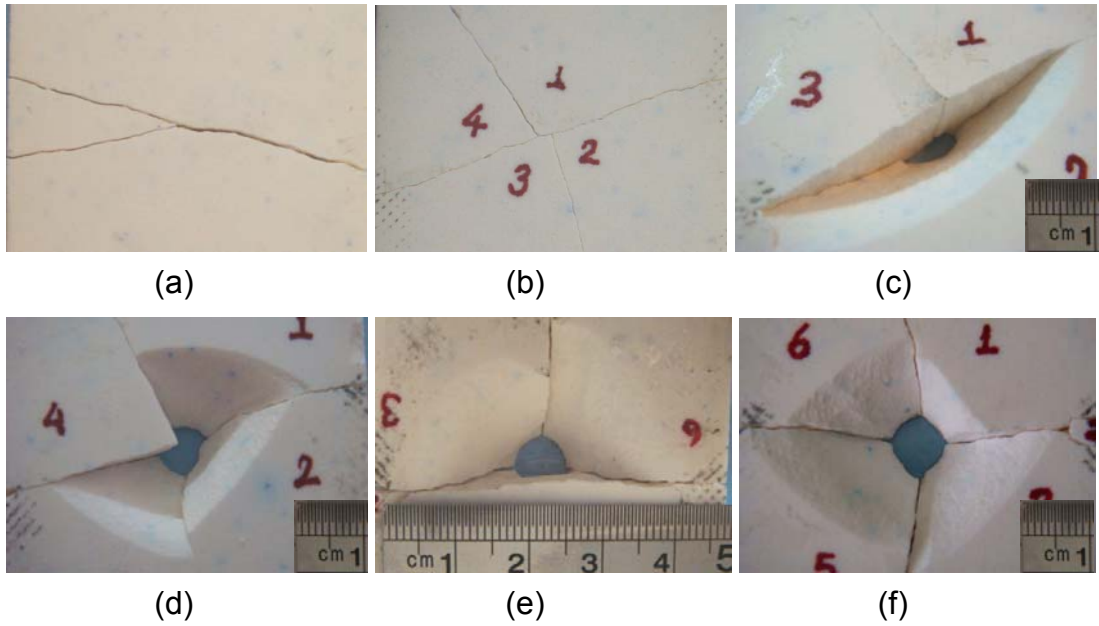


Resim 4.28. 12 mm Alumina seramiğin [3:60] J darbe enerjisi aralığında ön yüzünde oluşan çentik/penetrasyon hasar çaplarının ölçümü (a) $E_d= 3$ J, (b) $E_d= 5$ J, (c) $E_d= 10$ J, (d) $E_d= 20$ J, (e) $E_d= 30$ J, (f) $E_d= 60$ J

Resim 4.29 incelendiğinde, geri sekme karakterli darbe testlerinde seramik arka yüzünden kopan parçacık olmadığı görülmektedir. Penetrasyon karakterli darbe testlerinde, düşük enerji seviyelerinde küçük konik açılı yarım koni şeklinde parçacık kopması oluşmakta, artan enerji seviyesi ile birlikte koniklik açısı artmaktadır (Resim 4.29 (c:e)). Perforasyon özellikli testlerde ise seramik malzeme kalınlığı ve darbe ucu çapına bağlı belli bir koniklik açısına sahip tam koni şeklinde kırılmalar tespit edilmiştir (Resim 4.29 (f)).

Seramik malzemeye uygulanan darbe enerjisinin artmasıyla birlikte yeni kırılma yüzeylerinin oluşması için gerekli enerji sağlanmakta, böylece daha

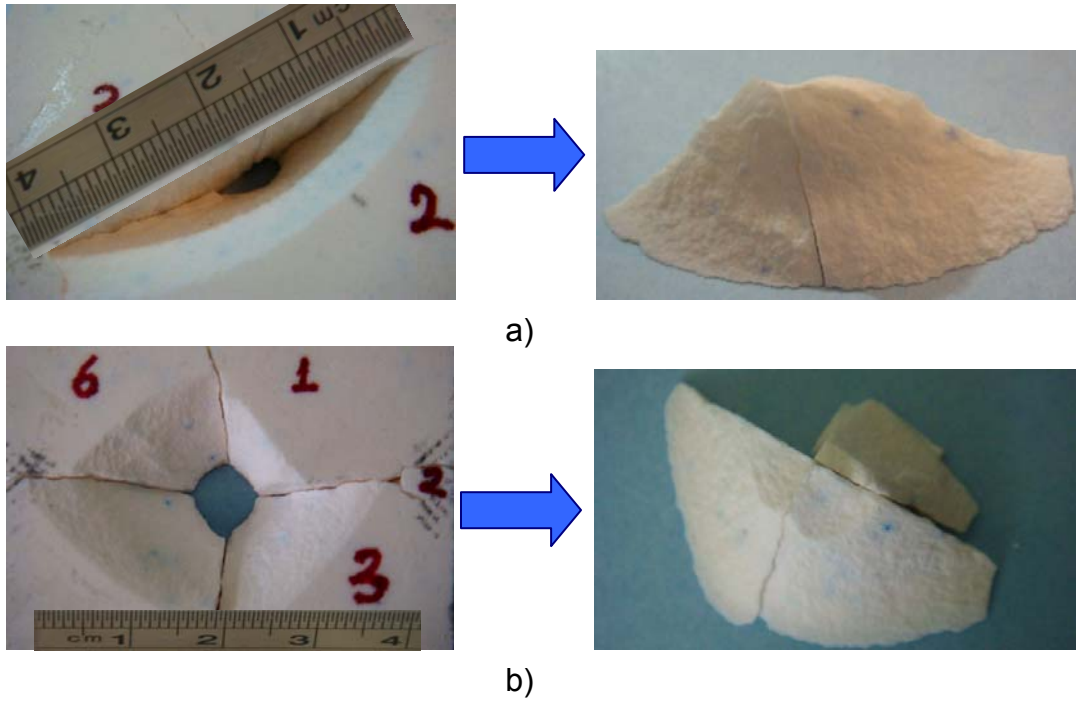
büyük alanlı koni oluşumu gerçekleşmektedir (Resim 4.30). Seramik ön yüzde radyal çatlakların başlattığı radyal kırılmalar söz konusu iken arka yüzde radyal kırılmalara ilave olarak darbe merkezli gelişen teğetsel kırılmaların da etkili olduğu, teğetsel kırılmaların neticesinde ise konik kırılma yapısının oluştuğu açıktır.



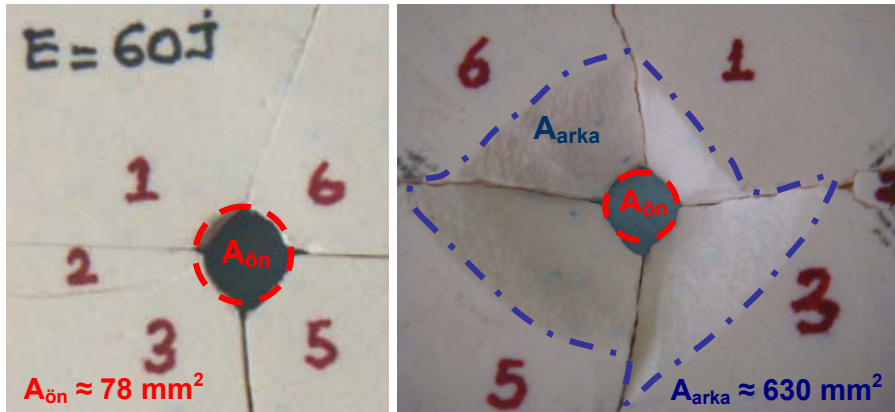
Resim 4.29. 12 mm Alumina seramiğin [3:60] J darbe enerjisi aralığında arka yüzünde oluşan hasar alanı büyüklükleri
 (a) $E_d= 3$ J, (b) $E_d= 5$ J, (c) $E_d= 10$ J, (d) $E_d= 20$ J, (e) $E_d= 30$ J,
 (f) $E_d= 60$ J

Seramiğin darbe altında göstermiş olduğu konik kırılma davranışı seramik kompozit zırh sistemlerinde pozitif olarak kullanılmaktadır. Merminin seramik ön yüze isabetinde küçük bir alana etki eden darbe kuvveti seramik arkasındaki destek plakaya iletilirken daha geniş bir alana yayılmakta dolayısıyla malzeme içerisinde oluşan gerilmeler azalmaktadır.

Alumina seramiğin 60 J darbe enerjisi ile yapılan ağırlık düşürme testinde darbe kuvvetinin etki ettiği ön ve arka yüz alanları Resim 4.31'de görülmektedir. Seramikte meydana gelen konik kırığın arka yüzüne ait kesit alanı ön yüz alanının yaklaşık olarak 8 katı büyüklüğündedir.



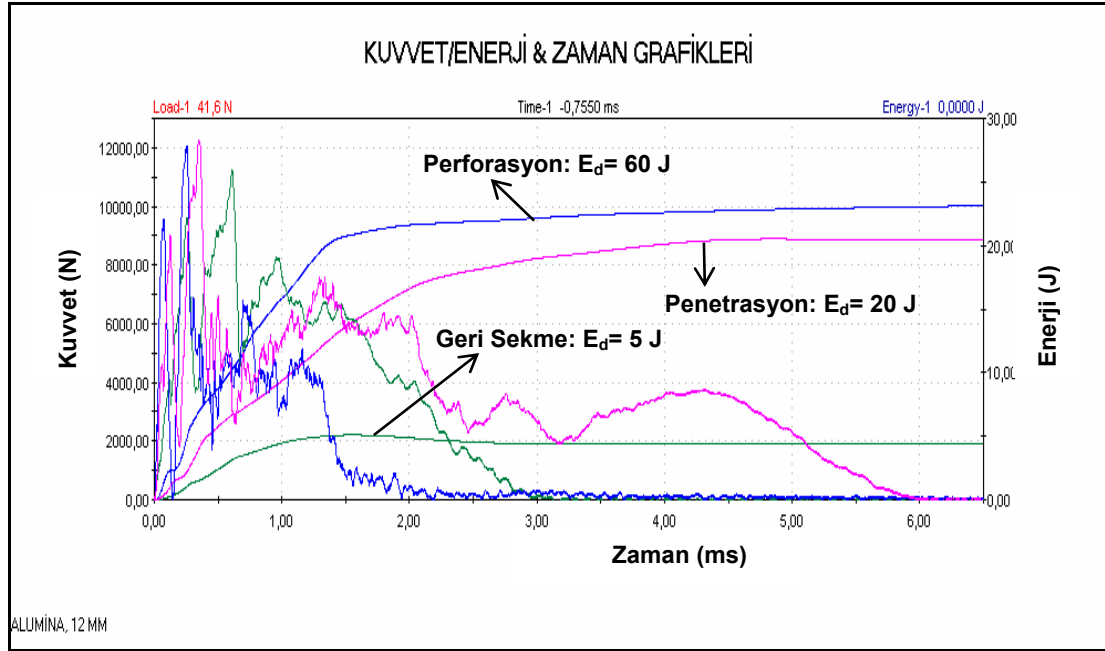
Resim 4.30. 12 mm Alumina seramiğin 10 J ve 60 J ile darbe testlerinde arka yüzünde oluşan konik kırılma fotoğrafları
(a) $E_d= 10$ J, (b) $E_d= 60$ J



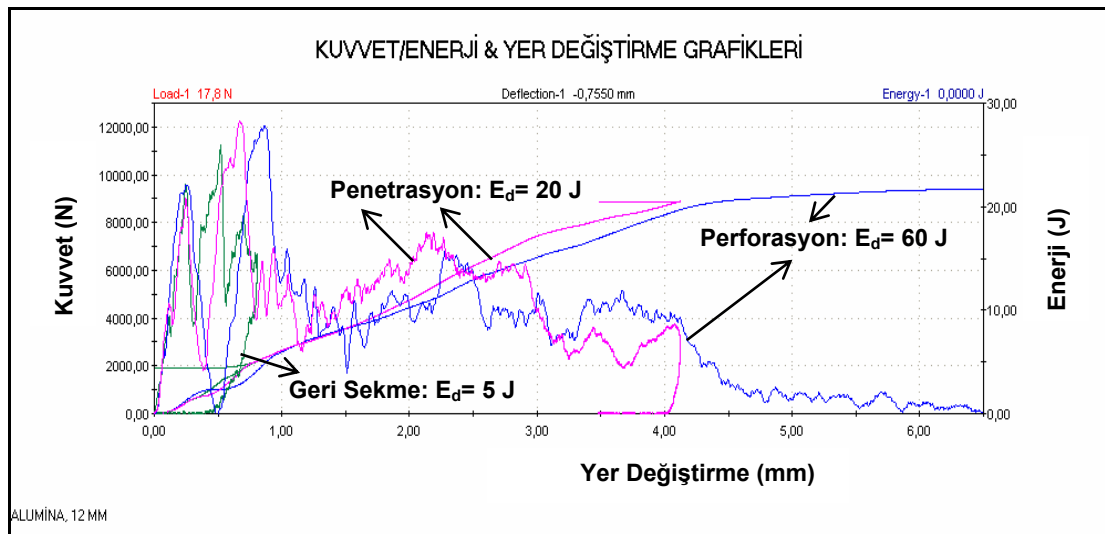
Resim 4.31. 12 mm Alumina seramiğin 60 J ile darbe testinde darbe kuvvetinin ön ve arka yüzlerdeki etki alanı

Alumina seramiğin geri sekme, penetrasyon ve perforasyon karakterli darbe testlerine ait kuvvet/enerji & zaman grafikleri Şekil 4.46'da, kuvvet/enerji & yer değiştirme grafikleri Şekil 4.47'de verilmiştir.

Geri sekme, penetrasyon ve perforasyon ile sonuçlanan testlerin tamamında seramik malzemeye etki eden maksimum kuvvet değerlerinin birbirlerine oldukça yakın ve $F_{max} = 12000$ N civarında olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.46. 12 mm kalınlığındaki alumina seramik plakanın ağırlık düşürme testlerine ait kuvvet/enerji & zaman grafikleri



Şekil 4.47. 12 mm kalınlığındaki alumina seramik plakanın ağırlık düşürme testlerine ait kuvvet/enerji & yer değişirme grafikleri

Resim 4.29 ve Resim 4.30'deki fotoğraflarda görülen ve $E_d = 3$ J ile 60 J enerji aralığındaki testlere ilişkin kırıkların uzunlukları ile kırık yüzey alanları ölçülerek bulunan değerler Çizelge 4.35'de verilmiştir.

Çizelge 4.35. 12 mm Alumina seramiğin $E_d = [3:60]$ J darbe enerjisi ile ağırlık düşürme testlerinde oluşan kırılma uzunluk ve yüzey alanları

Darbe Enerjisi (J)	Kırık Uzunluğu (mm)				Toplam Kırık Uzunluğu (mm)	Toplam Kırık Alanı (mm ²)	Kırık Yüzey Alanı (mm ²)
	Ç1	Ç2	Ç3	Ç4			
$E_d = 3$ J	Ç1	Ç2	Ç3	Ç4	76,81	937,082	1874,164
	24,88	26,67	25,26	-			
$E_d = 5$ J	Ç1	Ç2	Ç3	Ç4	149,98	1822,257	3644,51
	25,31	56,51	27,18	40,98			
$E_d = 10$ J	Ç1	Ç2	Ç3	Ç4	159,24	1739,86	3479,72
	27,22	32,32	51,49	37,91			
$E_d = 20$ J	Ç1	Ç2	Ç3	Ç4	226,83	2396,48	4792,96
	27,22	32,32	51,49	37,91			
	Ç5	Ç6	Ç7	Ç8			
	7,83	21,4	21,98	19,4			
$E_d = 30$ J	Ç1	Ç2	Ç3	Ç4	247,97	2888,09	5776,18
	24,22	19,88	21,37	44,03			
	Ç5	Ç6	Ç7	Ç8			
	25,78	23,6	9,82	9,82			
	Ç9	Ç10	Ç11				
	16,41	25,68	27,36				
$E_d = 60$ J	Ç1	Ç2	Ç3	Ç4	276,02	2966,72	5933,44
	24,07	24,46	53,68	25,23			
	Ç5	Ç6	Ç7	Ç8			
	49,43	16,6	14,67	19,42			
	Ç9	Ç10					
	21,99	26,47					

$E_d = 3$ J ile 60 J arasında yürütülen düşük enerjili darbe testlerinde yaklaşık 12 mm kalınlıktaki Alumina seramiklerde oluşan kırılmalara ait yüzey alanları ölçülerek birim alan başına düşen enerji miktarları hesaplanmıştır. Bulunan sonuçlar Çizelge 4.36'da görülmektedir.

Ağırlık düşürme testlerinden elde edilen enerji grafikleri incelendiğinde; seramikteki kırılmalarla absorbe edilen enerji değerine eşit olan darbe

enerjisinin $E_d = 20$ J olduğu tespit edilmiştir. Bu tespitten hareketle Çizelge 4.36'da $E_d = 20$ J' e karşılık gelen ve birim yüzey başına düşen enerji miktarı olarak bulunan $E_{\text{yüzey}} = 4,173 \times 10^{-3}$ J/mm² değeri ortalama 1 mm² lik bir kırılmanın oluşması için gerekli olan enerji değerini ortaya koymaktadır.

Çizelge 4.36. Birim alan başına düşen enerji miktarları

Darbe Enerjisi (J)	3	5	10	20	30	60
Kırılma Uzunluğu (mm)	76,81	149,98	159,24	226,83	247,97	276,02
Kırılma Yüzey Alanı (mm ²)	1874,16	3644,51	3479,72	4792,96	5776,18	5933,44
Birim Yüzey Başı Enerji Miktarı (J/cm ²)	0,160	0,137	0,287	0,417	0,519	1,011

Alumina seramik plakaların darbe test sonuçlarının kenar sınır şartına bağlı olarak incelenmesi

Alumina seramik plakaların kenar destekli olarak düşük enerjili darbe testlerini yapmak üzere özel bir aparat geliştirilmiştir. Böylece testlerde pnömatik presle dairesel olarak baskılanan ancak kenarları serbest olan numune bağlama şekli ile kenarları söz konusu aparatla desteklenen bağlama şeklinin analiz sonuçları mukayese edilmiştir. Resim 4.32'de kenar desteksiz dairesel tutulu alumina seramiğin ve geliştirilen söz konusu aparat ile kenar destekli dairesel tutulu alumina seramiğin pnömatik fikstüre bağlantı fotoğrafları görülmektedir.

Ağırlık düşürme testlerinde kenar desteksiz seramik numunelerde darbe sonucunda küçük kırılmalara eşlik eden kopmaların meydana geldiği görülmüştür. Resim 4.33'de söz konusu kopmalar kırmızı kesik dairelerle işaretlenmiştir. Kenarları desteksiz plakaların darbe davranışı incelendiğinde darbe sonucu oluşan kopmaların değişik hızlarda etrafa saçıldığı; buna bağlı

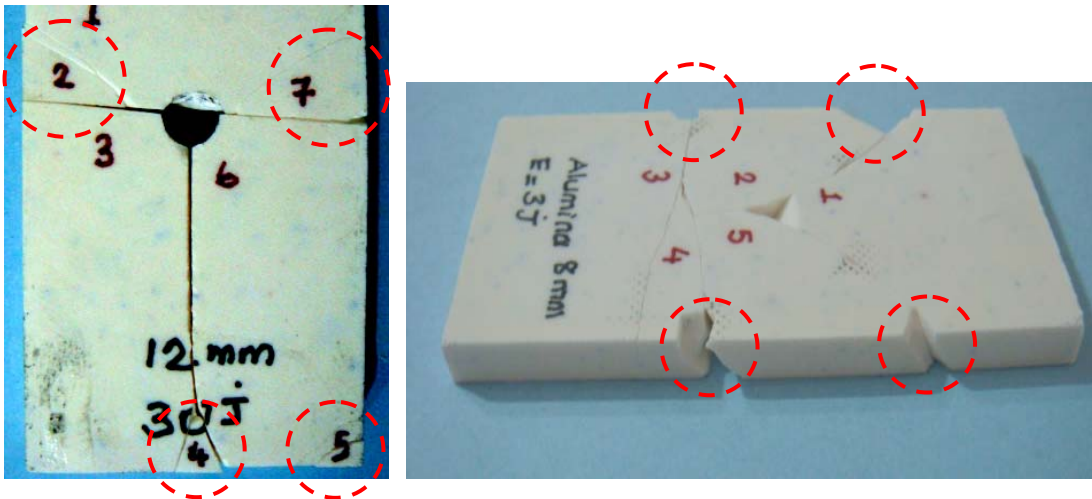
olarak plaka bütünlüğünün bozulduğu değişik enerjilerde, değişik kalınlıktaki numunelerin (4, 8, 10, 12 mm) tamamında görülmüştür.



(a)

(b)

Resim 4.32. Alumina seramiğin ağırlık düşürme testlerine ait fotoğrafları
(a) Kenar desteksiz bağlama, (b) Kenar destekli bağlama

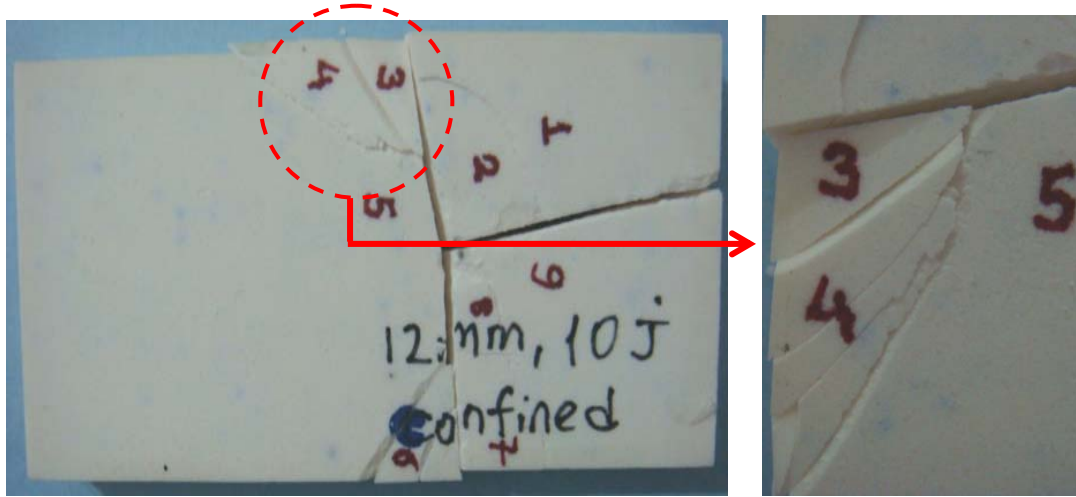


Resim 4.33. Alumina seramiğin kenar desteksiz ağırlık düşürme testlerinde plaka kenarlarında oluşan kırılma ve kopmalar

Kenarları serbest olarak tasarlanacak paket zırh sisteminde merminin hedefe isabeti ile birlikte seramik parçacıklarının özellikle kenarlardan koparak

fırlayacağı açıktır ki bu durum çoklu vuruşlara karşı balistik korumada zafiyete yol açacaktır.

Resim 4.34'de görüldüğü gibi özel geliştirilen aparatla birlikte kenarları destekli olarak test edilen numunelerde kenar kırıkları daha yoğun oluşmakla birlikte plakadan ayrılmadığı, plaka bütünlüğünün korunduğu anlaşılmaktadır. Balistik uygulamalarda seramiğin bu davranışı seramik ön yüzde kullanılan polimer esaslı tutucu tabaka ile birlikte çoklu vuruşlarda önemli avantaj sağlamaktadır.

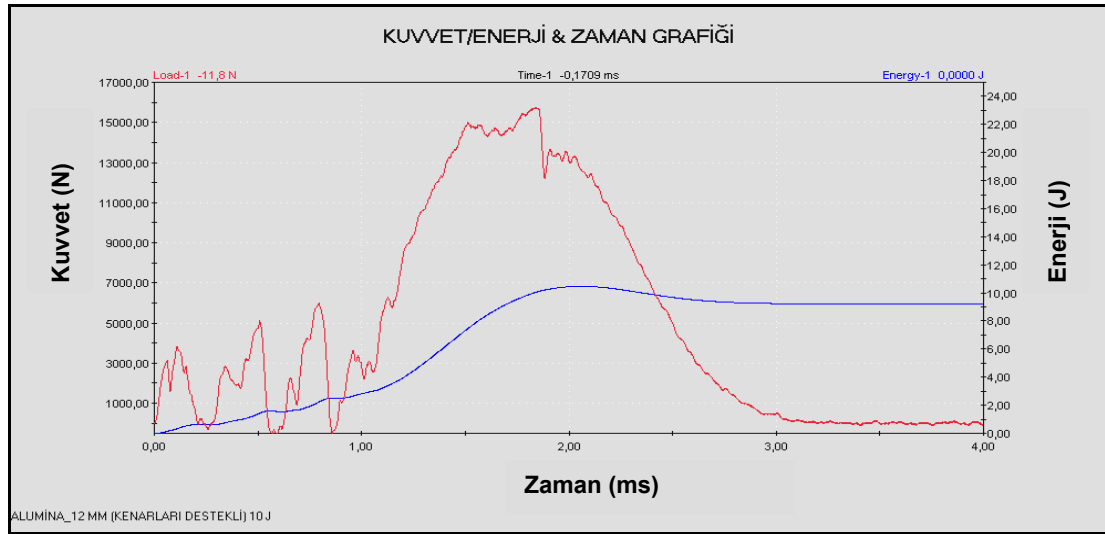


Resim 4.34. Alumina seramiğin özel aparatla kenar destekli ağırlık düşürme testlerinde plaka kenarlarında oluşan kırılmalar

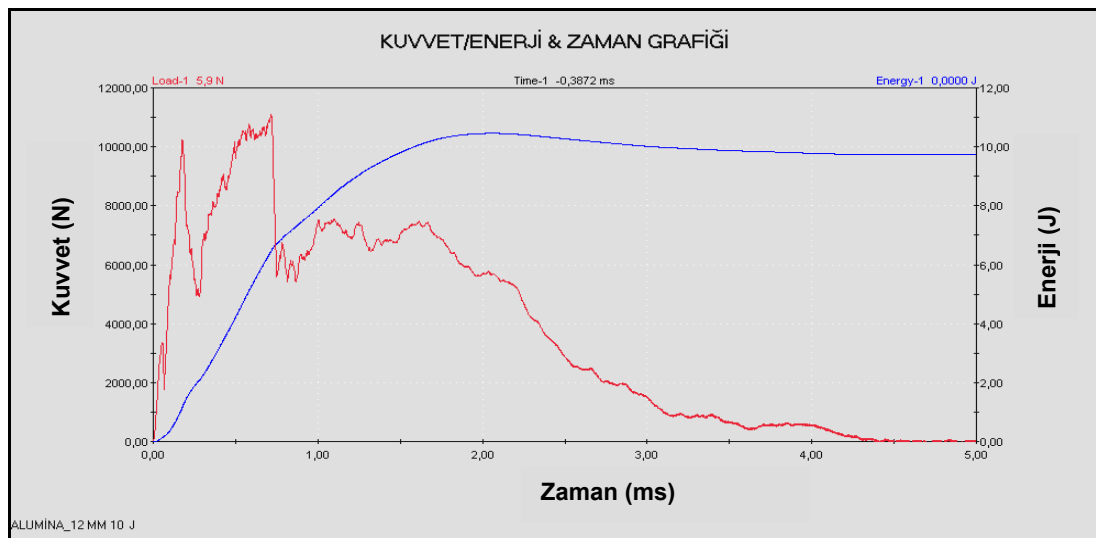
Kenarları destekli ve desteksiz test numuneleri üzerinde yürütülen darbe testlerinden elde edilen analiz sonuçları değerlendirildiğinde, destekli numunelerde etkili olan maksimum kuvvetin daha büyük olduğu görülmüştür. Şekil 4.48'de $E_d = 10$ J darbe enerjisi ile kenarları destekli ve Şekil 4.49'da $E_d = 10$ J darbe enerjisi ile kenarları desteksiz olarak yapılan testlere ait kuvvet & zaman grafikleri görülmektedir.

Kenarları destekli olan seramik test numunelerinde ölçülen maksimum kuvvet değerlerinin daha büyük olması, seramik kompozit bir zırh sisteminde ön yüzde kullanılan seramik malzemenin sert çelik çekirdekli mermi üzerindeki

aşındırma ve kırma fonksiyonu dikkate alındığında istenen bir özellik olarak önem kazanmaktadır. Ağırlık düşürme test sisteminin ölçmüş olduğu kuvvet değeri darbe ucu içerisinde ilerleyen basma gerilmeleri kaynaklı olduğundan belli bir darbe enerjisine karşılık gelen daha büyük bir kuvvet zırh delici merminin daha fazla aşınması ve kırılmaya zorlanması demektir.



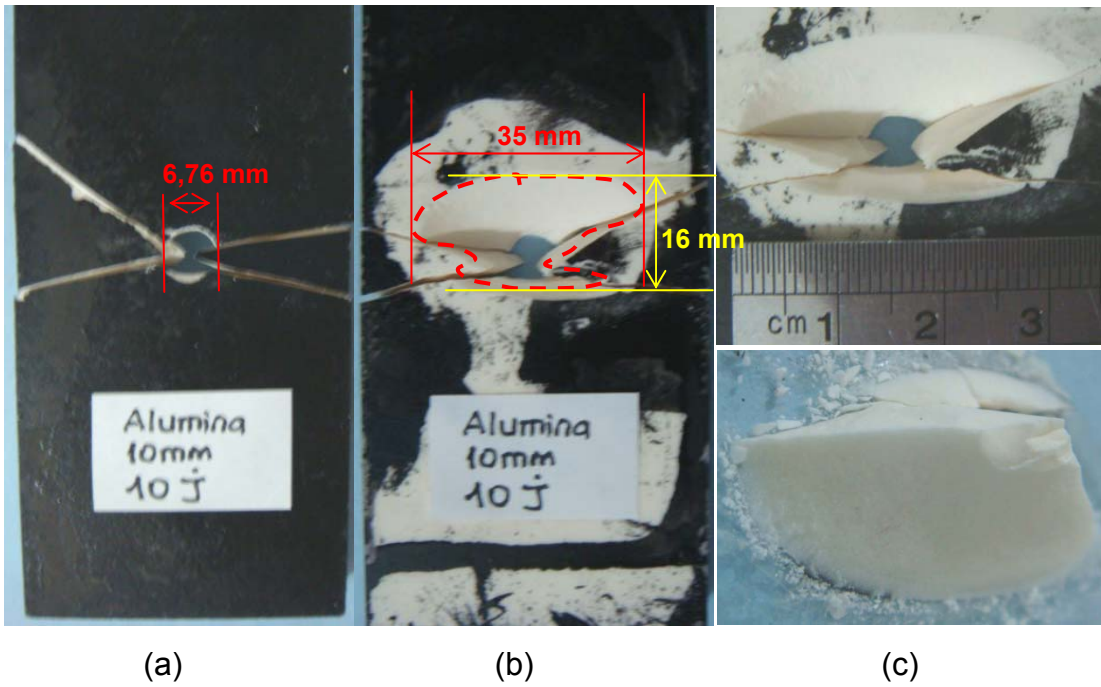
Şekil 4.48. Kenarları destekli 12 mm alumina plakanın 10 J darbe enerjisi ile ağırlık düşürme testine ait kuvvet/enerji & zaman grafikleri



Şekil 4.49. Kenarları desteksiz 12 mm alumina plakanın 10 J darbe enerjisi ile ağırlık düşürme testine ait kuvvet/enerji & zaman grafikleri

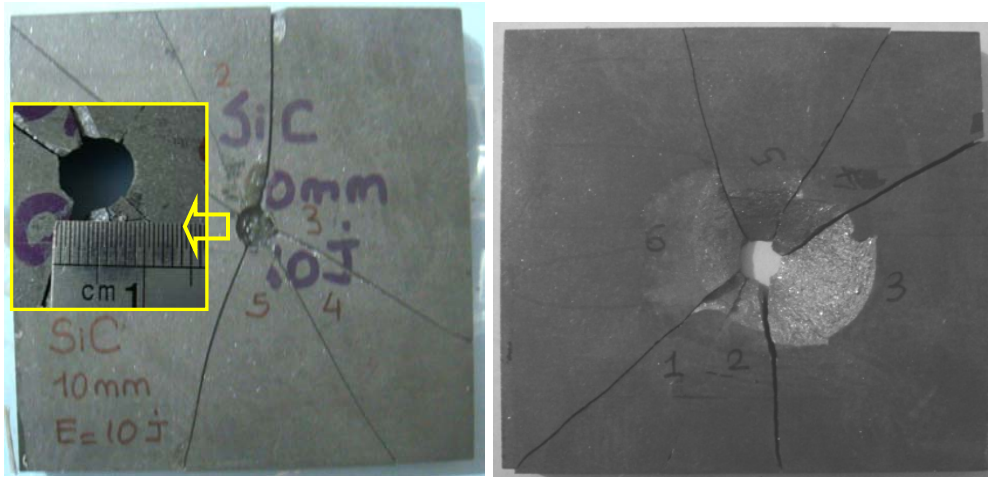
10 mm kalınlıkta alumina, bor karbür ve silisyum karbür seramik plakaların darbe test sonuçlarının mukayasesi

10 mm kalınlıkta alumina seramik plakaların $E_d = 10$ J darbe enerjisi ile gerçekleştirilen ağırlık düşürme testleri sonucunda ortaya çıkan kırılma yapısına ait fotoğraflar Resim 4.35'de verilmiştir. Seramik ön ve arka yüzünde meydana gelen kırılmalar ve kırılma sonucu oluşan konik kırılma havuzu ile konik kırılma yapısı açık bir şekilde görülmektedir.



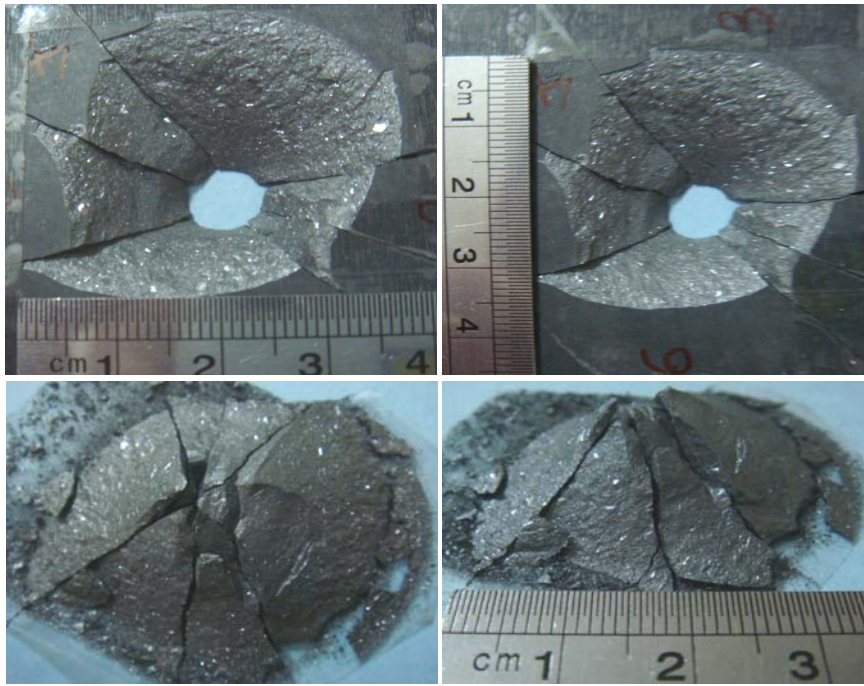
Resim 4.35. 10 mm kalınlıkta alumina seramiğin 10 J darbe enerjisi ile ağırlık düşürme testinde, (a) Ön yüzde oluşan kırılmalar, (b) Arka yüzde oluşan konik kırılma havuzu, (c) Konik kırılma yapısı

10 mm kalınlıkta silisyum karbür ve 10 mm kalınlıkta bor karbür seramik plakaların $E_d = 10$ J darbe enerjisi ile gerçekleştirilen ağırlık düşürme testleri sonucunda ortaya çıkan kırılma yapısına ait fotoğraflar Resim 4.36 ve Resim 4.37'de verilmiştir. Resim 4.38'de ise darbe sonrası alumina, silisyum karbür ve bor karbür seramik plakalarda oluşan konik kırılma havuzları ve konik kırılma yapılarının karşılaştırılması görülmektedir.

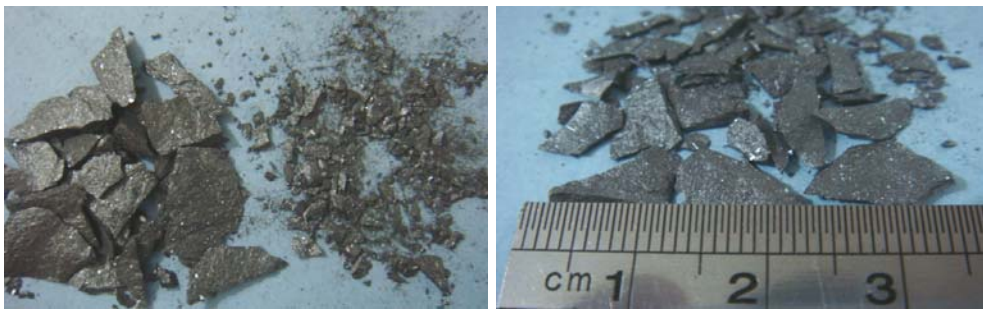


(a)

(b)

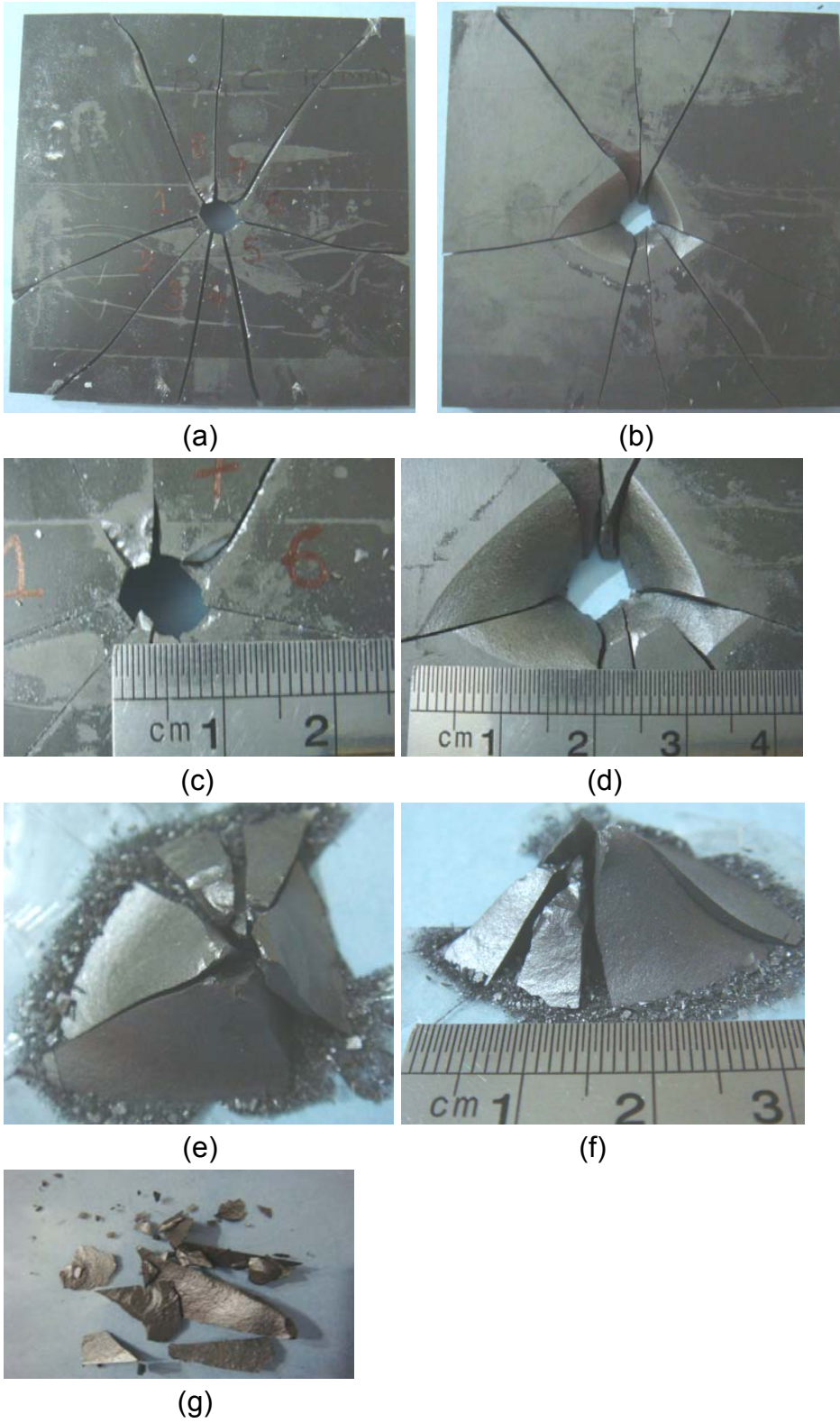


(c)



(d)

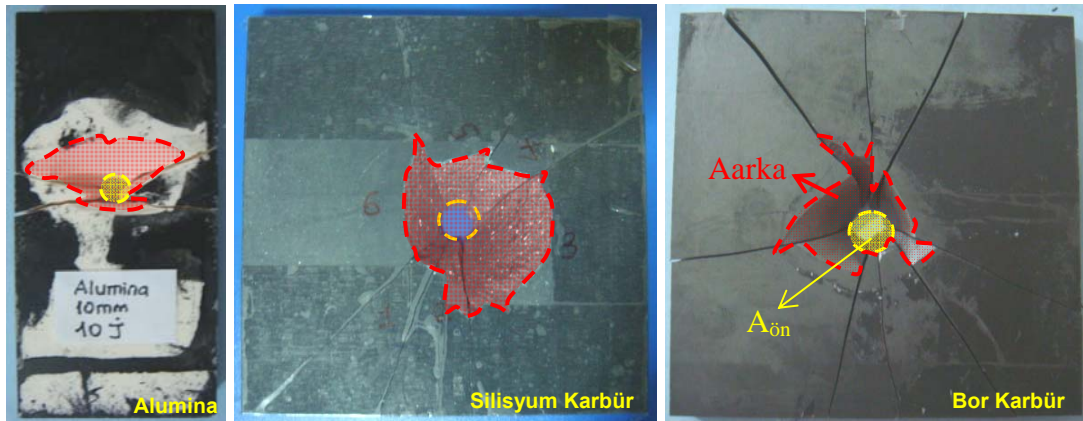
Resim 4.36. 10 mm kalınlıkta silisyum karbür seramiğin 10 J darbe enerjisi ile ağırlık düşürme testine ait, (a) Ön yüzünde, (b) Arka yüzünde oluşan kırılma, (c) Konik kırılma yapısı, (d) Kopan kırık parçaları



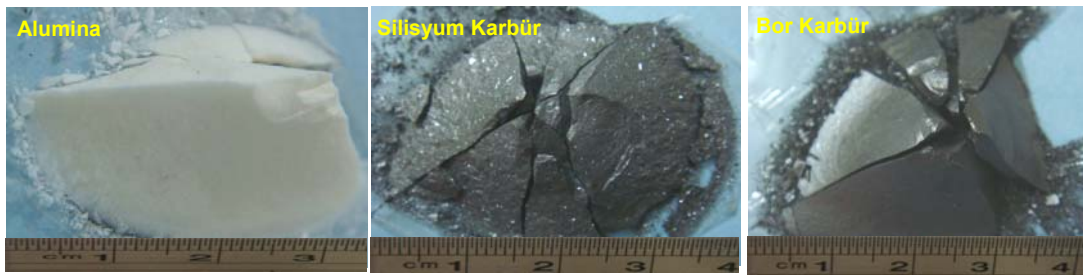
Resim 4.37. 10 mm kalınlıkta bor karbür seramiğin 10 J darbe enerjisi ile ağırlık düşürme testine ait, (a), (c) Ön yüzünde, (b), (d) Arka yüzünde oluşan kırılmalar, (e), (f) Konik kırılma yapısı, (g) Kopan kırık parçaları

Silisyum karbürün kırılma şekli incelendiğinde Resim 4.36'dan görüleceği gibi μm büyüklüğünde tozlarla birlikte 0,1 – 1 mm kalınlıkta en büyüğü 12,36 mm uzunluğunda ve 7,45 mm genişliğinde pul şeklinde kırıklar ile daha dar iğnemi kırıkların oluştuğu görülmektedir.

Resim 4.38'de seramik ön tarafında meydana gelen yaklaşık dairesel kırılma alanı $A_{\text{ön}}$ ile, arka tarafta meydana gelen konik kırılmaya ait taban alanı ise A_{arka} ile gösterilmiş ve kırılma yapısı sonuçları Çizelge 4.37'de verilmiştir. Çizelge 4.37'den de görüleceği gibi seramik ön ve arka yüzündeki en büyük kırılma alanı silisyum karbür plakaya, en küçük kırılma alanı ise alumina plakaya aittir.



(a)



(b)

Resim 4.38. 10 mm kalınlıkta alumina, silisyum karbür ve bor karbür seramiğin 10 J darbe enerjisi ile ağırlık düşürme testinde arka tarafta oluşan, (a) Konik kırılma havuzu, (b) Konik kırılma yapısının karşılaştırılması

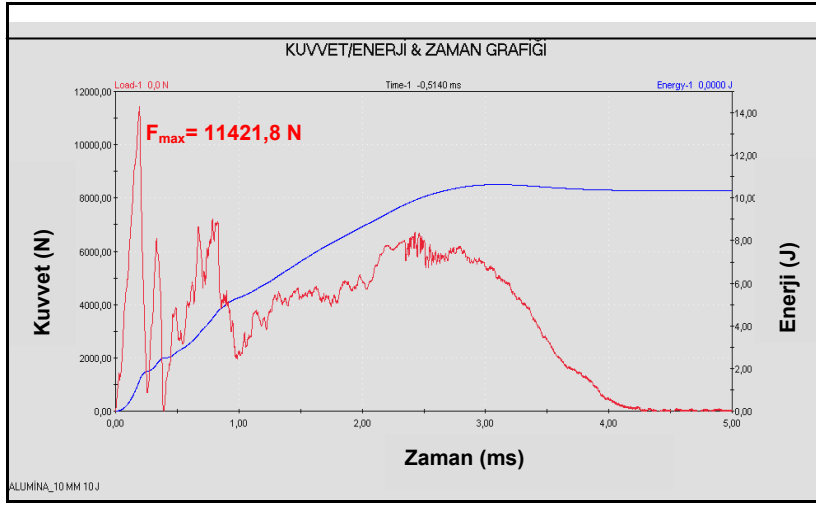
Çizelge 4.37. Seramik ön ve arka yüzünde oluşan kırılma alanı büyüklükleri

Seramik	Alumina	Silisyum karbür	Bor karbür
$A_{\text{ön}} \text{ (mm}^2\text{)}$	35,55	60,10	49,12
$A_{\text{arka}} \text{ (mm}^2\text{)}$	420,40	974,67	532,58
$A_{\text{arka}}/A_{\text{ön}}$	11,83	16,22	10,84
Toplam Kırık Uzunluğu (mm)	188,46	321,93	419,69
Toplam Kırık Alanı (mm²)	3060,44	8746,6	9819,96
E_a (J)	10	9	10
Birim Kırık Yüzeyine Düşen Enerji (J/mm²)	$3,267 \times 10^{-3}$	$1,029 \times 10^{-3}$	$1,018 \times 10^{-3}$

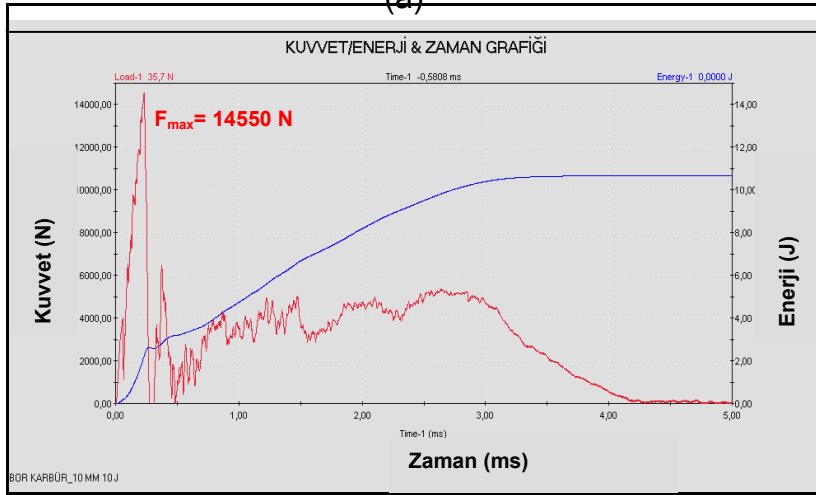
$E_d = 10$ J darbe enerjisiyle gerçekleştirilen testlerde toplam kırık uzunluğu ve alanı bor karbürde en büyüktür. Seramik malzeme tarafından absorbe edilen enerji miktarları (E_a) dikkate alındığında birim kırık yüzeyine düşen enerji miktarı alumina seramikte diğer iki seramikten daha yüksektir. Silisyum karbür ve bor karbürde birim kırık yüzeyi başına düşen enerji miktarları birbirine oldukça yakındır.

Düşük enerjili, düşük hızlardaki darbe test sonuçlarına göre TÜBİTAK MAM imali alumina seramik daha tok davranış gösterirken yurt dışı kaynaklı tedarik edilen bor karbür ve silisyum karbürün kırılma tokluğunun daha düşük olduğu tespit edilmiştir.

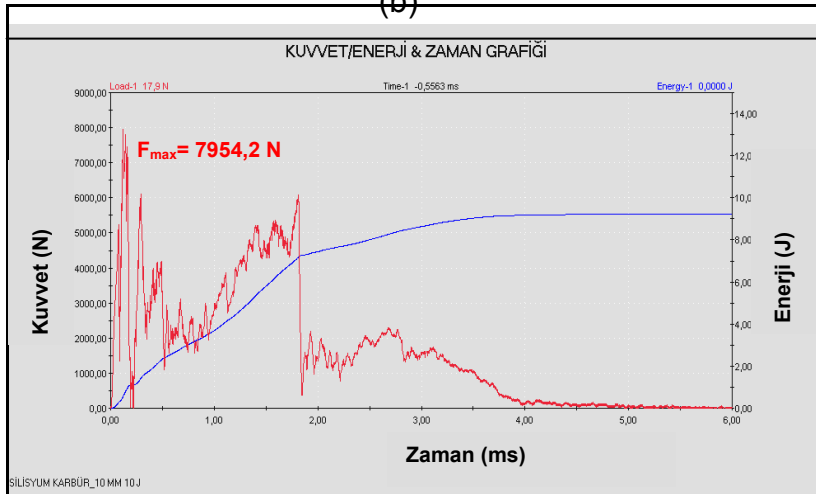
Şekil 4.50'de alumina, bor karbür ve silisyum karbür seramikler için verilen kuvvet/enerji & zaman grafikleri incelendiğinde düşük enerjili ağırlık düşürme testlerine ait darbe etkileşim sürecinin birbirine oldukça yakın ve yaklaşık olarak 4 ms civarında olduğu görülmektedir. Darbe sonucunda alumina seramikte $F_{\text{max}} = 11421,8$ N, bor karbür seramikte $F_{\text{max}} = 14550$ N, silisyum karbür seramikte ise $F_{\text{max}} = 7954,2$ N büyüklüğünde kuvvet değerleri saptanmıştır.



(a)



(b)



(c)

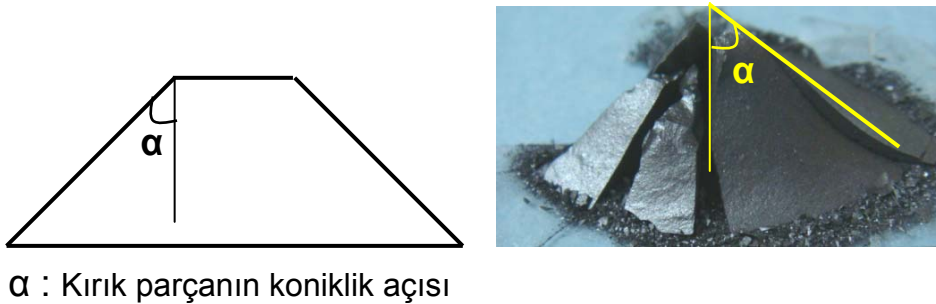
Şekil 4.50. 10 mm kalınlıktaki seramiklerin 10 J darbe enerjisi ile testine ait kuvvet/enerji & zaman grafikleri, a) Alumina, b) Bor karbür, c) Silisyum karbür

Seramiklerde balistik performansını artırabilmek için:

- (1) Mermi ile seramiğin etkileşim süresinin artırılarak merminin daha fazla kırılmasının sağlanması,
- (2) Seramik malzeme içerisinde penetrasyon süresince aşınma etkisini (erozyon) artırmak için daha yüksek basınç oluşmasının (dolayısı ile daha büyük gerilmelerin ortaya çıkmasının) sağlanması gerekmektedir.

Şekil 4.50'deki kuvvet grafikleri darbe ucuna etki eden kuvvet büyüklükleri yönüyle incelendiğinde $F_{\max (B4C)} > F_{\max (Al_2O_3)} > F_{\max (SiC)}$ olduğu görülmektedir. Darbe ucu balistik tehdit olarak varsayıldığında darbe ucunda oluşan kuvvetlere paralel olarak en büyük tahrip etkisine sırasıyla bor karbür, alumina ve silisyum karbür sahip olacaktır.

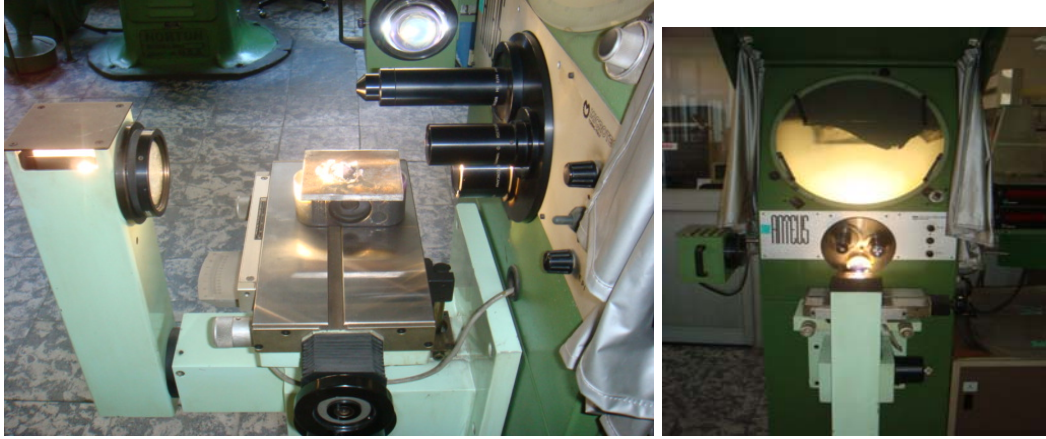
Resim 4.38'de görülen konik kırılma yapılarının koniklik açısı, α (Şekil 4.51) Resim 4.39'da fotoğrafları verilen profil projeksiyon cihazı ile tespit edilmiştir. Bulunan sonuçlar literatürde yer alanlara yakındır [86, 87]. Darbe eksenini ile konik kırılma yüzeyi arasındaki koniklik açısının hesaplamalarda yaklaşık olarak 65° alınabileceği belirtilmiştir [86].



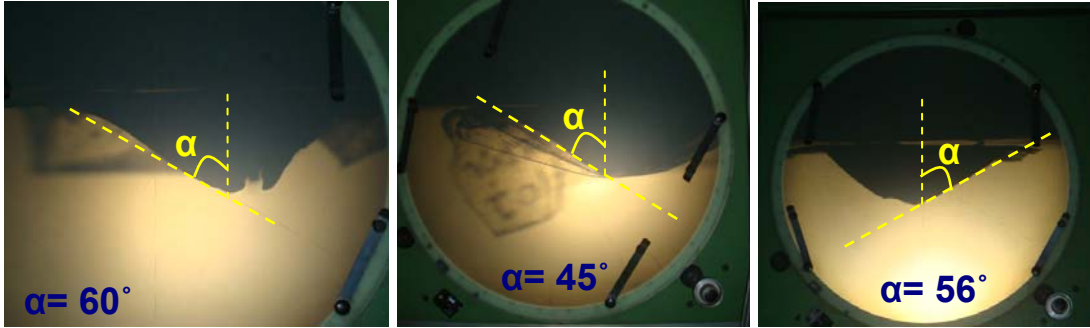
Şekil 4.51. Darbe sonucu kırılan seramik parçalarının koniklik açısı

Bor karbürün kırılmasına ait SEM görüntüleri

10 mm kalınlığındaki bor karbürün 10 J darbe enerjisi ile ağırlık düşürme testinde darbe ucunun ilk temas ettiği çarpma noktasında meydana gelen kırılma yüzeyine ait SEM ile elde edilen görüntü Resim 4.40'da verilmiştir.

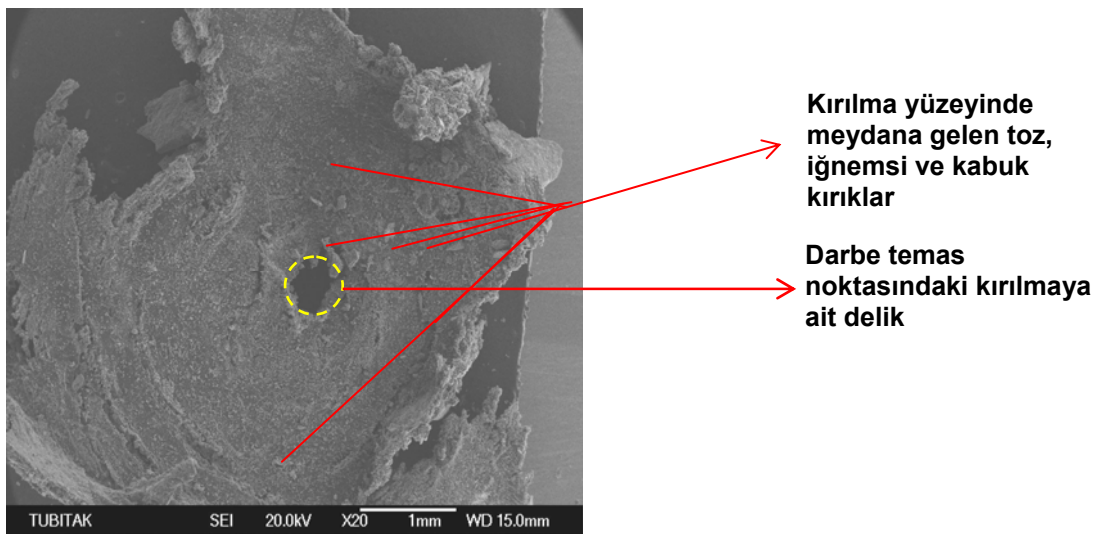


(a)



(b)

Resim 4.39. Ağırlık düşürme testinde darbe ile oluşan konik kırılma yapısına ait koniklik açısının profil projeksiyon cihazı ile bulunması
(a) Profil projeksiyon cihazı, (b) Bor karbür, silisyum karbür ve alumina kırıklarının koniklik açılarının tayini



Resim 4.40. 10 mm kalınlıkta bor karbürün 10 J enerji ile ağırlık düşürme testinde darbe ucu altında kırılan parçaya ait SEM görüntüleri

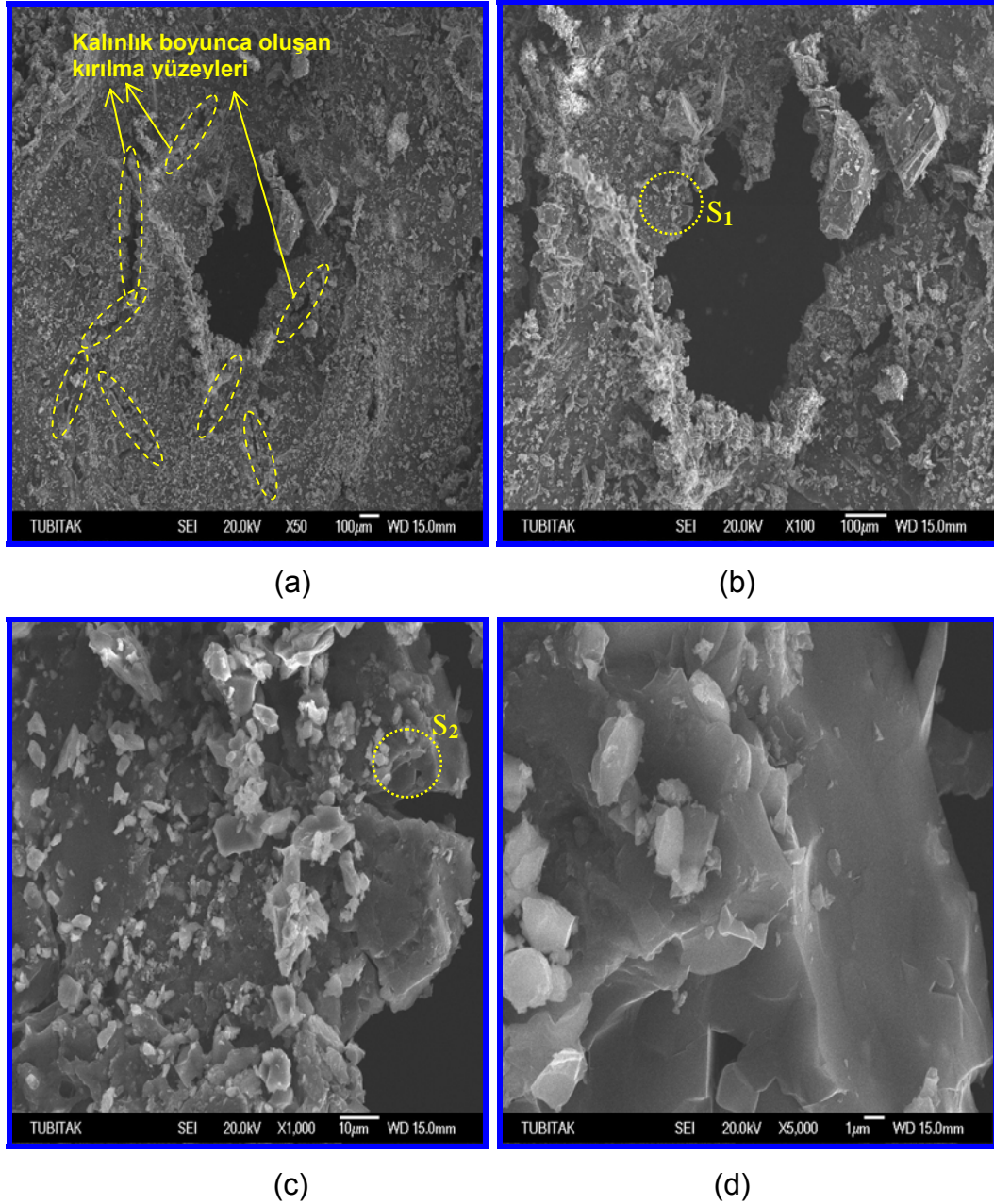
Resim 4.40'dan da görüleceği gibi ağırlık düşürme testinde darbe ucunun hemen altında kırılan 5 mm x 5 mm ebatlarındaki parçada temas noktasında yaklaşık olarak 0,3 mm çapında bir delik meydana gelmiştir. Yaklaşık olarak 0,2 mm kalınlığındaki kırık parçanın bünyesinde değişik büyüklükte bor karbür tozları ile iğnemi ve çok ince kabuk yapıda kırıkların oluştuğu görülmüştür.

Resim 4.40'da görülen kırık parçanın 50 ve 100 büyütme SEM görüntüleri Resim 4.41 (a), (b)'de verilmiştir. 50 büyütme görüntülerde kırık parçanın kırılma yüzeyinde kesit boyunca (derinliğine) meydana gelen farklı kırılma yüzeylerinden bazıları kesik çizgiler içerisinde görülmektedir.

50 ve 100 büyütme SEM görüntülerinde kırılma yüzeyinde oluşan mikron seviyesindeki irili ufaklı bor karbür toz ve parçalarının adeta yüzeye yapıştırılmış gibi durdukları görülmektedir.

Darbe ucunun hemen altındaki deliğin çevre sınırında bulunan ve Resim 4.41 (b)'de 'S₁' ile gösterilen noktadan SEM ile 1000 büyütme olarak çekilen kırılma mikroyapı fotoğrafları ise Resim 4.41 (c)'de görülmektedir. SEM görüntüsü dikkatle incelendiğinde; kırılma yüzeyine yapıştırılmış gibi duran bor karbür taneciklerinin büyüklüklerinin 10 µm ve altında olduğu hatta 1 µm civarında bor karbür tozlarının oluştuğu dahi görülmektedir. Bu görüntü toz, iğnemi ve kabuk yapıdaki kırılmaları daha iyi göstermektedir. Resim 4.41 (c)'de 'S₂' ile gösterilen noktadan SEM ile 5000 büyütme olarak çekilen kırılma mikroyapı fotoğrafları ise Resim 4.41 (d)'de verilmiştir. Resim 4.41 (d)'de kırılma yüzeyinde meydana gelen mikro çatlaklar da görülebilmektedir.

Ağırlık düşürme testinde darbe tesir alanı içerisinde, Resim 4.40'daki kırığın hemen altında ve çevresinde µm seviyesindeki bor karbür tozlarından birkaç mm'ye kadar ulaşan değişik kırılmaların meydana geldiği tespit edilmiştir.



Resim 4.41. Bor karbürde 10 J darbe enerjisi altında kırılan parçanın (a) 50, (b) 100, (c) 1000 ve (d) 5000 büyütmeli SEM görüntüleri

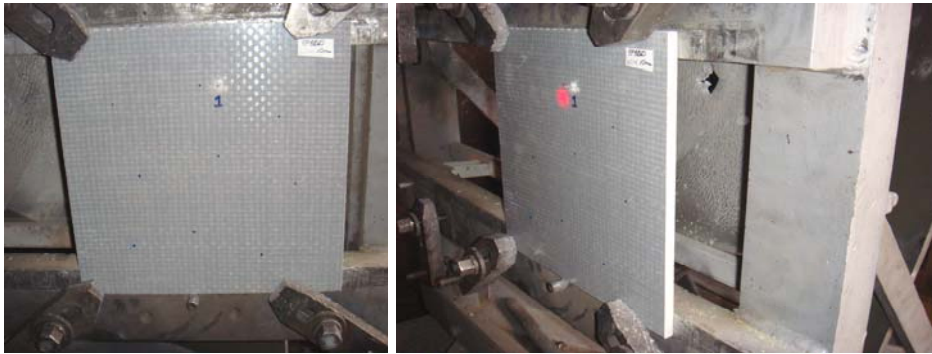
4.3. Seramik Kompozit Zırh Sisteminin Balistik Test Sonuçları

Seramik kompozit zırh sisteminde kullanılan kompozit malzemenin balistik etkinliğini değerlendirmek üzere sadece kompozit malzeme üzerinde balistik testler uygulanmıştır. Ağırlık düşürme test sonuçlarına göre E-Cam dokuma

kumaştan üretilen kompozit malzemenin düşük hızlı darbe limiti (V_{50}), penetrasyon ve perforasyon eşik enerji değerleri tek yönlü kumaştan üretilen kompozit malzemeye göre daha yüksek olduğundan balistik testlerde E-Cam dokuma kumaş ile aramid dokuma kumaş kullanılmıştır.

4.3.1. E-Cam dokuma kumaşla üretilen kompozit malzemenin 7,62 mm NATO FMJ mermi ve 7,62 mm AP mermiyle balistik test sonuçları

E-Cam dokuma kumaştan üretilmiş 10 mm ve 15 mm kalınlığındaki kompozit plakalara 0,30 kalibre (7,62 mm) NATO FMJ mermi ile atış yapılmıştır. Hedef tespit düzeneğine bağlanmış olan kompozit malzemeye ait fotoğraflar Resim 4.42'de görülmektedir. 300 X 300 mm ebatlarındaki kompozit test numunesi dört kenarından pabuçlarla rijit bir şekilde bağlanmıştır.



Resim 4.42. E-Cam kompozitin hedef düzeneğine bağlanması

Kompozit malzemenin balistik testinde V_{50} balistik limit hesaplamasında geçerli atış olarak kabul edilen 6 adet atışa ait mermi hızı, hedefe çarpma hızı ve hedefteki penetrasyon durumu bilgileri Çizelge 4.38'de verilmiştir. Çizelgede yer alan CP tam penetrasyon yani perforasyon, PP ise kısmi penetrasyon anlamına gelmektedir. Çizelge 4.38'de görülen V_{50} balistik limit hız değeri MIL-STD-662F standardına göre 3 tam, 3 kısmi penetrasyonla sonuçlanmış atışlara ait hızların aritmetik ortalamasının alınmasıyla bulunmuştur.

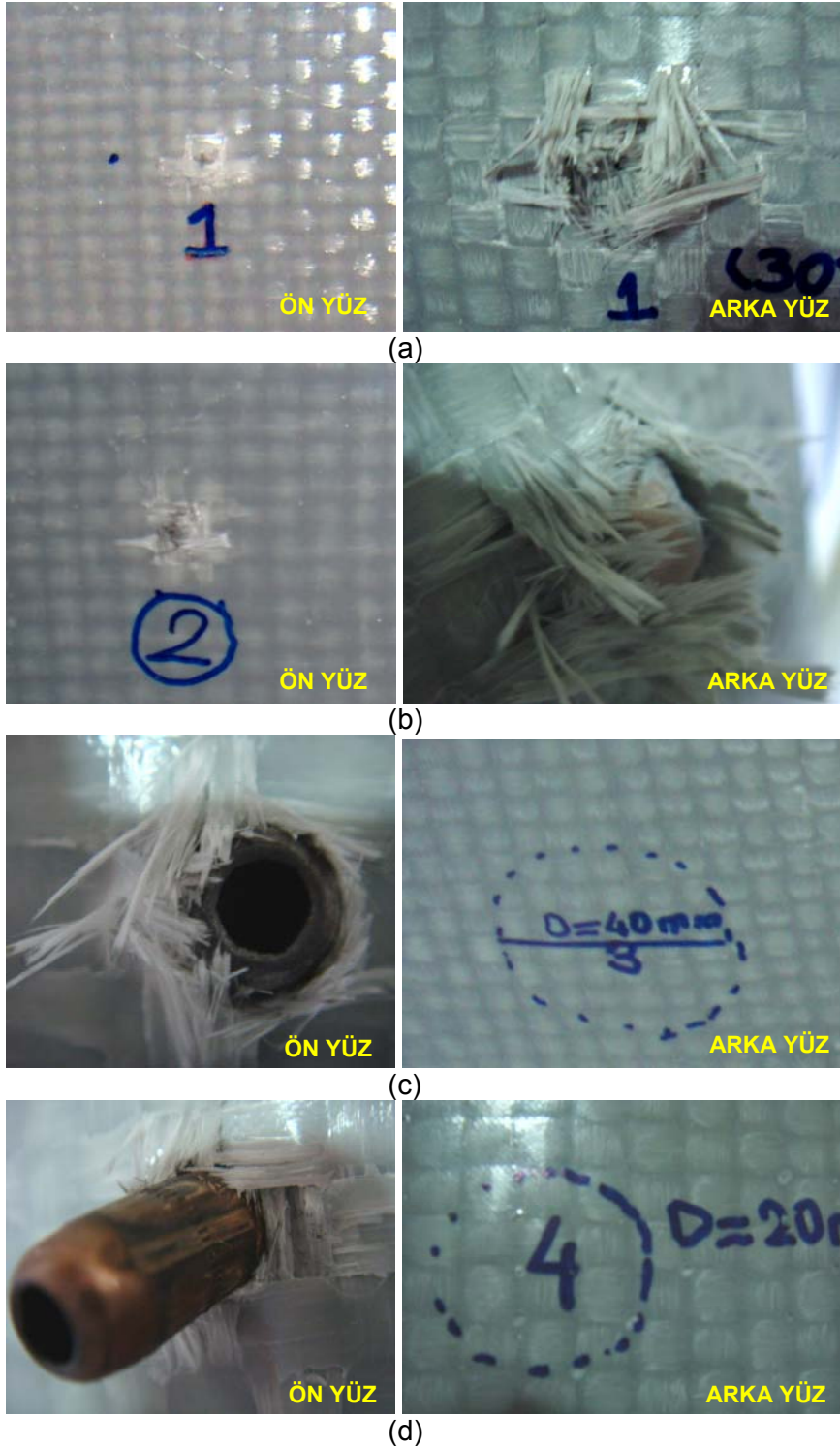
Çizelge 4.38. 10 mm E-Cam kompozitin 7,62 mm mermi ile V_{50} hesabı

7,62 mm NATO FMJ Mermi Atış Test Sonuçları (10 mm E-Cam)										
Atış No.	Barut Miktarı (gr.)	Sensör - 1		Sensör - 2		Ortalama Hız (fps)	Hava Direnç Katsayısı (G)	Hız Kaybı (fps)	Çarpma Hızı (fps)	Sonuç PP: Delmedi CP: Deldi
		Zaman (μ s)	Hız (fps)	Zaman (μ s)	Hız (fps)					
1	1,00	13427	1117	13426	1117	1117	0,078	5	1112	CP
2	0,90	13654	1099	13654	1099	1099	0,066	4	1095	CP
3	0,70	14765	1016	14765	1016	1016	0,041	3	1013	PP
4	0,60	15062	996	15061	996	996	0,036	2	994	PP
5	0,90	13874	1081	13875	1081	1081	0,057	4	1077	CP
6	0,65	14652	1024	14651	1024	1024	0,043	3	1021	PP
Balistik Sonuçlar:								Açıklamalar:		
V_{50} (gerçekleşen) = 1052 fps (321 m/s) olarak bulunmuştur.										

10 mm E-Cam kompozitin balistik testinde en düşük hızla (3 nolu atış) en yüksek hız (1 nolu atış) arasındaki fark 121 fps (36,8 m/s) olarak ölçülmüştür. Bu fark MIL-STD-662F standardına göre V_{50} hesabında dikkate alınan atışlar arasındaki 125 fps değerindeki maksimum hız farkını aşmamaktadır. V_{50} testinde hedefteki kompozit plakanın hemen arkasında bulunan Alüminyum 2024 T3 malzemeden oluşan şahit plakada 1, 2 ve 5 nolu atışlarda meydana gelen delinmeler Resim 4.43'de; V_{50} balistik limit hızın bulunmasına yönelik atış fotoğrafları ise Resim 4.44'de görülmektedir.

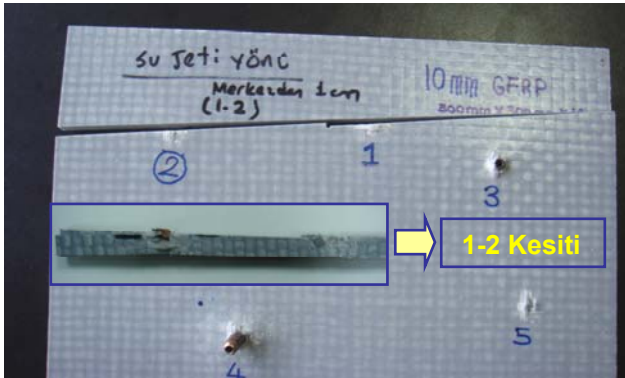


Resim 4.43. 7,62 mm NATO FMJ mermi ile 10 mm kalınlıktaki E-Cam kompozitin balistik testlerinde hedef arkası şahit plaka



Resim 4.44. 7,62 mm NATO FMJ mermi ile 10 mm kalınlıktaki E-Cam kompozitin balistik testleri (a) 1 Nolu atış: $V = 339$ m/s, tam penetrasyon, (b) 2 Nolu atış: $V = 334$ m/s, tam penetrasyon, (c) 3 Nolu atış: $V = 309$ m/s, kısmi penetrasyon, (d) 4 Nolu atış: $V = 303$ m/s, kısmi penetrasyon

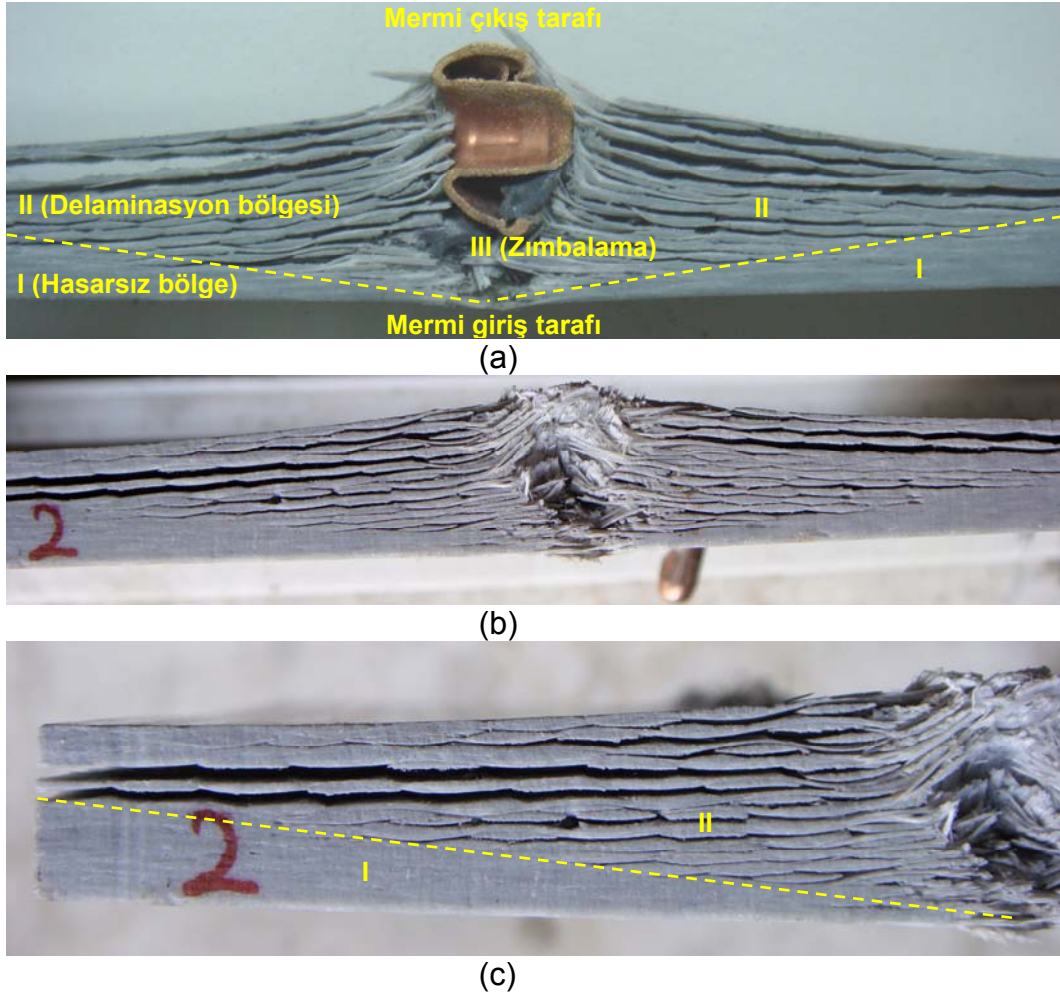
Atış sonrasında 300x300x10 mm ebatlara sahip E-Cam kompozit plakadan 1 ve 2 nolu atışların merkezinden geçecek şekilde kesit alınmıştır (Resim 4.45). Kalınlık boyunca kesme işlemi su jeti ile yapılmış, su jeti hızı kompozit kesitindeki hasar yapısı bozulmayacak şekilde ayarlanmıştır.



Resim 4.45. 10 mm kalınlıktaki E-Cam kompozitden 1 ve 2 nolu atışa ait delik merkezlerinden geçecek şekilde alınan kesit

$V = 334$ m/s hızla gerçekleştirilen 2 nolu atışta, Resim 4.43'deki şahit plaka kompozit içerisinde parçalanmış merminin küçük bir parçasıyla tam sınırda delinmiştir. 10 mm kalınlığındaki kompozitin Resim 4.45'de görülen 1-2 kesitinde 2 nolu atışa ait kesit fotoğrafları Resim 4.46'da verilmiştir.

Resim 4.46 (a) incelendiğinde I ile gösterilen ve merminin hem sağında hem de solunda yer alan simetrik bölgede kompozit yapı içerisinde kırılma veya delaminasyon görülmemektedir. Hasarsız olan bu bölgeyi delaminasyonların etkili olduğu II ile gösterilen bölge takip etmektedir. Delaminasyonlar kesik çizgi ile tanımlanan sınırı takip ederek merminin ilerleyişi yönünde artmaktadır. Mermi kompozit malzeme içerisine hızla nüfuz ettiğinde malzeme balistik darbeye karşı reaksiyon gösterecek yeterli zamana sahip değildir. Buna bağlı olarak merminin giriş tarafında kompozit katlar ve yapı içerisindeki hasar darbe noktası etrafında sınırlıdır, mikro saniyelik bir zaman diliminde darbe dışına doğru yayılacak yeterli zamanı bulamamaktadır.

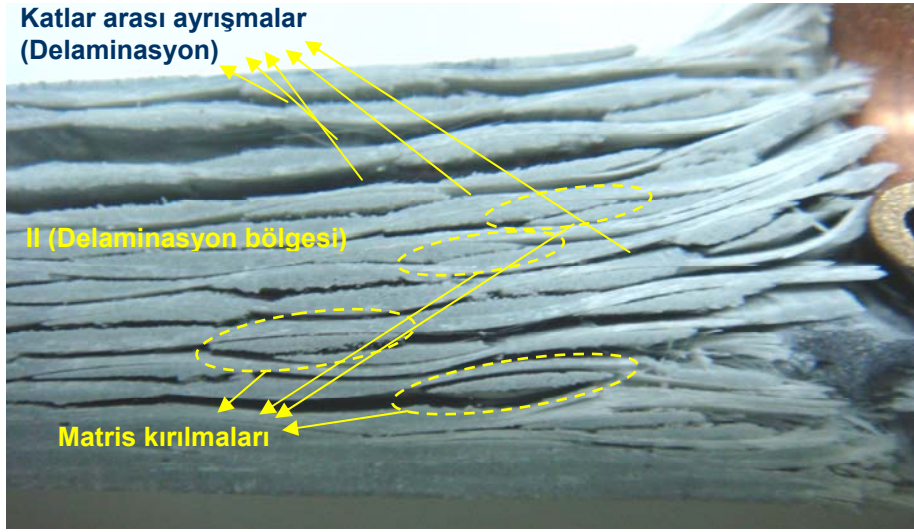


Resim 4.46. E-Cam kompozitin 1-2 kesitinde 2 nolu atışa ait hasar yapısı
 (a) 1-2 kesitinden çıkarılan dar çubuktaki 2 nolu atışa ait kesitin,
 (b) Kompozit plakada 1-2 kesitinde 2 nolu atışa ait kesitin,
 (c) 1-2 kesitinde 2 nolu atışın sol tarafına ait kesit fotoğrafları

Mermi malzeme kalınlığı boyunca ilerledikçe karşılaştığı dirence bağlı olarak hızla yavaşlamakta, buna bağlı olarak da darbeye bağlı gelişen hasar yapısı malzeme kalınlığı boyunca yayılmak ve gelişmek için yeterli zamana sahip olmaktadır. Darbe başlangıcında mm boyutundaki delaminasyon uzunlukları malzeme kalınlığı boyunca artarak mermi çıkışından önce malzeme genişliği boyunca yayılmış ve kompozit katlar arasında ayırışmaya neden olmuştur.

Delaminasyon bölgesinde katlar arası ayrışma ile birlikte matris yapıda da kırılmalar görülmektedir. Matris yapıdaki kırılmalar Resim 4.47'de kesik elips

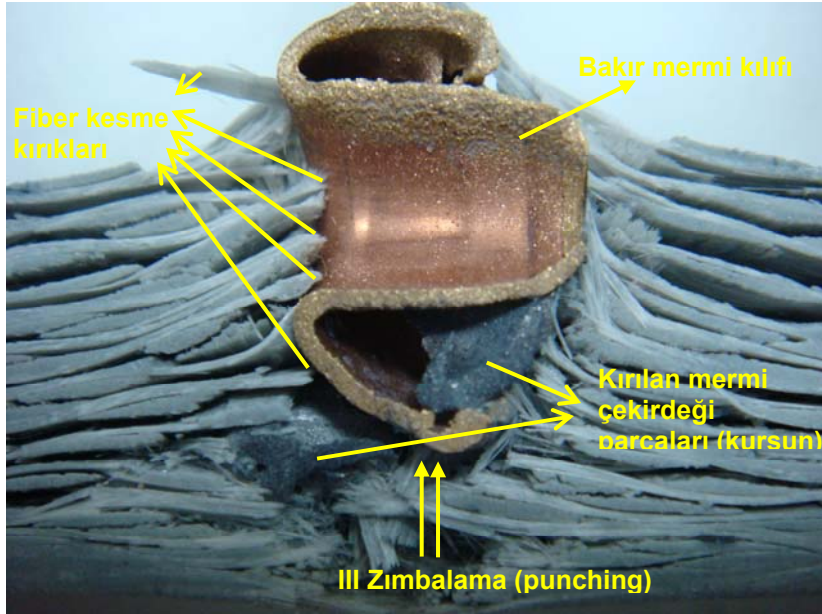
çizgilerle gösterilmiştir. Resim 4.46 ve Resim 4.47'den de anlaşılacağı gibi delaminasyon hasarı kompozitin yapısal bütünlüğünü bozan, yük taşıyabilme yeteneğini büyük oranda yitirmesine neden olan en önemli hasar modlarından birisidir.



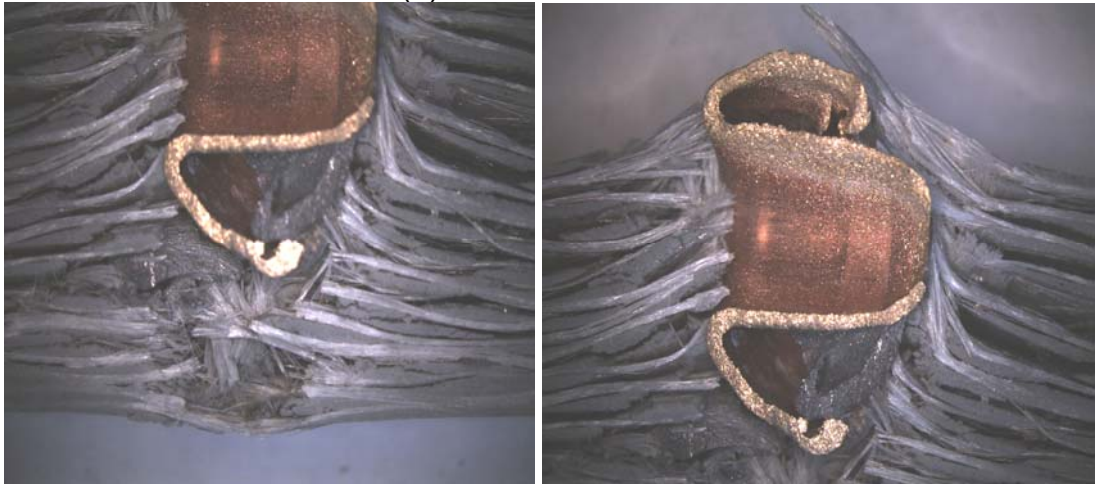
Resim 4.47. E-Cam kompozitin 1 ve 2 nolu atışlarına ait delik merkezlerinden geçen 1-2 kesitinde 2 nolu atışa ait kesit fotoğrafları

Resim 4.48'de 2 nolu atışta kompozit malzeme içerisinde ilerleyen merminin çevresi boyunca oluşan fiber kırılmalarına ait fotoğraf ve Stereo mikroskop görüntüleri bulunmaktadır. Fotoğrafta kırmızı oklarla gösterilen parçacıklar kurşun mermi çekirdeğine aittir. Mermi kompozit malzeme içerisinde ilerlerken zımbalama (punching) etkisi ile malzemeyi delmektedir. Ancak deliğin oluşumuna sivri mermi ucu kılavuzluk ettiğinden delme işlemi mermi çapına eşit büyüklükte bir alanın komple delinmesi ve boşaltılması şeklinde değil, merminin ilerlediği darbe eksenini boyunca fiberlerin kopması ve kısmen ezilerek parçalanması şeklinde ortaya çıkmaktadır.

1 nolu atış sonrası kompozit kesitinde oluşan hasar yapısı ve etki alanı 2 nolu atışta ortaya çıkan hasar yapısı ve alanı ile benzer özelliklere sahiptir.



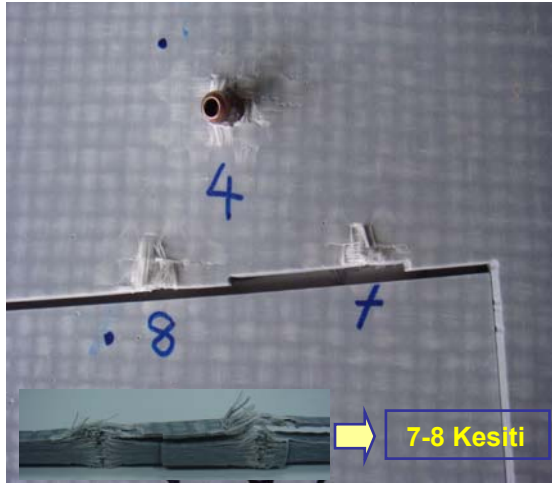
(a)



(b)

Resim 4.48. E-Cam kompozitin 1-2 kesitinde 2 nolu atışta oluşan fiber kırılmalarına ait kesit görüntüleri, (a) 2 nolu atışa ait kesit fotoğrafı, (b) 2 nolu atışa ait Stereo mikroskop görüntüleri

10 mm kalınlığındaki kompozit malzemeye yapılan ilk altı atışın hızı yaklaşık olarak 1000 fps (305 m/s) civarında gerçekleşmiştir. Daha yüksek hızlarda malzeme içerisinde meydana gelen hasar yapısını inceleyebilmek için $V_7 = 2362$ fps (720 m/s) ve $V_8 = 2849$ fps (868 m/s) hızlarda iki adet daha atış yapılmıştır. Atışlarda kompozit malzeme kesitinde meydana gelen hasar yapısına ait fotoğraflar Resim 4.49'da verilmiştir.



(a)



(b)

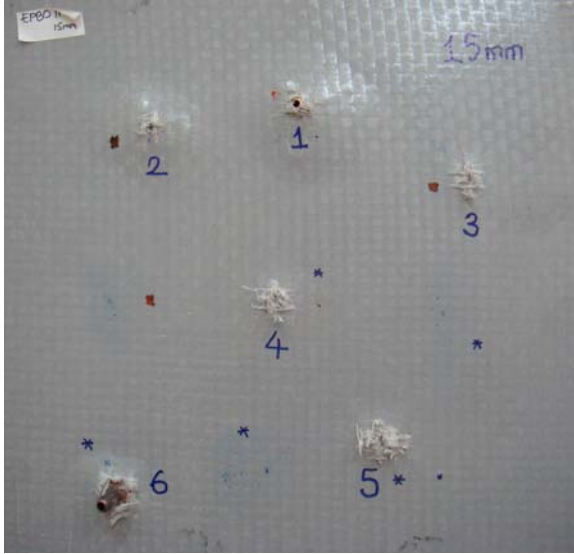


(c)

Resim 4.49. 10 mm E-Cam kompozitin 7-8 kesitindeki balistik hasar yapısı (a) 7 ve 8 nolu atışlara ait kesit parçası, (b) $V_7 = 720$ m/s hızla yapılan atışta oluşan hasarın kesit görüntüsü, (c) $V_8 = 868$ m/s hızla yapılan atışta oluşan hasarın kesit görüntüsü

Resim 4.49, Resim 4.46 ile mukayese edildiğinde yüksek hızlarda kompozit malzemede meydana gelen konik hasar yapısının darbe eksenini etrafında lokalize olduğu, delaminasyon ve matris kırılma alanlarının önemli ölçüde azaldığı görülmektedir. Bu durum tamamen, şekil değiştirme hızına bağlı olarak malzemenin farklı davranış göstermesine bağlıdır.

Resim 4.50'de 15 mm E-Cam kompozit malzemenin balistik limit hızının bulunmasına yönelik gerçekleştirilen atışlara ait fotoğraf bulunmaktadır. 15 mm kalınlığındaki E-Cam kompozitin V_{50} hesabına ilişkin atış değerleri Çizelge 4.39'da verilmiştir.



Resim 4.50. 15 mm E-Cam kompozitin V_{50} testine ait 6 adet atış fotoğrafı

Çizelge 4.39. 15 mm E-Cam kompozitin 7,62 mm NATO FMJ mermi ile V_{50} hesabı

7,62 mm NATO FMJ Mermi Atış Test Sonuçları (15 mm E-Cam)										
Atış No.	Barut Miktarı (gr.)	Sensör - 1		Sensör - 2		Ortalama Hız (fps)	Hava Direnç Katsayısı (G)	Hız Kaybı (fps)	Çarpma Hızı (fps)	Sonuç PP: Delmedi CP: Deldi
		Zaman (µs)	Hız (fps)	Zaman (µs)	Hız (fps)					
1	1,00	12890	1164	12891	1164	1164	0,092	6	1158	PP
2	1,20	12202	1229	12203	1229	1229	0,106	7	1222	PP
3	1,20	11949	1255	11948	1255	1255	0,110	7	1248	CP
4	1,25	11688	1283	11688	1283	1283	0,116	8	1275	CP
5	1,30	11451	1310	11453	1310	1310	0,121	8	1302	CP
6	1,00	13169	1139	13170	1139	1139	0,081	5	1134	PP
Balistik Sonuçlar:								Açıklamalar:		
V_{50} (gerçekleşen) = 1223,2 fps (372,8 m/s) olarak bulunmuştur.										

Çizelge 4.40'da ise Resim 4.51'de görülen 40 mm kalınlığındaki E-Cam

kompozitin balistik testlerine ait hız değerleriyle birlikte hedefin nüfuziyet durumu bilgisi yer almaktadır. 7,62 mm NATO FMJ mermilerle yapılan testlerin hiçbirinde kompozit malzemede tam delinme (perforasyon) meydana gelmemiştir. Tam barut hakkıyla yapılan atışlarda da perforasyon meydana gelmediğinden NATO FMJ mermi ile beşinci atıştan sonra devam edilmemiştir.

Çizelge 4.40. 40 mm E-Cam kompozitin 7,62 mm NATO FMJ mermi ile balistik testi

7,62 mm NATO FMJ Mermi Atış Test Sonuçları (40 mm E-Cam)										
Atış No.	Barut Miktarı (gr.)	Sensör - 1		Sensör - 2		Ortalama Hız (fps)	Hava Direnç Katsayısı (G)	Hız Kaybı (fps)	Çarpma Hızı (fps)	Sonuç PP: Delmedi CP: Deldi
		Zaman (µs)	Hız (fps)	Zaman (µs)	Hız (fps)					
1	2,00	7883	1903	7883	1903	1903	0,163	10	1893	PP
2	2,40	6170	2431	6171	2431	2431	0,182	12	2419	PP
3	2,70	5398	2779	5397	2779	2779	0,194	12	2767	PP
4	2,70	5489	2733	5489	2733	2733	0,193	12	2721	PP
5	2,70	5449	2753	5448	2753	2753	0,194	12	2741	PP
Balistik Sonuçlar:								Açıklamalar:		
Söz konusu mermi tam barut hakkıyla hedefte tam nüfuziyet sağlayamamıştır.										

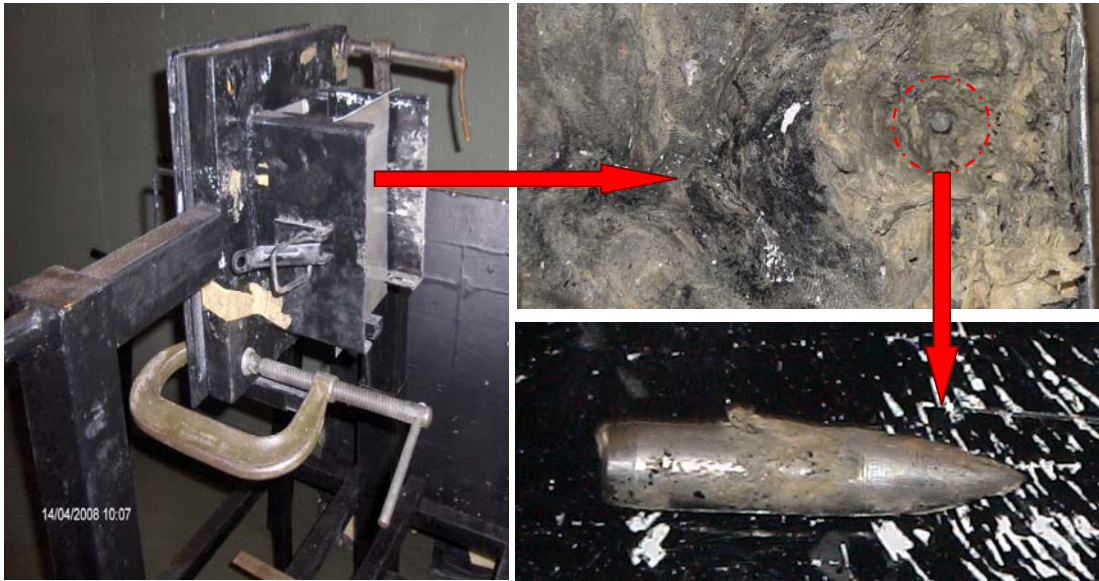


Resim 4.51. 40 mm E-Cam kompozitin balistik testlerine ait ön ve arka yüz fotoğrafları

Resim 4.51'de görülen 6-11 nci atışlar 7,62 mm AP (zırh delici) mermiyle gerçekleştirilmiştir. Zırh delici mermiyle yapılan atış bilgileri Çizelge 4.41'de yer almaktadır. Atışlar sonucunda hedef hattındaki macun kutuda yakalanan (Resim 4.52) mermiler incelendiğinde mermi ucunun aşınma veya kırılmaya uğramadığı, sert mermi çekirdeğinin bir miktar boyca eğildiği tespit edilmiştir.

Çizelge 4.41. 40 mm E-Cam kompozitin 0,30 kalibre AP zırh delici mermi ile balistik testleri

7,62 mm AP Mermi Atış Test Sonuçları (400X400X40 mm E-Cam)										
Atış No.	Barut Miktarı (gr.)	Sensör - 1		Sensör - 2		Ortalama Hız (fps)	Hava Direnç Katsayısı (G)	Hız Kaybı (fps)	Çarpma Hızı (fps)	Sonuç PP: Delmedi CP: Deldi
		Zaman (µs)	Hız (fps)	Zaman (µs)	Hız (fps)					
6	2,70	5456	2749	5454	2750	2750	0,190	11	2739	CP
7	2,00	8135	1844	8136	1844	1844	0,163	9	1835	PP
8	2,40	6120	2451	6120	2451	2451	0,183	10	2441	CP
9	2,25	6550	2290	6549	2290	2290	0,180	10	2280	CP
10	2,10	7684	1952	7685	1952	1952	0,167	9	1943	CP
11*	2,70	5515	2720	5513	2720	2720	0,190	11	2709	CP
Balistik Sonuçlar:								Açıklamalar:		
* 11 nolu atış 40 mm kompozitin arkasına tutturulan ilave 10 mm plaka ile gerçekleştirilmiştir.										



Resim 4.52. 40 mm E-Cam kompozitin balistik testlerinde hedefteki macun tutucuda yakalanan mermi fotoğrafları

4.3.2. E-Cam ve Aramid (Kevlar) dokuma kumaşla üretilen kompozit malzemenin 7,62 mm FSP mermiyle balistik test sonuçları

7,62 mm (0,30 kalibre), yaklaşık 2,851 g ağırlığındaki FSP'ye (parçacık benzetimli mermi) ait fotoğraflar Resim 4.53'de görülmektedir. FSP mermi ile E-Cam ve aramid dokuma kompozitlerin balistik hız limitleri hesaplanmıştır. E-Cam kompozitin V_{50} hesabı Çizelge 4.42'de, aramid kompozitin V_{50} hesabı ise Çizelge 4.43'de verilmiştir.



Resim 4.53. STANAG 2920'ye uygun 0,30 kalibre, 2,851 g FSP mermi

Çizelge 4.42. 15 mm E-Cam kompozitin 7,62 mm FSP mermiyle V_{50} hesabı

7,62 mm FSP Mermi İle V_{50} Balistik Hız Limiti Hesabı (15 mm E-Cam)										
Atış No.	Barut Miktarı (gr.)	Sensör - 1		Sensör - 2		Ortalama Hız (fps)	Hava Direnç Katsayısı (G)	Hız Kaybı (fps)	Çarpma Hızı (fps)	Sonuç PP: Delmedi CP: Deldi
		Zaman (μ s)	Hız (fps)	Zaman (μ s)	Hız (fps)					
1	1,60	8376	1791	8389	1788	1789	0,528	122	1668	PP
2	1,65	8177	1834	8188	1832	1833	0,542	125	1708	CP
3	1,65	8274	1813	8286	1810	1812	0,535	123	1688	PP
4	1,67	8108	1850	8123	1847	1848	0,549	127	1721	CP
5	1,63	8484	1768	8496	1766	1767	0,521	120	1647	PP
6	1,65	7795	1924	7811	1920	1922	0,569	131	1791	CP
Balistik Sonuçlar:								Açıklamalar:		
V_{50} (gerçekleşen) = 1704 fps (519 m/s) olarak bulunmuştur.										

7,5 mm Aramid kompozitin V_{50} balistik hız limiti, 15 mm E-Cam kompozitin balistik hız limiti ile hemen hemen aynıdır. Ancak kalınlıklarını dikkate aldığımızda kalınlığı E-Cam kompozit kalınlığının yarısı kadar olan Aramid

kompozitin aynı seviyede balistik koruma sağlaması aramidin hacim ve kütle etkinliğinin daha yüksek olduğunu ortaya koymaktadır. Resim 4.54'de görülen 300 X 300 mm ebatlarındaki Aramid (Kevlar) ve E-Cam kompozitlerin balistik etkinliği Çizelge 4.44'de verilmiştir.

Çizelge 4.43. 7,5 mm Aramid kompozitin 7,62 mm FSP mermiyle V_{50} hesabı

7,62 mm FSP Mermi İle V_{50} Balistik Hız Limiti Hesabı (7,5 mm Aramid)										
Atış No.	Barut Miktarı (gr.)	Sensör - 1		Sensör - 2		Ortalama Hız (fps)	Hava Direnç Katsayısı (G)	Hız Kaybı (fps)	Çarpma Hızı (fps)	Sonuç PP: Delmedi CP: Deldi
		Zaman (μ s)	Hız (fps)	Zaman (μ s)	Hız (fps)					
1	1,50	8955	1675	8977	1671	1673	0,49	113	1560	PP
2	1,50	9415	1593	9437	1589	1591	0,463	107	1485	PP
3	1,60	8664	1731	8679	1728	1730	0,509	117	1613	PP
4	1,65	7988	1878	7988	1875	1877	0,555	128	1749	CP
5	1,65	7896	1900	7906	1897	1898	0,562	129	1769	CP
6	1,62	8210	1827	8217	1825	1826	0,54	124	1702	CP
Balistik Sonuçlar:								Açıklamalar:		
V_{50} (gerçekleşen) = 1646 fps (502 m/s) olarak bulunmuştur.										



Resim 4.54. 7,5 mm Aramid ve 15 mm E-Cam kompozitin 0,30 kalibre FSP mermi ile V_{50} balistik hız limitlerinin bulunması

Çizelge 4.44'de verilen sonuçlar incelendiğinde, balistik uygulamalarda aramid malzemenin balistik koruma etkinliği gerek hacimsel gerekse kütleli olarak E-Cam dokumanın 2 katı ve üzerindedir. Hafifliğin ve hacmin kritik olduğu araç uygulamalarında, özellikle hava araçlarında kompozit malzeme

takviye elemanı olarak kullanılacaksa aramidin iyi bir çözüm olacağı açıktır. Aramid cam elyafa göre daha üstün balistik koruma sağlamakla birlikte pahalı olması, tedarikin yurt dışı kaynaklı olması, ömürlü malzeme olması, soğuk depolama gerektirmesi gibi dezavantajları da bulunmaktadır.

Çizelge 4.44. Aramid ve E-Cam kompozit malzemenin karşılaştırmalı hacim ve kütle etkinlikleri

Kompozit Cinsi	Kalınlık (mm)	En (mm)	Boy (mm)	Hacim (cm ³)	Kütle (g)	Hacim Etkinliği	Kütle Etkinliği
Aramid,dokuma	7,5	300	300	675	892	2	2,76
E-Cam,dokuma	15	300	300	1350	2458	1	1

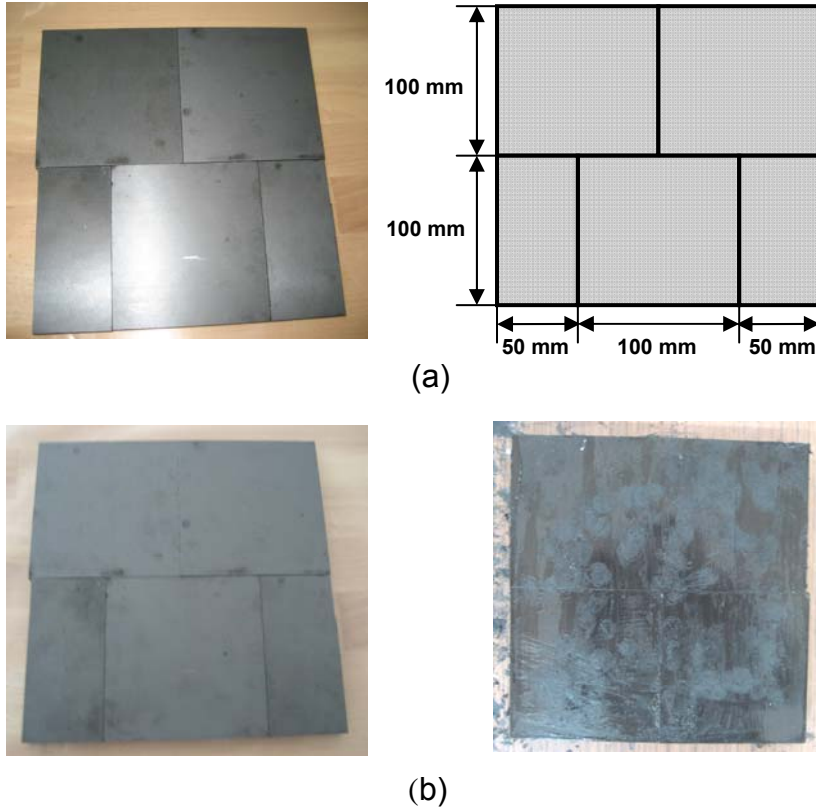
4.3.3. Seramik kompozit zırh sisteminin 7,62 mm AP mermiyle balistik test sonuçları

Balistik testlerde kullanılmak üzere hazırlanan zırh sistemlerinde üç ayrı seramik malzeme kullanılmıştır. Bor karbür ve silisyum karbür seramikler 100x100 mm, Alumina seramikler 100x50 mm boyutlarında kullanılmıştır. Seramik kalınlıkları ise yaklaşık 10 mm'dir. Kompozit malzeme yapısında takviye elemanı olarak E tipi cam elyaf, reçine olarak ise polyester kullanılmıştır. Seramik kompozit zırh sistemi yapısında takviye elemanı olarak yüksek mukavemetli homojen haddelenmiş çelik de kullanılmıştır.

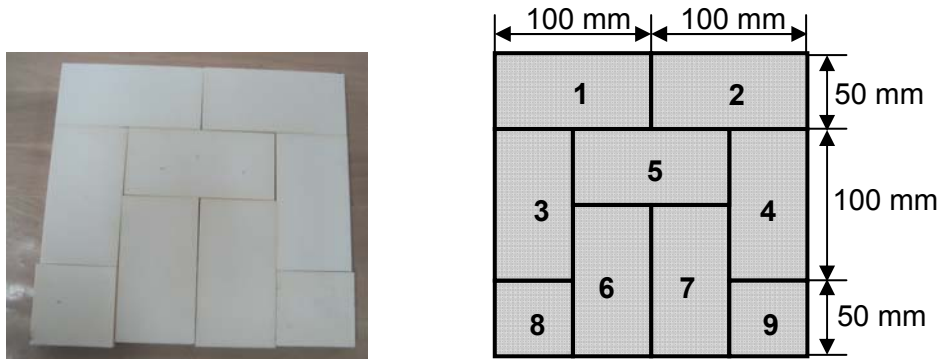
Resim 4.55'de bor karbür ve polimer esaslı kompozit zırh sisteminde kullanılan bor karbür plakaların ölçüleri ve zırh sisteminin ön yüzündeki dizilişi görülmektedir. Resim 4.56'da ise alumina ve polimer esaslı kompozit zırh sisteminde kullanılan alumina plakaların ölçüleri ve zırh sisteminin ön yüzündeki dizilişi görülmektedir.

Atışlı testlerde kullanılan test numunelerinin bileşenleri ve kütleleri Çizelge 4.45'de verilmiştir. Tüm numuneler atış öncesinde koruma maksadıyla ince

alüminyum sac ile kaplanmıştır. Çizelgede görülen kütlelere dış kılıf kütlesi eklenmemiştir. Test numunelerinin alansal yoğunlukları ise Çizelge 4.46'da görülmektedir. B_4C – kompozit çifti en düşük alansal yoğunluğa sahip olan zırh sistemini oluşturmaktadır.



Resim 4.55. Seramik kompozit zırh sisteminde kullanılan bor karbür plakalar (a) Bor karbür plakaların ön yüzdeki dizilişi, (b) Polimer yapıştırıcı uygulanmış bor karbür plakalar



Resim 4.56. Seramik kompozit zırh sisteminde kullanılan alumina plakalar

Çizelge 4.45. Atışlı testler için hazırlanan seramik katmanlı numuneler

Test Numunesi	Seramik Kütlesi (g)	Takviye Plakası Kütlesi (g)	Yapıştırıcı Kütlesi (g)	Toplam Kütle (g)
B ₄ C - Kompozit	1012,7	722,4	48,7	1783,8
Al ₂ O ₃ - Kompozit	1443	731	107	2281
B ₄ C – RHA Çeliği	1017,6	2662,5	47,5	3727,6
Al ₂ O ₃ - RHA Çeliği	1466	2662,5	84,5	4213

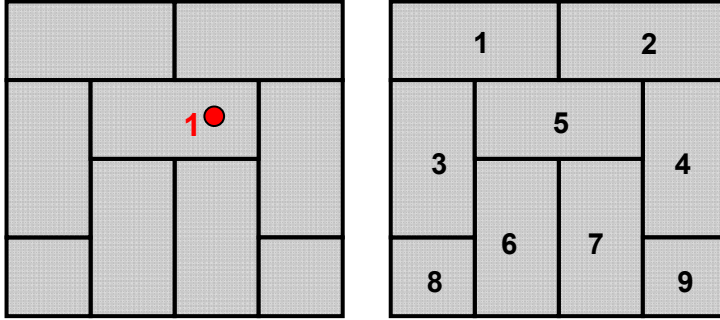
Çizelge 4.46. Atışlı testler için hazırlanan numunelerin alansal yoğunlukları

Test Numunesi	Alansal Yoğunluk (kg/m ²) (Seramik)	Alansal Yoğunluk (kg/m ²) (Takviye)	Alansal Yoğunluk (kg/m ²) (Zırh)
B ₄ C - Kompozit	25,31	18,06	44,59
Al ₂ O ₃ - Kompozit	36,08	18,275	57,03
B ₄ C – RHA Çeliği	25,44	66,56	93,19
Al ₂ O ₃ - RHA Çeliği	36,65	66,56	105,33

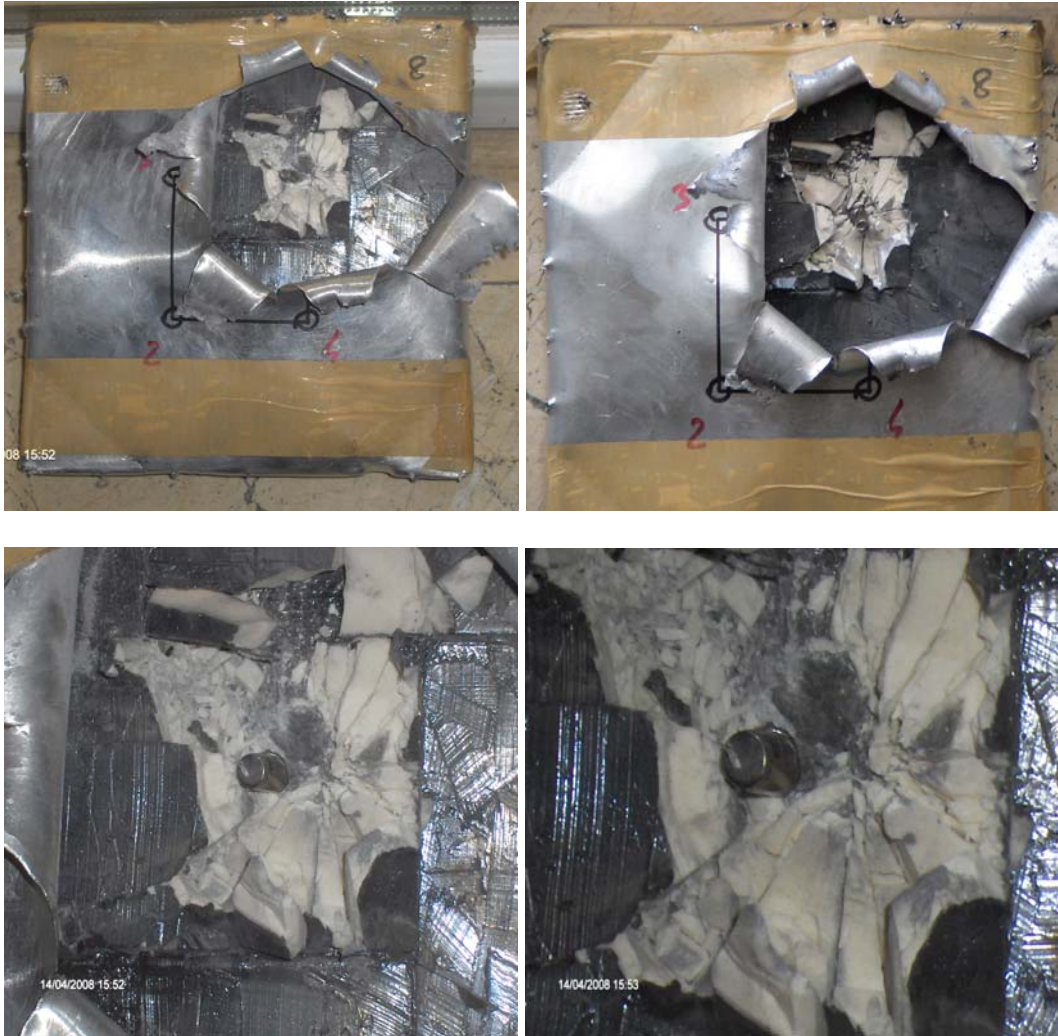
Alumina seramik – RHA çeliği zırh sisteminin 7,62 mm AP mermiyle balistik test sonuçları

Al₂O₃ - RHA çeliğinden oluşan zırh sistemine gerçekleştirilen 1 numaralı (ilk) atışın zırh sistemi üzerindeki isabet noktası Şekil 4.52’de, atış sonrası fotoğrafları ise Resim 4.57’de görülmektedir. 7.62 mm zırh delici mermi ile 1 numaralı atış hızı 845 m/s olarak ölçülmüştür. İlk atış, Al₂O₃ -RHA çeliğinden oluşan zırh sisteminde Şekil 4.52’de görülen 5 numaralı alumina plakasına isabet etmiştir. Balistik darbe sonucu 5 numaralı seramik plakada konik kırılma yapısının olduğu, seramik parçacıklarının genelde büyük parçacıklı prizmaya benzer yapıda kırılma davranışı gösterdiği, kırılmaların çarpma

noktası merkezli radyal yönde geliştiği, teğetsel yönde değişik açılarda kırılma sınırlarının meydana geldiği görülmüştür.



Şekil 4.52. Al_2O_3 - RHA çeliği zırh sistemine ilk atışın isabet noktası



Resim 4.57. Al_2O_3 - RHA çeliği zırh sistemine ilk atış fotoğrafları

Zırh delici mermi seramik plakaya çarptığında mermi ucu deforme olmakta, mermi burnu aşınmaya uğrayarak parçalanmaktadır. Merminin seramikle etkileşimi sonucunda darbeye bağlı olarak basma ve çekme gerilmeleri gerek mermi tarafında gerekse seramik yapıda hakim olmakta ve sert mermi çekirdeği seramikle birlikte kırılmaktadır. Mermilerin kırılma yapısına ait fotoğraflar Resim 4.58'de görülmektedir. 40 mm kalınlığındaki kompozit malzemeye 7,62 mm AP mermi ile yapılan atışlarda mermi ucunun deforme olmadığı, aşınmadığı ve kırılmadığı göz önünde bulundurulduğunda zırh sistemi yapısında ön yüzde kullanılan seramik tabakanın balistik tehdit unsurunu bertaraf etmek için ne kadar önemli olduğu ortaya çıkmaktadır.



Resim 4.58. Zırh delici merminin seramik tabaka içinde kırılma yapısı

Merminin seramikle etkileşimi sürecinde aşınma mermi ile seramikte birlikte meydana gelmektedir. Seramik ön yüzünde toz ve küçük parçacıklar halinde oluşan kırılmalar zırhın dışına doğru hızla dağılmaktadır. Çarpma hızına, seramik ve takviye plakasının özellikleri ile zırh sistemine kılavuzluk eden çerçevenin (tutucu) sağladığı sınır şartlarına bağlı olarak büyüklüğü değişen ve çarpma merkezli olan darbe deliği oluşumu görülmektedir.

Al_2O_3 - RHA çeliği zırh sistemine gerçekleştirilen 1 numaralı atışta balistik

darbe noktası merkez olmak üzere oluşan konik kırılma havuzunda mermi kalibre çapının yaklaşık iki katı çapında bir krater deliğinin RHA çeliği ara yüzüne kadar devam ettiği görülmüştür (Resim 4.59). Balistik darbenin penetrasyon derinliğinin bu zırh sisteminde seramik kalınlığına eşittir.

Mermi hızına bağlı olarak penetrasyon derinliği ve kırılma yapısı değişmektedir. 10 mm alumina ön yüz ve 6,35 mm alüminyum (T2024) arka takviyeden oluşan zırh sisteminin daha düşük hızlı (528 m/s) balistik darbe sonucunda oluşan konik kırılma yapısı Resim 4.60'da görülmektedir.



Resim 4.59. Al₂O₃ - RHA çeliğinde 1 nolu atışta oluşan konik kırılma yapısı



Resim 4.60. Al₂O₃-Alüminyum T2024 zırh sisteminde oluşan kırılma yapısı

Balistik darbe sonucu oluşan konik kırılma yapısı düşük enerjili (ağırlık düşürme testi) darbe sonucu oluşan kırılma yapısına şekil olarak benzemektedir. Ancak balistik darbe durumunda konik kırılma yapısı daha geniş bir alana yayılmıştır. Balistik darbeye, düşük enerjili darbe testlerinde radyal olarak gelişen kırıklara ilave olarak çatlak gelişiminin teğetsel (çevresel) yönde de yayılım göstermesi sonucunda yeni teğetsel kırıklar oluşmuştur.

Al_2O_3 - RHA zırh sisteminde balistik darbe sonucunda kırılmaların 5 cm çapında bir alan içerisinde yoğunlaştığı tespit edilmiştir (Resim 4.61). Bu alan kırılma kraterinin oluştuğu, mermi enerjisinin absorbe edildiği alandır. Kırılmaların etkili olduğu bu bölgede çarpma ile birlikte seramik malzemenin irili ufaklı parçacıklar halinde yüzeyden koparak hedef bölgesinde yaklaşık 1.5 m lik bir alana yayıldığı görülmüştür.



Resim 4.61. Al_2O_3 - RHA çeliği zırh sisteminde alumina plakalarda kırılmalar

5 numaralı plakanın sağ orta noktasına yapılan atışta; söz konusu seramik plakanın Resim 4.61'de görüldüğü gibi 50 x 50 mm'lik sol bölümünün altında

(plaka alt sınırında) meydana gelen 25 x 10 mm büyüklüğündeki iki parçalı kırılma dışında gözle görülebilen bir çatlak ya da kırılma oluşmamıştır. Bu durum alumina seramikte darbe sonucu çatlak ilerlemesi ve kırılma yapısının tüm plakaya nüfuz etmediğini göstermektedir. Alumina seramik plakanın tamamının hasar görmemesi çoklu atış durumunda balistik korumanın sağlanabilmesi için zırh sisteminden istenen olumlu bir özelliktir.

Darbenin etkisiyle, 2 numaralı plakanın üst tarafında dış yüzey kılıfının 2 numaralı plakadan kırılan parçaların hareketliliği sonucunda yer yer yırtıldığı alumina plakanın ise kılıfı dışarı doğru deforme ettiği görülmüştür (Resim 4.57). Bu durum özellikle modüler zırh sistemlerinin uygun bir çerçeve ile desteklenmelerinin balistik koruma açısından önemini ortaya koymaktadır.

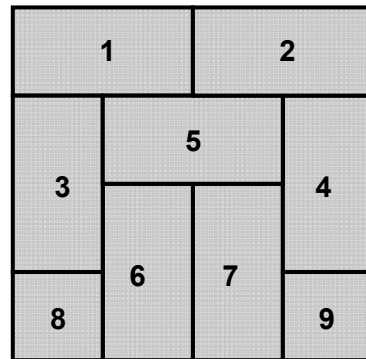
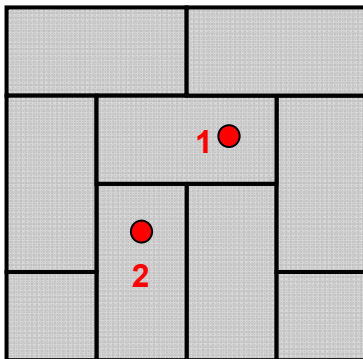
Atış sonrasında darbe gören 5 numaralı plaka ile diğer plakalar incelendiğinde seramik plakaların zırh çeliği üzerinde çok iyi bir yapışma sağladığı, yapıştırıcı özelliğinin mükemmel seviyede olduğu tespit edilmiştir.

Zırh delici merminin ucu seramik tabaka tarafından deforme edilmiş ve zırh sisteminde 8 mm kalınlığındaki RHA zırh çeliğinin yüzeyinde tutulmuştur. Atış sonrasında arka yüzde hiçbir deformasyon tespit edilmemiş, plaka arkasındaki macunda hiçbir çöküntü meydana gelmemiştir (Resim 4.62).



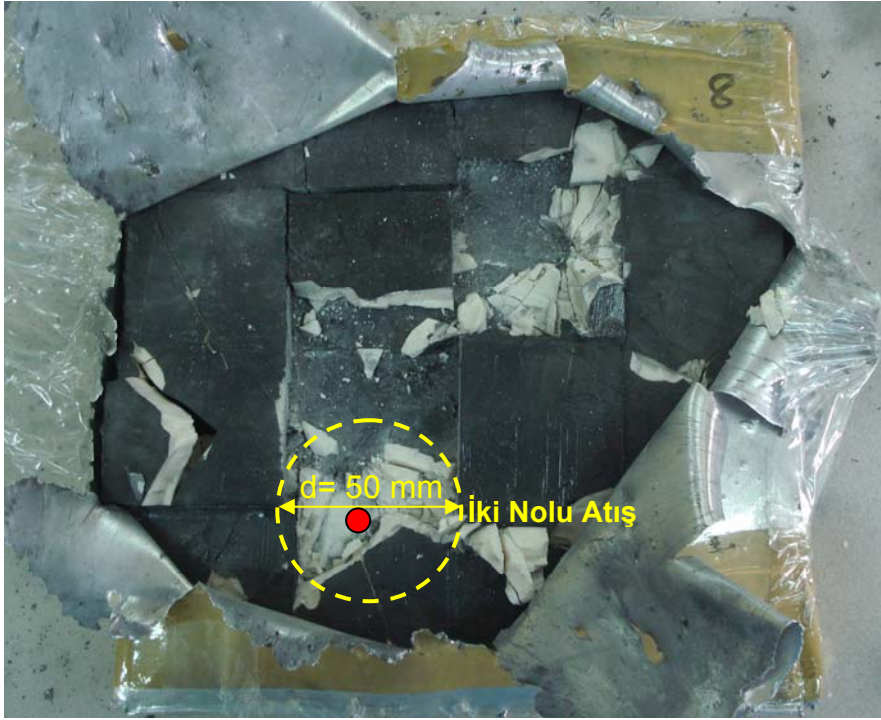
Resim 4.62. Al₂O₃ - RHA zırh sistemi arka yüzünün atış sonrası fotoğrafları

Resim 4.63'de Al_2O_3 - RHA çeliğinden oluşan zırh sistemine gerçekleştirilen 2 numaralı atış fotoğrafları görülmektedir. 2 numaralı atışın hızı 850 m/s olarak ölçülmüştür. Atış sonrasında 6 numaralı plakada konik kırılma yapısının oluştuğu, ancak bütünlüğünü koruyamadığı tespit edilmiştir.



Resim 4.63. Al_2O_3 - RHA çeliği zırh sistemine ikinci atış fotoğrafları

Resim 4.64'de görüldüğü gibi ikinci atış sonrasında da kırılmanın etkili olduğu, kırılma konisi ve krater yapısının oluşarak darbe enerjisinin daha geniş bir alan içerisinde sönmüldüğü bölge yaklaşık olarak 5 cm çapında tesir alanına sahiptir.

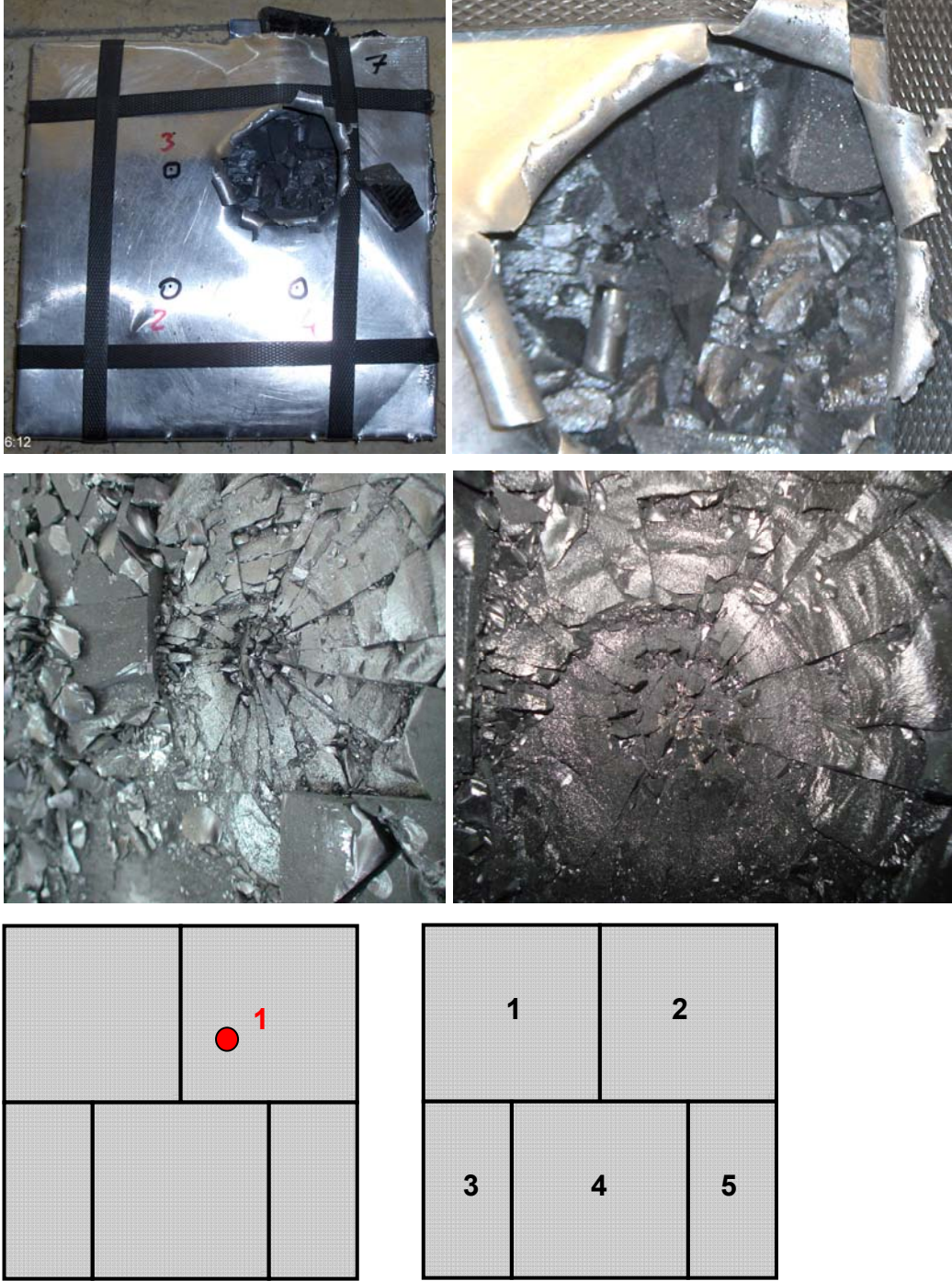


Resim 4.64. Al₂O₃- RHA zırh sisteminde ikinci atışta kırılma etki alanı

Bor karbür – RHA çeliği zırh sisteminin 7,62 mm AP mermiyle balistik testi

B₄C - RHA çeliğinden oluşan zırh sistemine gerçekleştirilen 1 numaralı atışın zırh sistemi üzerindeki isabet noktası ve atış sonrası fotoğrafları Resim 4.65'de görülmektedir. 1 numaralı atış hızı 838 m/s olarak ölçülmüş, atış sonrasında 2 numaralı plakada merminin çarptığı noktada seramiğin tipik kırılma konisi oluşturduğu, atış sırasında seramik toz ve parçacıklarının hedeften 15 metre uzaklıkta atışın yapıldığı namlu tespit sehпасına kadar dağıldığı gözlemlenmiştir. Balistik darbe altında bor karbürün alumina

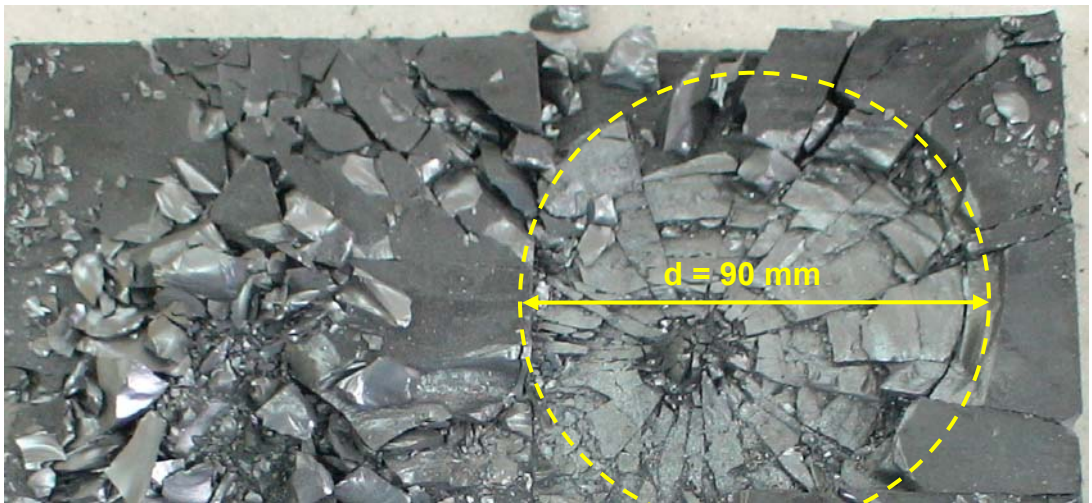
seramiğe göre çok daha küçük parçacıklar ve toz oluşturacak şekilde kırıldığı görülmüştür.



Resim 4.65. B₄C - RHA çeliği zırh sistemine ilk atış fotoğrafları

Merminin zırh sistemi ön yüzündeki seramik tabakaya isabet etmesiyle birlikte çok sert olan seramik mermiyi aşındırmak suretiyle mermi ucunun kırılmasına neden olmuştur. Merminin isabet ettiği nokta etrafında, serbest olan sağ ve üst kenara doğru daha yaygın gelişen kırılma konisi ve krater yapısı oluşmuştur. Küçük bor karbür parçalarının zırh plakasının üst tarafından kılıfı yırtarak dışarı taşıdığı açıkça Resim 4.65’de görülmektedir. Bu durum seramik plakaların serbest sınırlarının belli bir çerçeve içerisinde desteklenmesinin önemli olduğunu ortaya koymaktadır.

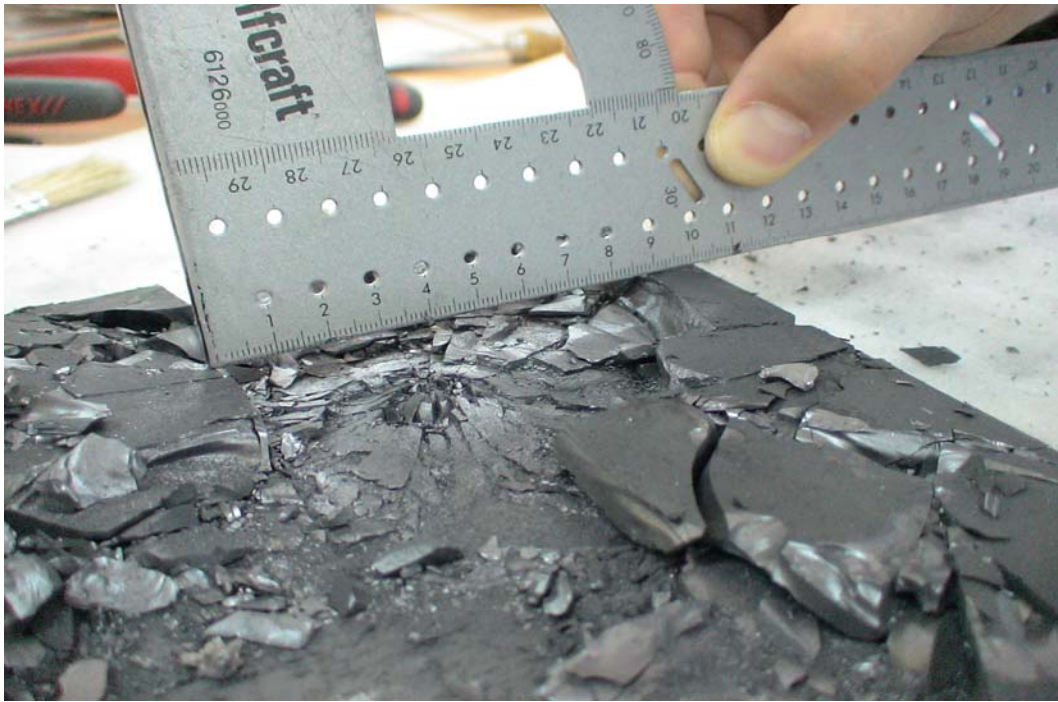
Resim 4.66’da görüldüğü gibi birinci atış sonrasında kırılmanın etkili olduğu, kırılma konisi ve krater yapısının oluşarak darbe enerjisinin daha geniş bir alan içerisinde sönümlendiği bölge yaklaşık olarak 9 cm çapında tesire sahiptir. Kırılma konisi her ne kadar merminin isabet ettiği 2 numaralı plakada meydana gelmişse de yan plakada darbeye bağlı olarak irili ufaklı birçok kırılmanın oluştuğu, bor karbür plakanın bütünlüğünün bozulduğu görülmektedir. Böyle bir zırh sisteminin çoklu vuruşa maruz kalması durumunda zırh sisteminin balistik korumada zayıf kalacağı açıktır. Komşu plakaların darbe sonucu gördüğü hasar dikkate alındığında bor karbürün, alumina seramiğe göre daha zayıf bir yapıya sahip olduğu söylenebilir.



Resim 4.66. B₄C - RHA zırh sisteminde birinci atışta kırılma etki alanı

Resim 4.65 ve Resim 4.66'da görülen kırılma konileri incelendiğinde kırılmanın alumina seramikte olduğu gibi radyal yönde geliştiği, teğetsel yönde değişik açılarda kırılma sınırlarının meydana geldiği tespit edilmiştir. Radyal kırıklar üzerindeki teğetsel çatlaklar birleşerek teğetsel kırılmaların gelişmesine yol açmıştır. Kırılan parçaların darbe merkezinde daha küçük merkezden uzaklaştıkça ise daha büyük kesitli olduğu görülmektedir. Merkezden uzakta meydana gelen kırılmaların alumina seramikte oluşan kırılmalara benzer prizma şeklinde olduğu, ancak darbe civarında oluşan kırılmaların iğnemsî ve ince yaprakımsî kesitler ve toz şeklinde olduğu anlaşılmaktadır.

Resim 4.67'de yaklaşık 9 cm çapında bir alanda oluşan konik kırılma havuzu ve krater yapı oluşumu görülmektedir. Mermi RHA çeliği ara yüzüne kadar ulaşamamış, seramik içerisinde durdurulmuştur. Tam bu noktada oluşan kırılma krateri mermi kalibre çapına eşdeğer büyüklüktedir.



Resim 4.67. B_4C - RHA sisteminde birinci atışta meydana gelen konik kırılma alanı ve krater yapı oluşumu

Birinci atış sonrası oluşan kırılma krateri yapısı Resim 4.68'de daha iyi görülmektedir. Krater yapısının bor karbürde aluminaya nazaran daha iğnemsî bir yapıda olduğu söylenebilir. Kırılma konisi tepe noktasında meydana gelen krater büyüklüğü mermi kalibre çapının yaklaşık olarak iki katı büyüklüğündedir. Krater alanında yer alan kırıklar düzgün olmayan dörtgen prizma şeklinde olup boyca en fazla 3 mm, en ince ise 1,5 mm civarında olduğu gözlemlenmiştir. Krater yapıda yer alan kırıkların kalınlıkları ise 0,1 ile 1 mm arasında değişmektedir.

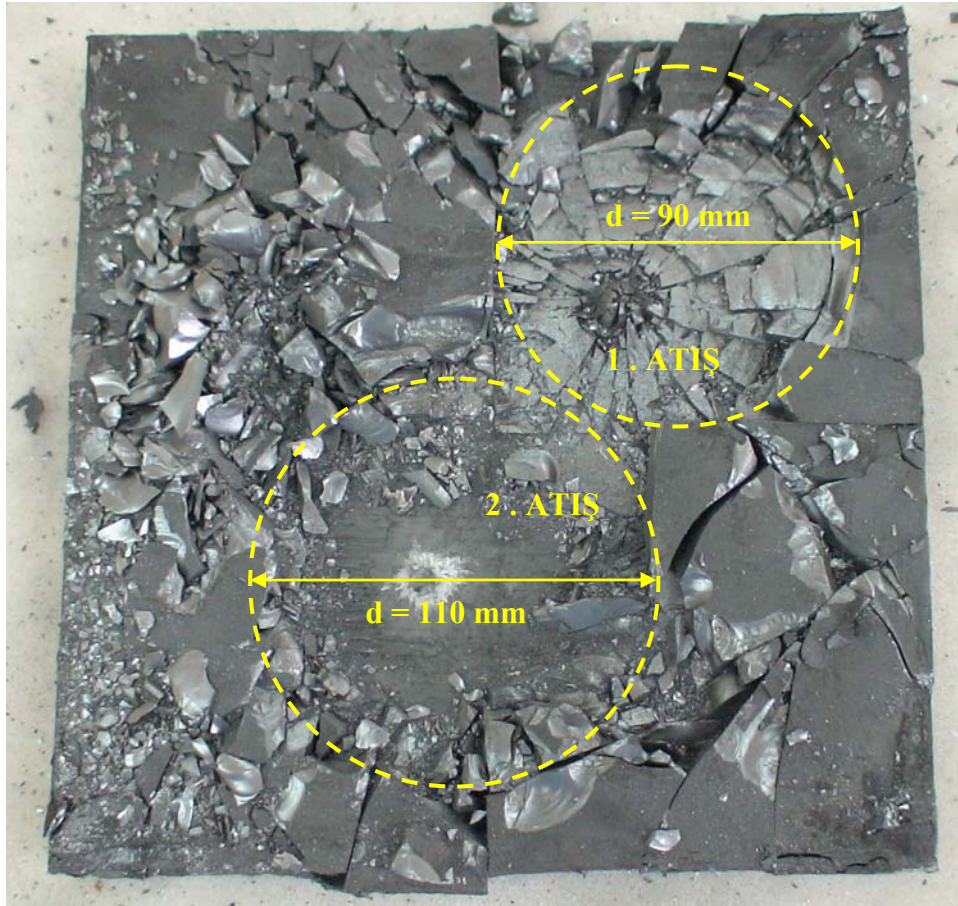


Resim 4.68. B₄C - RHA sisteminde birinci atışta meydana gelen kırılma krater yapısı

Kraterin etrafındaki konik kırılma yapısı 1 mm ile 15 mm arasında değişen büyüklüğe sahip kırılma kabuklarından oluşmaktadır. Camsı kırılma özelliği gösteren kırılma kabukları çok ince (yaklaşık 0,1 - 1 mm arasında) olup krater bölgeden uzaklaştıkça katmanlar halinde üst üste binerek dışa doğru gelişmektedir. Kırılma sınırları radyal ve çevresel olarak simetrik gelişmeyip farklı yapı sergilemektedir.

B₄C - RHA çeliği zırh sisteminde birinci atışa bağlı olarak seramik plakalarda oluşan çatlak ve kırılma gelişimi nedeniyle 839 m/s hızla yapılan ikinci atışın tahribat etkisi ve alanı Resim 4.69'da görüldüğü gibi daha büyük olmuştur. İkinci merminin çarpma noktasında seramikte oluşan kırılma konisi ve krater

yapısı dağılmış, seramik tamamıyla parçalanarak RHA yüzeyinden kopmuş ve zırh çeliği üzerinde darbe noktasında 5 mm çap ve 0,5 mm derinlikte kısmi nüfuziyet (penetrasyon) meydana gelmiştir. Zırh delici merminin ucu seramik tabaka tarafından deforme edilmiş ve mermi, zırh sisteminde 8 mm kalınlığındaki RHA zırh çeliğinin yüzeyinde tutulmuştur. Atış sonrasında zırh sisteminin arka yüzünde hiçbir deformasyon tespit edilmemiş, plaka arkasındaki macunda hiçbir çöküntü meydana gelmemiştir.

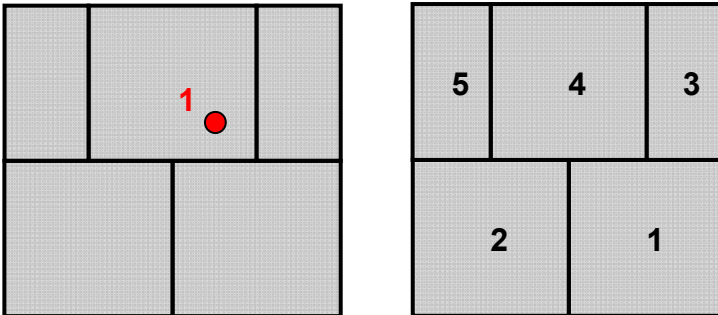
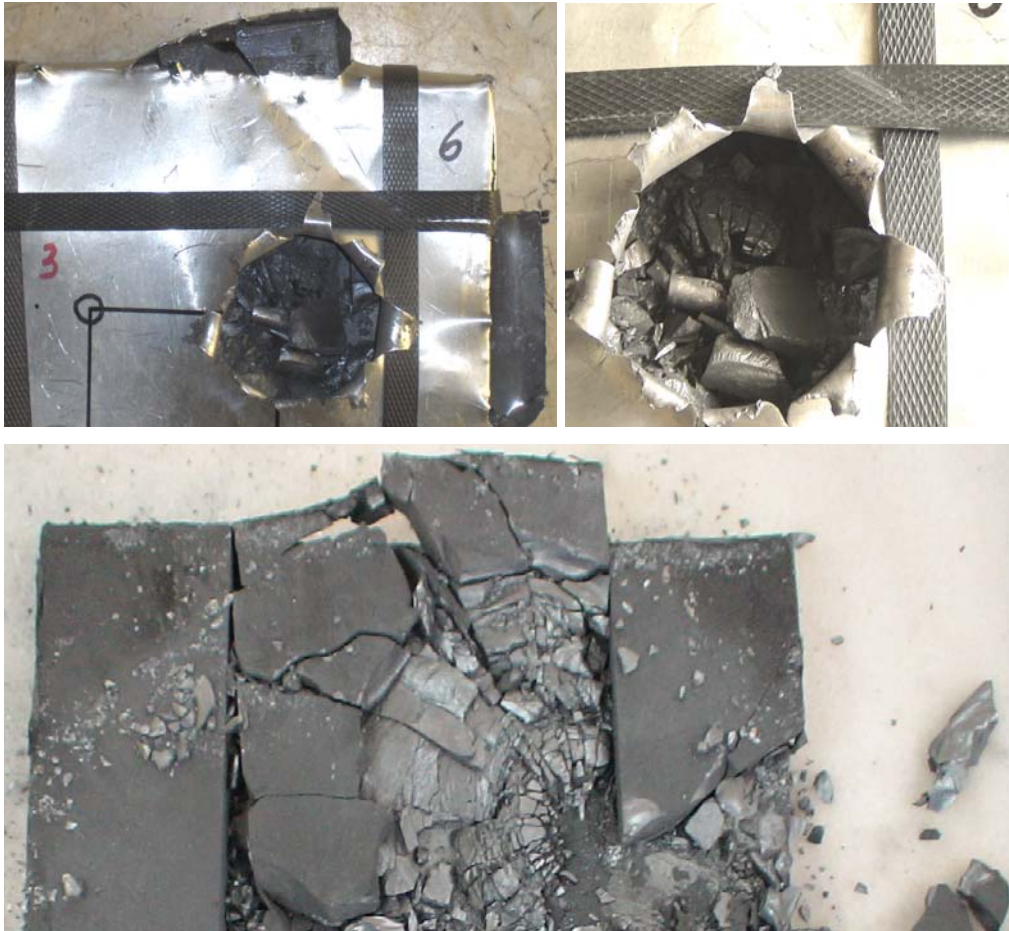


Resim 4.69. B₄C - RHA zırh sisteminde atışların kırılma etki alanı

B₄C-E-Cam kompozit zırh sisteminin 7,62 mm AP mermiyle balistik testi

B₄C – kompozit (E-Camı) zırh sistemine gerçekleştirilen 1 numaralı atışın zırh sistemi üzerindeki isabet noktası ve atış sonrası fotoğrafları Resim

4.70'de görülmektedir. 1 numaralı atış hızı 839 m/s olarak ölçülmüş, atış sonrasında 4 numaralı bor karbür plakasında çarpma noktasında seramiğin tipik kırılma konisi oluşturduğu görülmüştür. Zırh sisteminin dış kılıfında, seramik parçacıklarının dağılması neticesinde Resim 4.70'de görülen taç yaprağı şeklinde açılmanın olduğu tespit edilmiştir.



Resim 4.70. B₄C – E-Cam kompozit zırh sistemine ilk atış fotoğrafları

Resim 4.70'den de görüleceği gibi 4 numaralı 100x100 mm ebatlarındaki bor karbür plakasında sağ yan ve üst kenara ait ve çarpma noktası merkezli olmak üzere yaklaşık 30 derecelik radyal kırılma dilimleri kılıf dışına doğru 25 mm civarında taşmıştır. Darbe alan plakaya komşu konumdaki 3 numaralı plakada, 4 numaralı plakanın saat tersi yönünde bir miktar dönmesine bağlı ve darbe noktasına yakın olması sebebiyle kırılmalar meydana gelmiştir.

Serbest yüzeylerde meydana gelen yoğun çatlak ve kırılmaların darbe ile ortaya çıkan basma gerilme dalgalarının serbest uçta çekme gerilme dalgalarına dönüşmesi ve bu noktada gerilme dalgalarının dışarı doğru seramiğin içindeki yayılma hızının iki katı kadar bir hızda yayılmasından kaynaklandığı değerlendirilmiştir. Sonuçta serbest kenarlardan kopmalar olmuştur. Bu durum seramik plakaların kenar desteğinin ne kadar önemli bir konu olduğunu ortaya koymaktadır.

Bor karbürün kırılma karakterini ortaya koran Resim 4.71'deki fotoğraflar incelendiğinde darbe sonrası konik kırılma havuzunun olduğu ancak çevresel (teğetsel) yönde bütünlüğünün korunamadığı anlaşılmıştır.



Resim 4.71. B₄C - kompozit sistemin ilk atış sonrası kırılma alanı fotoğrafları

Radyal yönde başlayan ve teğetsel (çevresel) yönde de gelişme gösteren kırılmaların, radyal ve çevresel yönlerde eşit büyüklükte ve şekilde olmadığı; merkezde içnemsiz küçük kırıklar oluşurken merkezden uzaklaştıkça kırılmaların daha büyük yapraksı katmanlar, en dış sınırda ise büyük parçacıklar halinde geliştiği görülmüştür (Resim 4.71).

Resim 4.72'de atış sonrasında zırh sisteminden kopan bazı bor karbür kırıklarının yüzey fotoğrafları görülmektedir. Kırık yüzeyleri incelendiğinde balistik darbede, düşük enerjili darbede oluşan radyal kırılmalara ilave olarak çok sayıda teğetsel kırılmaların da meydana geldiği anlaşılmaktadır. Atış sonrasında zırh sistemi dış kılıfında ve kompozit arka yüzünde deformasyon oluşmamıştır (Resim 4.73).



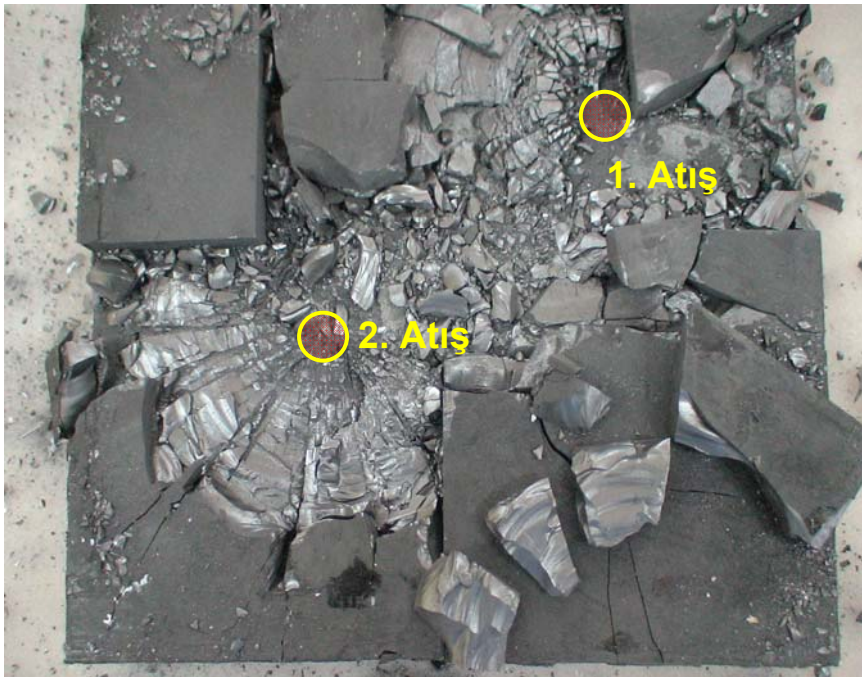
Resim 4.72. B₄C - kompozit sistemde seramikte gelişen teğetsel kırılmalar



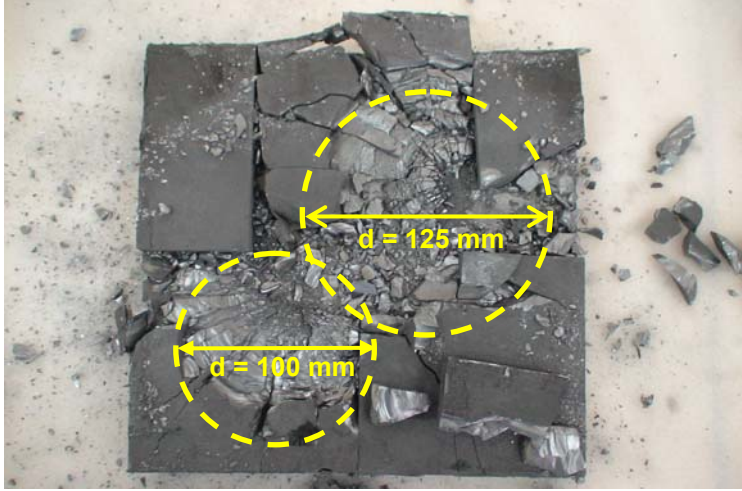
Resim 4.73. B₄C - kompozit sisteminin ilk atış sonrası arka yüz fotoğrafları

Zırh sistemi dış kılıfı açıldığında kompozitin arka yüzünde delaminasyon oluşmadığı, yüzeye sürülmüş olan poliüretan esaslı yapıştırıcının zarar görmediği tespit edilmiştir (Resim 4.73).

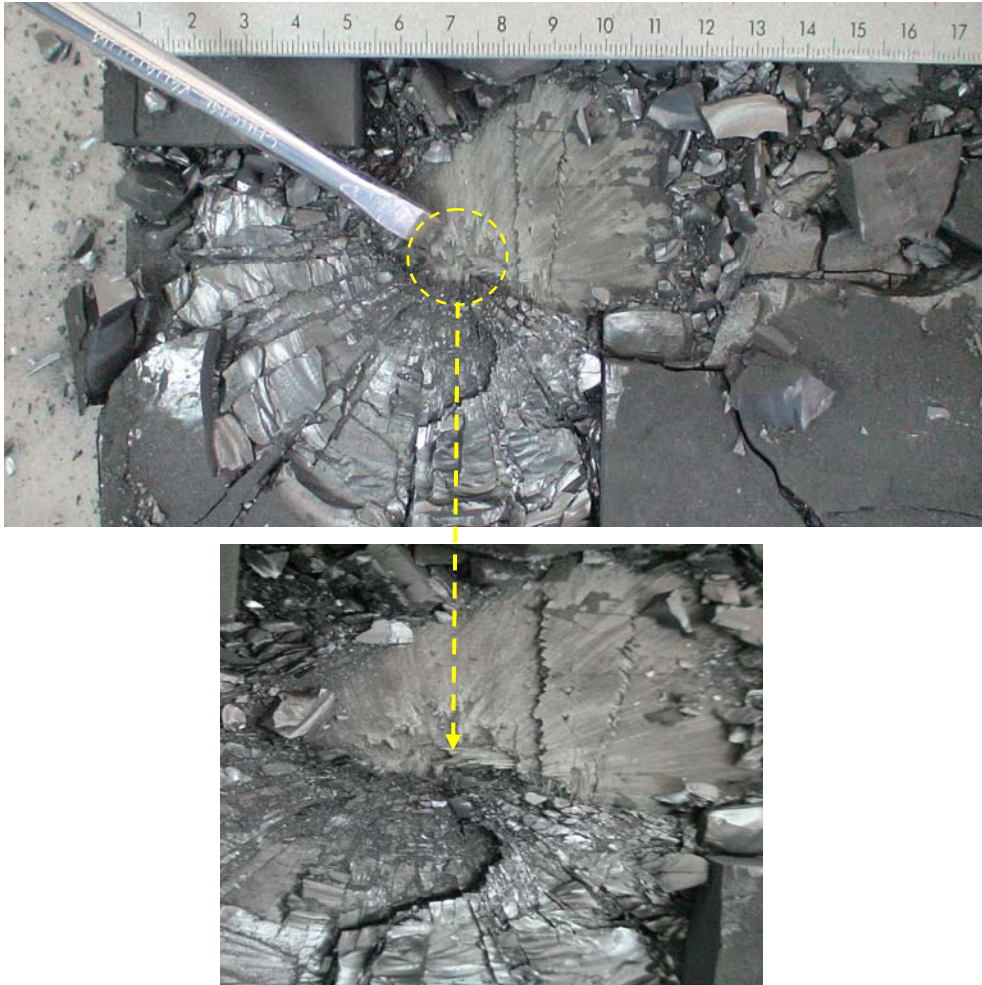
Zırh sistemine 842 m/s hızla yapılan ikinci atışın fotoğrafları Resim 4.74'de; atışlardaki etkili kırılma alanları Resim 4.75 ve Resim 4.76'da görülmektedir.



Resim 4.74. B₄C - kompozit zırh sisteminde ikinci atışta oluşan kırılma yapısı



Resim 4.75. B₄C - kompozit zırh sisteminde atışların kırılma etki alanı

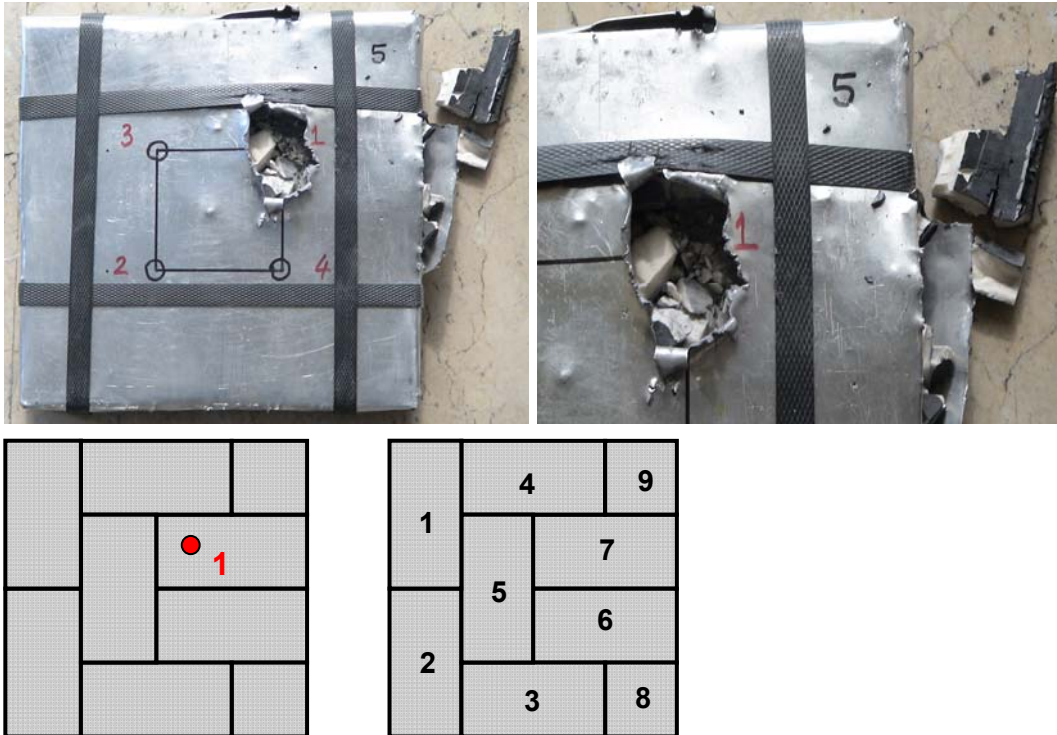


Resim 4.76. B₄C - kompozit zırh sisteminde ikinci atışın kompozit yüzeyde meydana getirdiği hasar (delaminasyon ve fiber kopması)

B_4C – kompozit zırh sistemine gerçekleştirilen ilk atışta darbe noktasında konik kırılma yapısı içerisinde krater yapı tamamen bozulmadığından kompozit ön yüzünde herhangi bir hasar oluşmaz iken ikinci atışta kırılma havuzu içerisinde krater yapı dağıldığından kompozit ön yüzünde delaminasyon ve fiber kopması meydana gelmiştir. Kısmi nüfuziyetin (penetrasyonun) meydana geldiği hasar bölgesi 10 mm çapında, yaklaşık 0,5 ile 1 mm derinliğinde etkiye sahiptir (Resim 4.76).

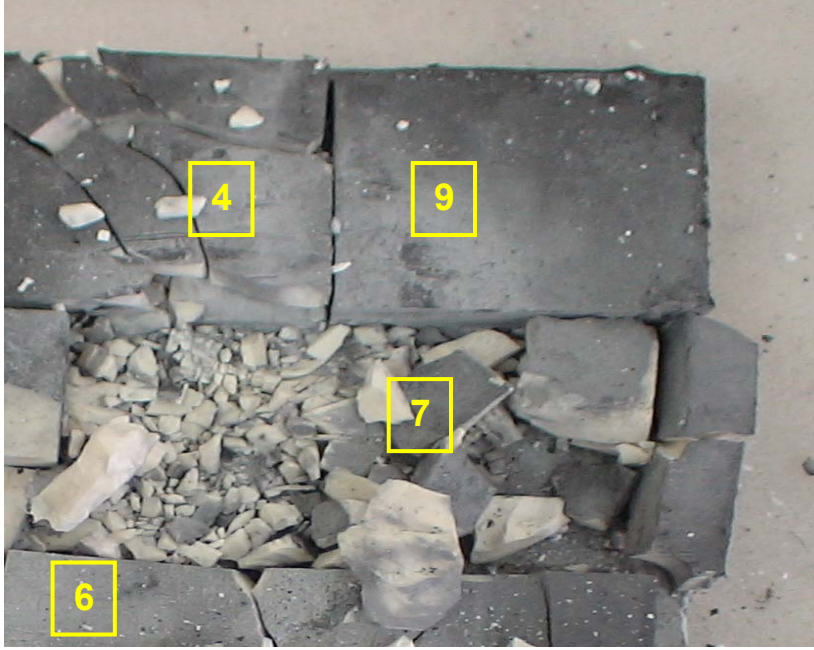
Al_2O_3 – E-Cam kompozit zırh sisteminin 7,62 mm AP mermiyle balistik testi

Al_2O_3 – E-Cam kompozit zırh sistemine 836 m/s hızla gerçekleştirilen 1 numaralı atışın zırh sistemi üzerindeki isabet noktası ve atış sonrası fotoğrafları Resim 4.77’de görülmektedir. Atışın isabet ettiği 7 numaralı plakadan kopan kırılmaların zırhın sağ tarafındaki dış kılıfı yırtarak dışarı taşıdığı görülmüştür. Zırh sisteminin üst kenarındaki 4 numaralı plakada oluşan kırılmaların da dış kılıfı yırttığı tespit edilmiştir.



Resim 4.77. Al_2O_3 - kompozit zırh sistemine ilk atışın fotoğrafları

Atışın isabet ettiği 7 numaralı plakaya komşu olan diğer plakalarda meydana gelen kırılmalar Resim 4.78'de görülmektedir.



Resim 4.78. Al₂O₃ - kompozit zırh sisteminde ilk atış sonrası oluşan kırılmalar

Birinci atışın isabet ettiği bölgedeki küçük parçacıklar ayıklandığında seramiğin konik kırılma yapısı ve krater oluşumu kısmi de olsa görülmektedir (Resim 4.79). Resim 4.79'daki fotoğraflarda cımbızla gösterilen bölgede kompozit yüzeyde küçük bir hasar alanı meydana gelmiştir. Ancak bu hasar, yüzeyde delaminasyon oluşturacak veya fiber kopmasına neden olacak düzeyde olmamıştır.

1 numaralı atış sonrasındaki zırh plakasının arka yüzüne ait fotoğraflar Resim 4.80'de görülmektedir. Alüminyum muhafaza sacındaki çöküntü ile macun kutusundaki yaklaşık 10 mm derinliğinde 46 mm çapındaki çöküntünün plastik gerilme dalgalarının etkisinde meydana geldiği anlaşılmıştır. Muhafaza sacı açıldığında kompozit takviye plakanın arka yüzünde herhangi bir deformasyonun oluşmadığı tespit edilmiştir.



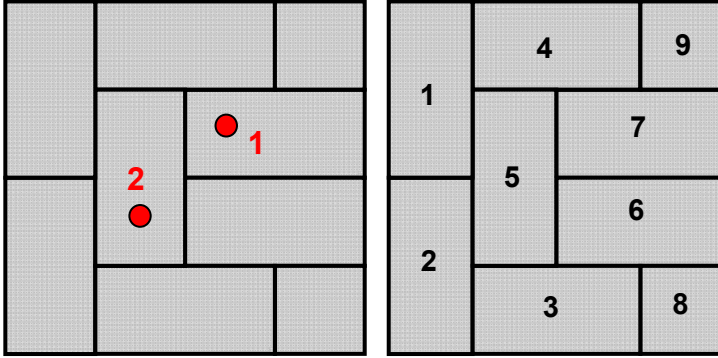
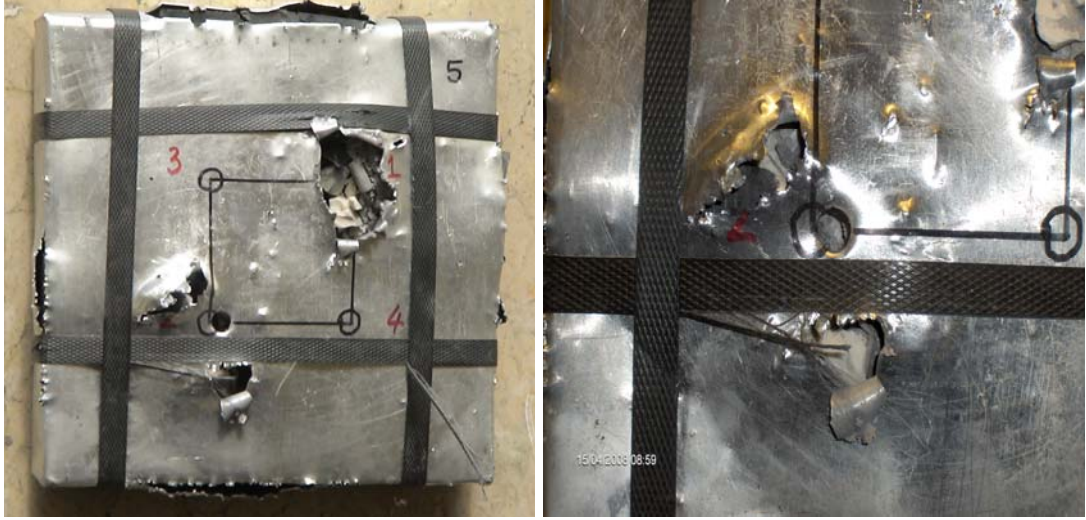
Resim 4.79. Al_2O_3 - kompozit zırh sisteminde ilk atış sonrası hasar yapısı



Resim 4.80. Al_2O_3 - kompozit zırh sisteminin birinci atış sonrası arka yüzü fotoğrafları ve oluşan çöküntünün ölçülmesi

Al_2O_3 – kompozit zırh sistemine ait 2 numaralı atışın hızı 844 m/s olup merminin zırh sistemine isabet noktası ile atışa ait fotoğraflar Resim 4.81’de görülmektedir.

5 numaralı plakaya isabet eden 2 numaralı atış zırh plakasının dış kılıfını mermi çapı büyüklüğünde delmiş, darbe merkezi dışına doğru fırlayan seramik parçaları delik etrafında farklı noktalardan kılıfı yırtmıştır.



Resim 4.81. Al_2O_3 - kompozit zırh sistemine ikinci atışın fotoğrafları

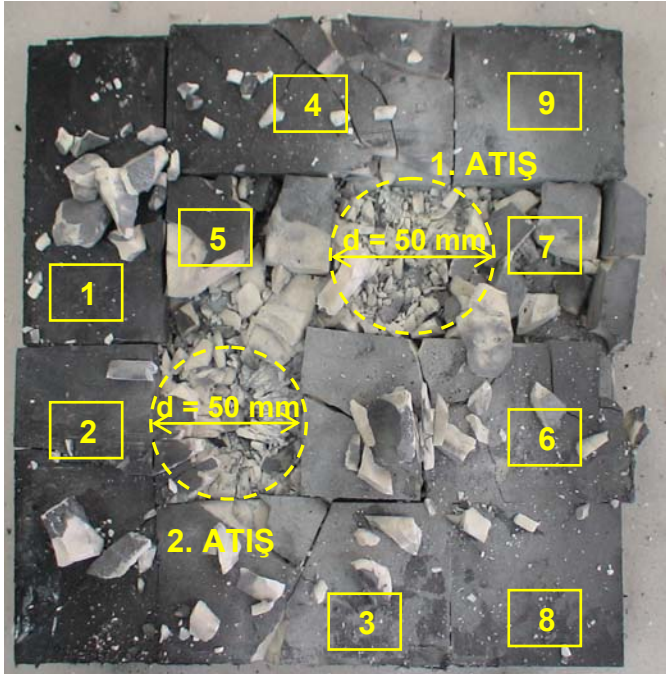
Resim 4.82 ve Resim 4.83'de görüldüğü üzere ikinci atış sonucunda da birinci atışta olduğu gibi yaklaşık 5 mm çapında bir kırılma havuzu meydana gelmiştir. İkinci atışla birlikte balistik darbeye bağlı olarak 2, 3 ve 6 numaralı komşu seramik plakalarda kırılmalar meydana gelmiştir. Büyük parçalı oluşan kırılmalar kompozit takviye plakadan ayrılmamış olması kullanılan yapıştırıcının uygunluğunu göstermektedir.

İkinci atış sonrasında seramik plakada oluşan konik kırılma havuzunun yapı olarak bütünlüğünün korunduğu, ancak balistik darbenin meydana geldiği alanda krater yapının dağıldığı görülmüştür. Krater alanı civarında kırılmaların küçük boyutlu, ince yapıda; kırılma konisi içerisindeki kırılmaların ise büyük boyutlu, daha kalın ve prizma şeklinde olduğu görülmüştür. Radyal

yönde ilerleyen kırılmalar değişik açılarda çevresel kırılma yüzeyleri oluşturarak darbe enerjisini sönmülemiştir.



Resim 4.82. Al_2O_3 - kompozit sistemde ikinci atışta meydana gelen kırılmalar



Resim 4.83. Al_2O_3 - kompozit sistemde meydana gelen kırılmalar

Çarpma ile birlikte sert çelik çekirdek mermide aşınma, gerilme dalgalarının etkileşimi sonucunda da kırılma meydana gelmekte, sivri mermi burnu

kütleserek delme kabiliyetini yitirmektedir. Resim 4.84'de balistik darbe sonrasında kırılan mermiler ve aşınan parçalar görülmektedir.



Resim 4.84. Al₂O₃ - kompozit sistemde balistik darbe sonucu aşınma ve kırılmaya uğrayan sert çelik çekirdekli mermiler

Al₂O₃ – kompozit zırh sistemine gerçekleştirilen 2 numaralı atış sonrasında zırh plakasının arka yüzündeki macunda 11 mm derinliğinde yaklaşık 57 mm çapında bir çöküntünün olduğu görülmüştür. Zırh plakasının arka yüzüne ait fotoğraflar Resim 4.85'de görülmektedir. Bununla birlikte kompozit plakanın gerek ön gerekse arka yüzünde deformasyonun oluşmadığı tespit edilmiştir.



Resim 4.85. Al₂O₃ - kompozit zırh sisteminin ikinci atış sonrası arka yüzü fotoğrafları ve oluşan çöküntünün ölçülmesi

10 mm seramik / 10 mm kompozit zırh sisteminin balistik koruma seviyesinin belirlenmesi

10 mm kalınlığında seramik ön yüz ve kompozit takviye plakadan oluşan seramik kompozit zırh sistemine 7,62 mm AP mermiyle gerçekleştirilen atışların tamamı kısmi penetrasyon ile sonuçlanmıştır. NATO'nun esas aldığı Amerikan NIJ Standardında IV. seviyeye göre 0,30 kalibre (7,62 mm) M2 AP (armour piercing : zırh delici) mermi ile 878 ± 9 m/s çarpma hızında hedef arkasında maksimum 44 mm çöküntüyü geçmeyecek biçimde balistik koruma esas alınmaktadır.

Makine Kimya Endüstrisi Kurumu'na ait 7,62 mm X 51 AP mermilerinde kovanın tam barut hakkı için elde edilen maksimum hız 850 m/s olup bu hızda gerçekleştirilen atışların tamamında da takviye plakaya mermi nüfuziyeti yok denecek düzeyde gerçekleşmiştir. Bu nedenle toplam 20 mm kalınlığındaki zırh sisteminin NIJ Seviye IV'e uygun balistik koruma sağladığı kesin bir şekilde ifade edilebilir.

NATO standardı STANAG 4569' "Lojistik Ve Hafif Zırhlı Araç Personeli İçin Koruma Seviyeleri" a göre 7,62 mm X 51 AP mermi ile 930 ± 20 m/s hız aralığı içerisindeki balistik koruma, Seviye III olarak tanımlanmıştır. 10 mm seramik ön yüz / 10 mm kompozit takviye plakadan oluşan zırh sisteminin balistik koruma seviyesinin Seviye III içinde olduğu değerlendirilmiştir.

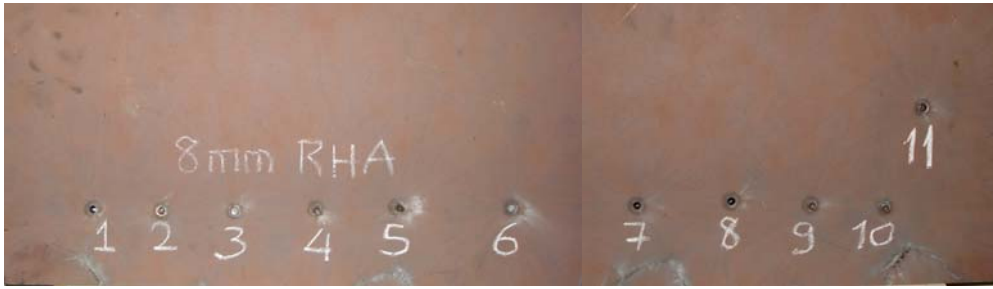
4.4. Homojen Haddelenmiş Yüksek Mukavemetli Çeliğin Balistik Testi

Balistik testlerde mermi kinetik enerjisi (E), $E = \frac{1}{2}mV^2$ şeklinde mermi kütlesine (m), ve mermi hızına (V) bağlı olarak ifade edilebilir. Merminin hedefteki nüfuziyeti ve penetrasyon derinliği mermi kütlesine, geometrisine, burun yapısına, merminin enerjisine, merminin hedefe vuruş açısına, mermi ve zırh malzemesi yapısına bağlıdır.

Bu tez kapsamında homojen haddelenmiş yüksek mukavemetli çelik (RHA çeliği) seramiklerle birlikte kompozit yapıda kullanıldığı gibi aynı zamanda RHA çeliği üzerinde yapılan balistik testlerden elde edilen sonuçlar referans olarak kullanılmak suretiyle seramik kompozit sistemlerin kütle ve hacim etkinliğinin mukayesesi amaçlanmıştır.

4.4.1. RHA çeliğinin 7,62 mm AP mermiyle balistik test sonuçları

8,3 mm kalınlığındaki RHA çeliğinin V_{50} balistik hız limiti hesabında geçerli kabul edilen 7,62 mm AP mermi ile balistik test sonuçları Çizelge 4.47'de atış fotoğrafları ise Resim 4.86'da verilmiştir.



Resim 4.86. 300X900X8,3 mm RHA çeliğinin 7,62 mm AP mermiyle V_{50} balistik hız limitinin bulunmasına yönelik yapılan atışlar

Çizelge 4.47. 8,3 mm RHA çeliğinin 7,62 mm AP mermi ile balistik testi

7,62 mm AP Mermiyle V_{50} Balistik Hız Limiti Hesabı (8,3 mm RHA)										
Atış No.	Barut Miktarı (gr.)	Sensör - 1		Sensör - 2		Ortalama Hız (fps)	Hava Direnç Katsayısı (G)	Hız Kaybı (fps)	Çarpma Hızı (fps)	Sonuç PP: Delmedi CP: Deldi
		Zaman (μ s)	Hız (fps)	Zaman (μ s)	Hız (fps)					
1	1,95	7771	1930	7772	1930	1930	0,166	10	1920	CP
5	1,90	8076	1857	8078	1857	1857	0,163	10	1847	PP
7	1,93	7880	1904	7881	1903	1903	0,165	10	1893	CP
9	1,91	8145	1842	8145	1842	1842	0,162	10	1832	PP
10	1,92	8091	1854	8091	1854	1854	0,163	10	1844	PP
11	1,93	7732	1940	7729	1941	1940	0,167	11	1930	CP
Balistik Sonuçlar:								Açıklamalar:		
V_{50} (gerçekleşen) = 1877,5 fps (572,3 m/s) olarak bulunmuştur.										

300X900X15 mm ebatlarındaki RHA zırh çeliğine 7,62 mm X 63 AP M2 zırh delici mermi ile tam barut hakkında yapılan atışların hiçbirisinde perforasyon meydana gelmemiştir. Kısmi penetrasyonla sonuçlanan atışlara ait fotoğraf Resim 4.87’de görülmektedir.



Resim 4.87. 15 mm RHA çeliğinin 7,62 mm AP mermiyle balistik testi

15 mm RHA çeliğine 7,62 mm AP mermiyle yapılan atış hızı ve hedefteki nüfuziyet bilgisi ise Çizelge 4.48’de verilmiştir. Bu sonuçlara göre 15 mm RHA çeliğinin balistik koruma seviyesinin STANAG 4569’da belirtilen Seviye III’ün üzerinde olduğu anlaşılmaktadır.

Çizelge 4.48. 15 mm RHA çeliğinin 7,62 mm AP mermi ile balistik testi

8 mm RHA Çeliğinin 7,62 mm AP Mermi İle Balistik Testi										
Atış No.	Barut Miktarı (gr.)	Sensör - 1		Sensör - 2		Ortalama Hız (fps)	Hava Direnç Katsayısı (G)	Hız Kaybı (fps)	Çarpma Hızı (fps)	Sonuç PP: Delmedi CP: Deldi
		Zaman (μ s)	Hız (fps)	Zaman (μ s)	Hız (fps)					
1	3,25	5017	2990	5017	2990	2990	0,197	12	2977	PP
2	3,25	5054	2968	5054	2968	2968	0,197	12	2956	PP
3	3,25	5022	2987	5023	2986	2987	0,197	12	2974	PP

4.4.2. RHA çeliğinin balistik darbe altında kırılma davranışı

RHA çeliklerinde balistik darbe sonucu oluşan etkili kırılma alanı mermi kalibre çapı ile mukayese edilebilen lokal bir bölgede oluşmaktadır. Perforasyonla sonuçlanan balistik darbe sonucunda merminin zırh malzemesini zımbalama etkisi ile kesmesi neticesinde oluşan, mermi çapına eşit büyüklükte 'Plug' olarak adlandırılan ve ana malzemeden kopan parça oluşumu çeliklerde görülen tipik kırılma şeklidir (Resim 4.88).



Resim 4.88. Perforasyon neticesinde zırhtan kopan parçalar (plug)

Kısmi penetrasyonla sonuçlanan atışlarda Resim 4.89'daki 3 ve 4 nolu atışlara ait fotoğraflarda görüldüğü gibi zırh delici mermi tam isabet noktasında mermi çapına eşit büyüklükte bir parçayı (plug) zırh malzemesinden kesmeye ve koparmaya çalışmakta ancak enerjisi yetersiz kaldığı için söz konusu parça malzeme kalınlığı boyunca kayarak zırhın gerisinde çıkıntı oluşturmaktadır. Zırh ön yüzündeki penetrasyon derinliği artan darbe enerjisine yani mermi hızına bağlı olarak artmaktadır.

MIL-A-46100D standardına göre yüzey sertliği HB 477 – HB 534 aralığında tanımlanan RHA çeliğine HRC 55 – HRC 65 aralığında yüksek sertlikte çelik çekirdekli merminin nüfuz etmesiyle birlikte oluşan kırılma yapısı seramik ön yüzü zırh sistemlerindeki gevrek kırılma yapısına göre oldukça sünek bir davranış göstermektedir. Seramik ön yüzü zırhlardan farklı olarak RHA

çeliklerinin kırılma yapısında plastik deformasyonun önemli rol oynadığı anlaşılmaktadır.



Resim 4.89. RHA çeliğinin ön yüzünde kısmi penetrasyon neticesinde kalınlık boyunca kayarak arka yüzde çıkıntı oluşturan parça

Resim 4.90 ve Resim 4.91’de zırhlı araçların ana yapısında kullanılan yüksek mukavemetli homojen haddelenmiş çeliğe 14,5 mm RUS B32 mermisi ile yapılan atışların fotoğrafları görülmektedir. Balistik darbe sonucunda çelik ön yüzünde hemen hemen dairesel sayılabilecek bir kesit alanında hasar gelişimi görülmüştür.

Resim 4.90 ve Resim 4.91’deki fotoğraflar incelendiğinde merminin zırhı delip geçerken sivri uç yapısında kırılma veya önemli bir deformasyon meydana gelmediği anlaşılmaktadır. Seramik ön yüzlü zırh sistemlerinde ise mermi ucu seramik katman tarafından aşınmaya uğratılarak mermi köreltilmekte ve kırılmaktadır. Bu özelliğinden dolayı zırhlı araçlarda gövde ve kule ana yapıda kullanılan RHA çeliklerinin kinetik enerjili mermilere karşı ana yapı hasar görmeden balistik koruma sağlayabilmeleri açısından ilave (add on) zırh paketlerinde ön yüzde seramik kullanılması uygun bir balistik çözüm olacaktır.



Resim 4.90. RHA çeliğine 14.5 mm RUS B32 mermisi ile yapılan atışa ait fotoğraflar (0° çarpma açısı)



Resim 4.91. RHA çeliğine 14.5 mm RUS B32 mermisi ile yapılan atışın hedef arkası fotoğrafları (0° çarpma açısı)

4.4.3. RHA eliklerinin balistik koruma seviyelerinin belirlenmesi

8,3 mm kalınlığındaki RHA eliğinin 7,62 mm AP zırh delici mermi ile balistik testi sonucunda balistik hız limiti, $V_{50} = 572,3$ m/s olarak tespit edilmiştir. STANAG 4569'da Seviye II koruma 695 ± 20 m/s aralığında tanımlanmıştır. Bulunan sonuç itibariyle 8,3 mm kalınlığındaki RHA eliğinin balistik koruma seviyesinin Seviye II'ye yakın olduğu söylenebilir.

15 mm kalınlığındaki RHA eliğine 7,62 mm X 63 AP M2 zırh delici mermi ile tam barut hakkında yapılan atışların hiçbirisinde perforasyon meydana gelmemiştir. Bu sonuçlara göre 15 mm kalınlığındaki RHA eliğinin balistik koruma seviyesinin STANAG 4569'da belirtilen Seviye III'ün üzerinde olduğu anlaşılmaktadır. 15 mm RHA eliğinin MIL-A-46100D standardında sahip olması gereken balistik hız limiti, $V_{50} = 718$ m/s olarak verilmiştir. STANAG 4569'da Seviye IV için balistik koruma hız aralığı 911 ± 20 m/s olarak tanımlanmıştır. Buna göre 15 mm kalınlığındaki RHA eliğinin balistik koruma seviyesi Seviye III ile Seviye IV arasında bulunmaktadır.

4.5. Seramik Kompozit Zırh Sistemine Ait Balistik Test Sonuçlarının Değerlendirilmesi ve Referans RHA eliğiyle Mukayese Edilmesi

Kompozit malzemenin tek başına zırh malzemesi olarak kullanılması durumunda kinetik enerjili bir merminin durdurulabilmesi için çok büyük kalınlıkta malzemeye ihtiyaç bulunacaktır. Tek başına kompozit malzemenin veya tek başına seramiğin kullanılması zırhın kütle ve hacim etkinliği açısından uygun bir çözüm üretememektedir. Seramiklerin kırılğan yapısı itibariyle, daha tok bir takviye yapıyla desteklenmeleri de kaçınılmazdır.

Balistik testlerde 7,62 mm AP mermi tehdidine karşı 50 mm kalınlığındaki kompozit malzeme tam barut hakkında yetersiz kalmış, zırh delinmiştir. 50 mm kalınlığındaki E-Cam kompozitin ağırlığının 15,875 kg, boyutlarının da 400x400x50 mm olduğu hesaba alındığında kompozit malzemenin 99,22

kg/m² değerindeki bir alansal yoğunlukla 7,62 mm AP mermi tehdidine karşı başarısız olduğu açıktır.

40 mm kalınlığındaki E-Cam kompozit plakanın balistik testlerinde, 7,62 mm zırh delici merminin yalnızca 7 numaralı atışa ait V= 560 m/s hız değerinde zırhı tam delemeyen durdurulabildiği görülmüştür. 8,3 mm kalınlığındaki RHA zırh çeliğinin 7,62 mm AP zırh delici mermi ile balistik testinde balistik hız limitinin V₅₀ = 572,3 m/s bulunması dikkate alındığında aynı tehdite karşı kompozit plakada yaklaşık olarak 5 kat daha kalın bir plakanın kullanılması gerekmektedir.

E-Cam kompozit malzemenin 7,62 mm AP zırh delici mermi tehdidine karşı MIL-A-12560 standartlarında üretimi yapılmış olan RHA zırh çeliği referans alınarak hesaplanan kütle ve hacim etkinlikleri izelge 4.49'da verilmiştir. Ancak izelge 4.49'da yer alan hesaplamalar 7,62 mm zırh delici merminin tam barut hakkındaki hızına ait balistik sonuçları yansıtmayıp V₅₀ = 572,3 m/s mermi hızı referans alınarak yapılmıştır.

Çizelge 4.49. E-Cam kompozitin kütle ve hacim etkinliği (7,62 mm AP tehdidi, MIL-A-12560 RHA zırh çeliği referanslı)

Test Numunesi	Alansal Yoğunluk (kg/m ²)	Kütle Etkinliği	Hacim Etkinliği
E-Cam Kompozit	79,38	0,82	0,21
RHA eliği (8,3 mm)	64,74	1	1

B₄C – kompozit zırh sistemi 44,59 kg/m², Al₂O₃ – kompozit zırh sistemi 57,03 kg/m² alansal yoğunlukla 7,62 mm AP zırh delici mermi tehdidini tam barut hakkında durdurmuştur. 15 mm kalınlığındaki RHA zırh çeliği ise 7,62 mm X 63 AP M2 zırh delici mermi tehdidine karşı STANAG 4569'da belirtilen Seviye III balistik korumayı sağlamaktadır. Bu sonuçlar itibariyle 7,62 mm AP

zırh delici tehdidi karşısında tek başına kompozit malzeme ve seramik kompozit zırh sistemlerinin MIL-A-46100D standardına göre üretilmiş 15 mm RHA zırh çeliği referans alınarak hesaplanan kütle ve hacim etkinlikleri Çizelge 4.50’de verilmiştir.

Çizelge 4.50. Zırh sistemlerinin kütle ve hacim etkinliği (7,62 mm AP tehdidi, MIL-A-46100D RHA zırh çeliği referanslı)

Test Numunesi	Alansal Yoğunluk (kg/m ²)	Kütle Etkinliği	Hacim Etkinliği
E-Cam Kompozit	> 99,22*	< 0,79*	< 0,30*
Al ₂ O ₃ - Kompozit	57,03	1,37	0,75
B ₄ C – Kompozit	44,59	1,75	0,75
RHA Çeliği (15 mm)	<78**	1,00	1,00

* Mermi zırh sistemi tarafından durdurulamamış, zırh delinmiştir.

** Tam barut hakkındaki atışların hiç birinde zırh çeliği delinmemiştir.

Çizelge 4.50’de verilen sonuçlara göre bor karbür – kompozit zırh sistemi en uygun zırh çözümü olarak ortaya çıkmaktadır. Ancak bor karbürün alumina seramiğe göre çok fazla küçük parçacıklar ve toz şeklinde kırılıp dağılması nedeniyle zırhın yapısal bütünlüğünün korunamamasına bağlı olarak çoklu vuruşlarda etkisiz kalacağı da göz ardı edilmemelidir. Zırhın entegre edileceği savaş aracına (kara, hava), savunma gereksinimlerine (yakın muharebe: tank, helikopter; ateş destek unsuru: top, obüs) ve araç üzerindeki kullanım yerine bağlı olarak uygun zırhın seçilmesi gerekmektedir.

7,62 mm sert çelik çekirdekli zırh delici mermi tehdidine karşı 10 mm seramik ön yüzlü kompozit zırh sistemleri, kütle ve hacim etkinliği açısından oldukça iyi, silah sistemlerinin balistik korumasında entegrasyonu kolay çözümlerin üretilmesini sağlamaktadır. Ancak STANAG 4569’a göre Seviye III’den daha yüksek balistik koruma ihtiyacının bulunması durumunda mermi kalibre çapının ve enerjisinin büyümesine bağlı olarak seramik kalınlığının da

yeterince artırılması; zırh alansal yoğunluğu düşük, kütle ve hacim etkinlikleri yüksek optimum seramik ve kompozit kalınlıklarının kullanılması gerekmektedir.

Çizelge 4.50'ye göre RHA çeliği referans alındığında seramik kompozit zırh sistemi eşdeğer bir balistik koruma için hacim etkinliği açısından arzu edilmeyen bir sonuç ortaya koymaktadır. Bu nedenle seramik kompozit zırh sistemlerinin modüler paket zırh sistemi şeklinde muharebe aracının ana yapısı üzerinde ilave (add on) olarak kullanılması en etkili ve verimli çözümü sunmaktadır. RHA zırh çeliğinden veya çeşitli alüminyum alaşımlarından imal edilmiş olan muharebe aracının gövde ve kule ana yapısı belli bir balistik koruma seviyesine sahip iken üzerine eklenen modüler zırh paketleri ile koruma seviyesi önemli oranlarda artırılabilir.

Ana yapı üzerine entegre edilen modüler seramik kompozit zırh sistemlerinin isabet alması durumunda (kinetik enerjili mermi tehditi karşısında); balistik darbe, ana yapı zarar görmeden lokal olarak isabet kaydedilen modülle sınırlı kalacak şekilde bertaraf edilmektedir. Almanya'nın Leopard 2 A6 tankı, Amerika Birleşik Devletlerinin Abrams tankı, İsrail'in Merkava tankı modüler seramik kompozit zırh paketlerini ana yapı üzerinde ilave (add on) olarak kullanmaktadır.

5. GENEL SONUÇLAR

Bu tez kapsamında ağırlık düşürme test cihazıyla gerçekleştirilen düşük enerjili darbe testleriyle seramik kompozit zırh sistemi bileşenlerinin darbe davranışı incelenmiştir. Kompozit malzemenin darbe davranışını belirleyen ve malzemenin karakterize edilmesinde oldukça önemli olan parametreler arasında yer alan kritik eşik enerjileri; penetrasyon ve perforasyon eşik enerjileri bulunmuştur. Kompozit malzeme tarafından absorbe edilen enerjinin darbe enerjisine bağlı olarak bulunmasıyla malzemeye ait enerji profili (dağılımı) çıkarılmıştır.

Üç farklı kompozit malzeme ile yapılan darbe testlerinde; E-Cam dokuma kompozitin E-Cam tek yönlü [0/90] kompozitle mukayese edildiğinde % 43 seviyesinde daha yüksek darbe yüklemesi dayanımına sahip olduğu, penetrasyon eşik enerjisinin % 33 seviyesinde, perforasyon eşik enerjisinin ise %38 seviyesinde daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Cam elyaf dokuma kumaştan üretilen kompozit malzemenin düşük enerjili darbe hız limitinin tek yönlü cam elyaf kumaştan üretilen kompozit malzemeye göre % 13 seviyesinde daha yüksek olduğu belirlenmiştir.

E-Cam dokuma ve tek yönlü kompozitlerde perforasyon oluşturan enerji seviyelerinin üç katı seviyesindeki darbe enerjisiyle gerçekleştirilen ağırlık düşürme testlerinde, Aramid kompozit malzemedeki darbe hasarının belli bir alanda lokalize olmuş plastik deformasyondan ibaret olduğu, penetrasyonun bile oluşmadığı görülmüştür. Bu sonuçtan hareketle balistik alanda, aramid kompozitin pahalı olmasına rağmen hafiflik ve yüksek balistik koruma gerektiren uygulamalarda özellikle de hava araçlarında kullanımının yerinde olacağı değerlendirilmiştir.

Darbe altında kompozit malzemedeki penetrasyon ve perforasyonla birlikte meydana gelen hasar yapısı incelenmiştir. Düşük enerjili darbe yüklemesi ile ortaya çıkan hasar yapısında Hertz kontak hasarının çok küçük enerjili darbe

testlerinde dahi görülen ve malzemede meydana gelen ilk hasar olduğu tespit edilmiştir.

Değişik enerji seviyelerinde penetrasyon ve perforasyon ile sonuçlanan düşük enerjili darbe testlerinde ilk delaminasyon oluşumuna neden olan Hertz kontak kuvveti ile fiber kırılmalarına neden olan ve ana hasarı ifade eden maksimum kuvvet değerlerinin malzemeye bağlı birer özellik olarak değişmediği görülmüştür.

Darbeye maruz kompozit malzemede delaminasyon hasar yapısını fiber kırılmalarının takip ettiği ve belli bir enerji değerinden sonra artan enerji seviyesinin delaminasyon hasarının daha fazla gelişmesinde etkili olmadığı, ancak fiberlerde kırılma gelişiminin artarak devam ettiği anlaşılmıştır.

Darbe tesirinde kompozit malzemede oluşan tabakalar arası ayrışmaların (delaminasyon) ve etkili fiber kırılma alanının dokuma kumaştan üretilmiş kompozit malzemede atkı ve çözgü ipliklerinin oluşturduğu hücre yapısı içerisinde hapsedildiği, hücre dışına doğru fazla gelişemediği görülmüştür. Bu nedenle aynı darbe enerjisiyle gerçekleştirilen ağırlık düşürme testlerinde cam elyaf dokuma kumaştan imal kompozitlerde darbe hasar alanının tek yönlü cam elyaf kumaştan imal edilen kompozitlere nazaran daha küçük olduğu tespit edilmiştir.

Seramik malzemenin ağırlık düşürme testlerinde kompozit malzemede olduğu gibi darbe enerjisine bağlı olarak geri sekme, penetrasyon ve perforasyon davranışı tespit edilmiştir. Ancak seramiğin oldukça kırılğan yapısına bağlı olarak çok küçük darbe enerjisi altında dahi kırılmaların etkili olduğu anlaşılmıştır. Seramiğin darbe altında konik bir şekilde kırılarak ön yüzde küçük bir alana etki eden darbe kuvvetini arka yüzde geniş bir alana yaydığı görülmüştür.

Paket bir zırh sisteminde seramik plakaların kenarlarının destekli olmasının

balistik tehditler karşısında hem tahrip gücü daha yüksek bir kırılma mekanizması geliştireceği hem de çoklu vuruşlarda etkili balistik koruma sağlayacağı sonucuna varılmıştır.

Düşük enerjili darbe test sonuçlarına göre TÜBİTAK MAM'da üretilen alumina seramiklerin daha tok davranış gösterirken yurt dışından tedarik edilen bor karbür ve silisyum karbürün kırılma tokluğunun daha düşük olduğu tespit edilmiştir.

Balistik test sonuçları dikkate alındığında; kompozit malzemenin balistik etkinlik açısından MIL-A-12560H ve MIL-A-46100D standartlarıyla özellikleri verilmiş olan referans RHA çeliklerine nazaran daha düşük performans gösterdiği anlaşılmıştır. Zırhlı araçların gövde ve kule yapılarının balistik korumasında ana yapı üzerinde tek başına kompozit malzemenin kullanılmasının zırh sisteminin alansal yoğunluğunun artmasına, hacim ve kütle etkinlik değerlerinin ise azalmasına buna bağlı olarak da araç performansının düşmesine neden olacağı; tek başına seramiklerin kullanılmasının ise çok düşük enerjilerde dahi kırılmaları nedeniyle uygun olmayacağı anlaşılmıştır. Zırhlı araçların balistik korumasındaki en etkili çözümün seramiklerin kompozitlerle birlikte optimum kalınlıklarda kullanıldığı modüler paket zırh sistemleriyle üretilebileceği yapılan testlerle birlikte ortaya konmuştur.

Zırh bileşenlerinin balistik hız limiti MIL-STD-662'ye göre, balistik koruma seviyesi ise NIJ standartları doğrultusunda belirlenirken seramik kompozit zırh sisteminin balistik koruma seviyesi STANAG 4569'a göre tayin edilmiştir. Aramid kompozitin balistik koruma etkinliğinin gerek hacimsel gerekse kütleli olarak E-Cam kompozitin 2 katı ve üzerinde olduğu tespit edilmiştir.

Alumina – kompozit zırh sisteminde balistik darbe altında seramik plakaların bütünlüğünün bozulmadığı, kırılma ile sonuçlanan hasar alanının merminin isabet ettiği seramik plakası ile sınırlı kaldığı; bor karbür – kompozit zırh

sisteminde ise kırılma hasar yapısının zırh paketindeki seramik plakaların büyük bölümüne tesir ettiği ve seramik bütünlüğünün kaybolduğu görülmüştür. Bu bağlamda; tez kapsamında kullanılan alumina seramiğin kırılma tokluğunun ve darbe altında oluşan hasar yapısının bor karbürden daha iyi olduğu sonucu çıkarılmıştır.

Balistik testlerde malzemede meydana gelen hasar yapısı da incelenmiştir. Yüksek enerjili balistik testlerde kompozit malzemede oluşan delaminasyon hasar yapısının düşük enerjili ağırlık düşürme testlerine göre farklılık gösterdiği anlaşılmıştır. Balistik darbeye kompozit yapıda delaminasyonların makroskobik boyutta gelişirken düşük enerjili darbeye delaminasyonların büyük oranda mikroskobik boyutta oluştuğu görülmüştür.

Bu tez kapsamındaki ağırlık düşürme testlerinde Instron Dynatup 9250 model test cihazı kullanılmıştır. Cihaza ait mevcut yük hücresinin (kuvvet ölçer) 15 kN kapasitesinden dolayı ağırlık düşürme testlerinde belli bir enerjinin üzerine çıkılamamıştır. TÜBİTAK MAM'da bulunan Dynatup 8100 serisi ağırlık düşürme test cihazı, penetrasyon maksatlı kullanılacak darbe ucu aksesuarının bulunmaması nedeniyle kullanılmamıştır. 45 kJ seviyesindeki yüksek enerjili test cihazı ile seramik kompozit zırh sisteminin darbe testlerinin yapılması, gelişen kırılma yapısının incelenmesi, darbe davranışı en iyi çözüme yönelik seramik ve kompozit kalınlıklarının tayin edilmesi ve optimum zırh çözümünün belirlenmesinin ileride yürütülebilecek ve zırh konseptine önemli katkılar üretebilecek bir araştırma konusu olacağı değerlendirilmiştir.

KAYNAKLAR

1. Alper, İ., Çoruhlu, A., "Silah Sistemleri ve Balistik", *Kara Harp Okulu Basımevi*, Ankara, 77-95, 150-155 (2005).
2. Vaidya, U.K., Abraham, A., Bhide S., "Affordable processing of thick section and integral multi-functional composites", *Composites: Part A*, 32: 1133-1142 (2001).
3. Mahdi, S., Gama, B.A., Yarlagağda, S., Gillespir, J.W., "Effect of the manufacturing process on the interfacial properties and structural performance of multi-functional composite structures", *Composites: Part A*, 34: 635-647 (2003).
4. Gellert, E.P., Cimpoeru, S.J., Woodward, R.L., "A study of the effect of target thickness on the ballistic perforation of glass-fibre-reinforced plastic composites", *International Journal of Impact Engineering*, 24: 445-456 (2000).
5. Tanoğlu, M., Seyhan, A.T., "Investigating the effects of a polyester performing binder on the mechanical and ballistic performance of E-glass fiber reinforced polyester composites", *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 23: 1-8 (2003).
6. Jung, W.K., "Penetration mechanisms of ceramic composite armor made of Alumina/GFRP", *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 8: 38-40, 42-44 (2007).
7. Backman, M.E., Goldsmith, W., "The mechanics and penetration of projectiles into targets", *Int. J. Engng. Sci.*, 16: 1-99 (1978).
8. Abrate, S., "Impact on laminated composite materials", *Appl. Mech.Rev.*, 44: 155-190 (1991).
9. Cantwell, W.J., Morton, J., "The impact resistance of composite materials: Review", *Composites*, 22: 347-362 (1991).
10. Cheeseman, B.A., Jensen, R., Hoppel, C., "Protecting the future: Advanced materials and analysis enable robust composite armour", *The Amptiac Quarterly*, 8: 37-39 (2004).
11. Wijk, A.G., "High velocity projectile penetration into thick armour targets", *International Journal of Impact Engineering*, 22: 54-71 (1999).
12. Rheinmetall, "Handbook of Weaponry", Dusseldorf, 497 (1982).

13. Farrar, C.L., Leeming, D.W., "Military Ballistics", **Brassey's (UK) Ltd.**, 150 (1982).
14. Karagöz, Ş., "Zırh çelikleri", **Zırh Teknolojileri Semineri**, MSB ARGE ve Tekno.D.Bşk.lığı, Ankara, 175-177 (2005).
15. Temiz, S., "Balistik kumaşlar ve test yöntemleri üzerine bir araştırma", Yüksek Lisans Tezi, **Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, İzmir, 4-6 (2005).
16. Baykara, T., "Zırh teknolojileri: Genel bir bakış", **Zırh Teknolojileri Semineri**, MSB ARGE ve Tekno.D.Bşk.lığı, Ankara, 44 (2005).
17. Sert, M., "Seramik bazlı kompozit zırh çözümleri", **Zırh Teknolojileri Semineri**, MSB ARGE ve Tekno.D.Bşk.lığı, Ankara, 243 (2005).
18. Mitrevski, T., Marshall, I.H., Thomson, R., Jones, R., Whittingham, B., "The effect of impactor shape on the impact response of composite laminates", **Composite Structures**, 67: 139-148 (2005).
19. Freitas, M., Silva, A., Reis, L., "Numerical evaluation of the failure mechanisms on composite specimens subjected to impact loading", **Composites: Part B**, 31: 199-207 (2000).
20. Hosseinzadeh, R., Shokrieh, M., Lessard, L., "Damage behavior of fiber reinforced composite plates subjected to drop weight impacts", **Composites Science and Technology**, 66: 61-68 (2006).
21. Şenel, F., Parnas, L., Balya, B., Garcia, J., "Zırhlı araçlarda kompozit parçacık kalkanı (Spall liner)", **SAVTEK 2006, Savunma Teknolojileri Kongresi**, ODTÜ, Ankara, 355 (2006).
22. Khondker, O.A., Yang, X., Usui, N., Hamada, H., "Mechanical properties of textile-inserted PP/PP knitted composites using injection-compression molding", **Composites: Part A**, 37: 2285-2299 (2006).
23. Balya, B., Parnas, L., Şenel, F., "Küçük kalibreli zırh delici mermilere karşı seramik-kompozit zırh", **SAVTEK 2006, Savunma Teknolojileri Kongresi**, ODTÜ, Ankara, 381 (2006).
24. Günay, V., "Seramik zırh malzemeleri ve uygulamaları", **Zırh Teknolojileri Semineri**, MSB ARGE ve Tekno.D.Bşk.lığı, Ankara, 236 (2005).

25. Güden, M., "Katmanlı malzemelerde gerilme dalgası geçişinin deneysel ve nümerik yöntemlerle belirlenmesi: Hopkinson basınç bar deneyleri", **Zırh Teknolojileri Semineri**, MSB ARGE ve Tekno.D.Bşk.İği, Ankara, 222, 223 (2005).
26. Sherman, D., Brandon, D.G., "The ballistic failure mechanisms and sequence in semi-infinite supported alumina tiles", **J. Mater. Res.**, 12: 1335-1343 (1997).
27. Woodward, R.L., O'Donnel, R.G., Baxter, B.J., Nicol, B., Pattie, S.D., "Energy absorption in the failure of ceramic composite armors" **Mater. Forum**, 13: 174-181 (1989).
28. Kaufmann, C., Cronin, D., Worswick, M., Pageau, G., Beth, A., "Influence of material properties on the ballistic performance of ceramics for personal body armour", **Shock Vib.**, 10: 51-58 (2003).
29. James, B., "Practical issues in ceramic armor design", **Ceram. Trans.**, 134: 33-44 (2002).
30. Ernst, H.J., Weisner, V., Wolf, T., "Armor ceramics under high-velocity impact of a medium-caliber long-rod penetrator", **Ceram. Trans.**, 134: 23-31 (2002).
31. Lundberg, P., Renstrom, R., Lundberg, B., "Impact of metallic projectiles on ceramic targets: transition between interface defeat and penetration", **Int. J. Impact Engng.**, 24: 259-275 (2000).
32. Gooch, W.A., "An overview of ceramic armor applications", **Ceram. Trans.**, 3-31 (2002).
33. Hutchings, I.M., "Tribology: Friction and wear of Engineering Materials", **Edward Arnold Conference**, London, 27-32 (1992).
34. Woodward, R.L., "A simple one dimensional approach to modelling ceramic armor composite defeat", **Int.J. Impact Engng.**, 9: 455-474 (1990).
35. Meyers, M.A., "Dynamic behavior of materials", **Wiley Pub.**, New York, 13-19 (1994).
36. Savage, G.M., "Ceramic armour", **Defence & Aerospace**, 487-492 (1990).
37. Gooch, W.A., "An overview of ceramic armour applications", **Ceramic Transactions: Ceramic Armour Materials by Design**, 134: 3-21 (2001).

38. Evcı, C., "Seramik kompozit zırh sistemlerinin kara platformu uygulamaları, balistik performans ve penetrasyona etki eden yapısal parametreler", **SAVTEK 2008, 4.Savunma Teknolojileri Kongresi**, ODTÜ, Ankara, 69-77 (2008).
39. Tanoğlu, M., McKnight, S.H., Palmese, G.R. , Gillespie, J.W., "The effects of glass-fiber sizings on the strength and energy absorption of the fiber/matrix interphase under high loading rates", **Composites Science and Technology**, 61: 205-220 (2001).
40. Olcay, Y., Akyol, M., Gemci, R., "Polimer esaslı lif takviyeli kompozit malzemelerin arabirim mukavemeti üzerine farklı kür metodlarının etkisinin incelenmesi", **Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi**, 7(1): 23-36 (2002).
41. Özaydın, M., "Kompozit malzemelerin balistik özelliklerinin incelenmesi" Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 48-54 (1999).
42. Evcı, C., "Fonksiyonel derecelendirilmiş içi boş, uçları sabit ve serbest silindirde gerilme analizi", Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 1-3 (2004).
43. Philips, N.L., "Design with advance composite materials", **The Design Council**, Great Britain Younnossi O., 324-325 (2001).
44. Markgraaf, J., "Overview of new developments in composite materials for industrial and mining applications", **The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy**, 58 (1996).
45. Hosseinzadeh, R., Shokrieh, M.M., Lessard, L., "Damage behavior of fiber reinforced composite plates subjected to drop weight impacts", **Composites Science and Technology**, 66: 61-68 (2006).
46. Zhou, G., "The use of experimentally-determined impact force as a damage measure in impact damage resistance and tolerance of composite structures", **Composite Structures**, 42: 375-382 (1998).
47. Ceyhun, V., Turan, M., "Tabakalı kompozit malzemelerin darbe davranışı", **Mühendis ve Makine**, 516: 2-3, 5-6 (2003).
48. Übeyli, M., Yıldırım, O., Ögel, B., "On the drop weight testing of alumina/aluminum laminated composites", **Sadhana**, 30: 673-686 (2005).

49. Zhou, G., "The use of experimentally-determined impact force as a damage measure in impact damage resistance and tolerance of composite structures", **Composite Structures**, 42: 375-382 (1998).
50. Aydınel, A., Ögel, B., Yıldırım, O., "CTP art plakalı zırhlarda seramik ön plaka kalınlığının merminin son hızına etkisi", **Zırh Teknolojileri Semineri**, MSB ARGE ve Tekno.D.Bşk.İlğı, Ankara, 176-189 (2005).
51. Şenel, F., Balya, B., Parnas, L., "İleri kompozit zırh malzemelerin balistik analizi", **Zırh Teknolojileri Semineri**, MSB ARGE ve Tekno.D.Bşk.İlğı, Ankara, 121-133 (2005).
52. Hallquist, J.O., "LS-Dyna theoretical manual" **LSTC**, USA, 16: 1-113 (1998).
53. Hosur, M.V., Adbullah, M., Jeelani, S., "Studies on the low-velocity impact response of woven hybrid composites", **Composite Structures**, 67: 253-262 (2005).
54. Tanoğlu, M., Ünaler, E., Seyhan, A., "Kompozit hafif zırh malzemelerinin geliştirilmesi ve karakterizasyonu", **Zırh Teknolojileri Semineri**, MSB ARGE ve Tekno.D.Bşk.İlğı, Ankara, 87-98 (2005).
55. Campbell, J.D., "An investigation of the plastic behaviour of metal rods subjected to longitudinal impact", **Journal of the Mechanics And Physics of Solids**, 117-120 (1952).
56. Hogg, P.J., "Composites for ballistic applications", **Department of Materials Queen Mary, University of London**, 4 (2003).
57. Naik, N.K., Shrirao, P., "Composite structures under ballistic impact", **Composite Structures**, 66: 579-590 (2004).
58. Candan, C., "Zırh teknolojilerindeki gelişmeler", **Zırh Teknolojileri Semineri**, MSB ARGE ve Tekno.D.Bşk.İlğı, Ankara, 194 (2005).
59. Savage, G.M., "Ceramic armour", **Defence & Aerospace**, 487-492 (1990).
60. Sjoblem, P.O., Hartness, J.T., Cordell, T.M., "On low-velocity impact testing of composite materials", **Journal of Composite Materials**, 22: 30-52 (1988).
61. Shivakumar, K.N., Elber, W., Illg, W., "Prediction of low-velocity impact damage in thin circular laminates", **Journal of Composite Materials**, 23: 442-449 (1988).

62. Zhou, G., "The use of experimentally-determined impact force as a damage measure in impact damage resistance and tolerance of composite structures", **Composite Structures**, 42: 375-382 (1998).
63. Cantwell, W.J., Morton, J., "The impact resistance of composite materials - a review", **Composites**, 22: 347-362 (1991).
64. Schubel, P.M., Luo, J.J., Daniel, I.M., "Low velocity impact behavior of composite sandwich panels", **Composites: Part A**, 36: 1389-1396 (2005).
65. Christoforou, A.P., "Impact dynamics and damage in composite structures", **Composite Structures**, 52: 181 (2001).
66. Sutherland, L.S., Guedes, S.C., "The effects of test parameters on the impact response of glass reinforced plastic using an experimental design approach", **Comp. Sci. Techn**, 63: 1-18 (2003).
67. Sutherland, L.S., Soares, C.G., "Impact characterisation of low fibre-volume glass reinforced polyester circular laminated plates", **International Journal of Impact Engineering**, 31: 1-23 (2005).
68. Davies, G., Zhang, X., "Impact damage prediction in carbon composite structure", **Int. J. Impact Eng.**, 16: 49-70 (1994).
69. Zhang, X., "Impact damage in composite aircraft structures experimental; testing and numerical simulation", **Proc. Inst. Mech. Eng.**, 212: 245-259 (1998).
70. Schoeppner, G.A., Abrate, S., "Delamination threshold loads for low velocity impact on composite laminates", **Composites: Part A**, 31: 90-135 (2000).
71. Belingardi, G., Vadori, R., "Low velocity impact tests of laminate glass-fiber-epoxy matrix composite material plates", **International Journal of Impact Engineering**, 27: 213-229 (2002).
72. Joshi, S.P., Sun, C.T., "Impact-induced fracture initiation and detailed dynamic stress field in the vicinity of impact", **Proc. American Society of Composites 2nd Technology Conference**, 177-185 (1987).
73. Shyr, T.W., Pan, Y.H., "Low velocity impact behaviour of textile reinforced composites", **Composite Structures**, 62: 193 (2003).
74. Dorey, G., "Impact damage in composites development, consequences, and prevention", **Proc. 6th Int. Conf. On Composite Materials and 2nd European Conf. On Composite Material**, London, 3: 1-26 (1988).

75. Cantwell, W.J., Morton, J., "Geometrical effects In the low velocity impact response of CFRP", **Comp. Struct.**, 12: 39-59 (1989).
76. Freitas, M., Reis, L., "Failure mechanisms on composite specimens subjected to compression after impact", **Comp. Struct.**, 42: 365-373 (1998).
77. Malik, P.K., "Fiber reinforced composites: Materials, manufacturing and design" **Marcel Dekker**, New York, 80-104 (1990).
78. Rio, T.G., Zaera, R., Barbero, E., Navarro, C., "Damage in CFRPs due to low velocity impact at low temperature", **Composites: Part B**, 36: 41-50 (2005).
79. Mitrevski, T., Marshall, I.H., Thomson, R., "The influence of impactor shape on the damage to composite laminates", **Composite Structures**, 76: 116-122 (2006).
80. Mitrevski, T., Marshall, I.H., Thomson, R., Jones, R., Whittingham, B., "The effect of impactor shape on the impact response of composite laminates", **Composite Structures**, 67: 139-148 (2005).
81. Sutherland, L.S., Soares, C.G., "Impact on low fibre-volume, glass polyester rectangular plates", **Comp. Struct.**, 68: 13-22 (2005).
82. Shyr, T.W., Pan, Y.H., "Impact resistance and damage characteristics of composite laminates", **Comp. Struct.**, 62: 193-203 (2003).
83. Davies, G., Zhang, X., Zhou, G., Watson, S., "Numerical modeling of impact damage", **Composites**, 25: 42-50 (1994).
84. Sjöblom, P., "Simple design approach against low velocity impact Damage", **Proceeding of 32nd SAMPE Symposium**, Anaheim, 29-39 (1987).
85. Jadhav, P., Mantena, P.R., "Parametric optimization of grid-stiffened composite panels for maximizing their performance under transverse loading", **Composite Structures**, 77: 353-363 (2007).
86. Zaera, R., "Modelling of the adhesive layer in mixed ceramic/metal armours subjected to impact", **Composites: Part A**, 31: 823-833 (2000).
87. Zaera, R., Galvez, V., "Analytical modeling of normal and oblique ballistic impact on ceramic/metal lightweight armours", **Int.J.Impact Engng.**, 21: 133-148 (1998).

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : EVCİ, Celal
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri : 30.04.1971 Sivas
Medeni hali : Evli
Telefon : 0 (505) 8868048
e-mail : celalevci@yahoo.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi /Makina Mühendisliği	2005
Lisans	Orta Doğu Teknik Üniversitesi/ Mak.Müh.	1993

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2009-	1'inci Ana Bakım Merkezi K.İği	Kalite Yönetim Müdürü
2006-2009	1'inci Ana Bakım Merkezi K.İği	ARGE ve Tek.Böl. Amiri
2003-2006	Kara Harp Okulu Komutanlığı	Makina Öğretim Üyesi
2001-2003	1011 nci Ana Tamir Fabrikası	İmalat Bölüm Amiri
1998-2001	MSB Ankara İnş.Eml.Bşk.İği	Makina Kontrol Şefi
1993-1998	MSB Diyarbakır İnş.Eml.Bşk.İği	Kontrol Mühendisi

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

1. EVCİ,C. "Seramik kompozit zırh sistemlerinin kara platformu uygulamaları, balistik performansa ve penetrasyona etki eden yapısal parametreler", SAVTEK 2008, Ankara, Cilt II, 76, 2008.

Hobiler

Tenis, Futbol, Basketbol