T.C
SELÇUK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DÜŞÜK HIZLI DARBEYE MARUZ TABAKALI KOMPOZİTLERİN DİNAMİK CEVABI

MEMDUH KARA

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
KONYA 2006

DÜŞÜK HIZLI DARBEYE MARUZ TABAKALI KOMPOZİTLERİN DİNAMİK CEVABI

MEMDUH KARA

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Bu tez 18/05/2006 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği/~~oy çokluğu~~ ile kabul edilmiştir.

Yrd. Doç. Dr. Mesut UYANER
(Danışman)

Prof. Dr. Ahmet AKDEMİR
(Üye)

Yrd. Doç. Dr. Behçet DAĞHAN
(Üye)

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

DÜŞÜK HIZLI DARBEYE MARUZ TABAKALI KOMPOZİTLERİN DİNAMİK CEVABI

Memduh KARA
Selçuk Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Yrd.Doç. Dr. Mesut UYANER
2006- 93 Sayfa
Jüri: Prof. Dr. Ahmet AKDEMİR (Başkan)
Yrd.Doç. Dr. Mesut UYANER
Yrd. Doç. Dr. Behçet DAĞHAN

Bu tezin amacı, düşük hızlı darbeye maruz E–camı/epoksi tabakalı kompozitlerin dinamik davranışını araştırmaktır. Kompozit malzemelerde bir darbe sonucunda oluşan hasar, çarpmanın türüne göre darbeye maruz kalmayan yüzeyde meydana gelebilir veya içyapıda tabakalar arası ayrılma şeklinde oluşabilir. Bu çalışmada düşük hızlı darbeye maruz E–camı/epoksi tabakalı kompozitlerde darbe hızının ve plaka boyutlarının malzemede oluşan hasara etkileri belirlenmiştir. Tek yönlü takviyelendirilmiş tabakacıklar $[0°,–45°,+45°,0°,90°,0°,+45°,–45°,0°]_s$ şeklinde düzenlenerek E–camı/epoksi tabakalı kompozit malzeme üretilmiştir. Darbe testleri özel olarak imal edilen düşey ağırlık düşürme test cihazı ile yapılmıştır. Darbe testlerinde kullanılan vurucu 24 mm çapında, yarı küresel uçlu bir geometriye sahiptir. Vurucu kütlesi 30 kg'dır. 2.0, 2.5 ve 3.0 m/s'lik çarpma hızlarında testler yapılmıştır. Çalışmalarda 180×50 mm, 180×100 mm, 180×150 mm boyutlarında iki tarafı serbest iki tarafı ankastre kompozit levhalar kullanılmıştır ve darbe her bir levhanın merkezine yapılmıştır. Deneylerden elde edilen kuvvet zaman değişimleri ile bunlardan hesaplanan impuls kuvveti ve yutulan enerji değerleri grafikler halinde verilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Plastik matrisli kompozitler, düşük hızlı darbe, dinamik cevap

ABSTRACT

Master of Science Thesis

DYNAMIC RESPONSE OF LAMINATED COMPOSITES SUBJECTED TO LOW-VELOCITY IMPACT

Memduh KARA

Selcuk University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Yrd.Doç.Dr. Mesut UYANER

2006- 93 Sayfa

Jury: Prof. Dr. Ahmet AKDEMİR (Chairman)

Yrd.Doç.Dr. Mesut UYANER

Yrd. Doç.Dr. Behçet DAĞHAN

The aim of this thesis is investigation of dynamic behavior of E–glass/epoxy laminated composites under low velocity impact. The damage in composite materials results of an impact can be taken place on a surface that is not subjected to any impact according to the type of the strike, and it can be started in a manner of delaminations. The importance of the impact velocity, the dimensions of the composite plates are determined for laminated composites subjected to low velocity impact in this study. $[0°,–45°,+45°,0°,90°,0°,+45°,–45°,0°]_s$ oriented uni–directionally reinforced E–glass/epoxy laminates studied were manufactured. The impact tests were conducted with a specially developed vertical drop weight testing machine. Impact tests were performed at impactor mass of 30 kg and impact velocities of 2.0, 2.5 and 3.0 m/s. Hemispherical impactor, 24 mm in diameter was used in all tests. The tests were carried out on plate dimensions of 180×50 mm, 180×100 mm, 180×150 mm with two opposite ends were clamped and the other two ends free and impact load were applied at the center of each plate. Force-time data obtained from experiments and calculated values of impulse force and absorbed energy were given in forms of graphs.

Keywords: Plastic Matrix Composites , low-velocity impact, dynamic response

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın tamamlanmasında her türlü desteği esirgemeyen tez danışmanım Sayın Yrd.Doç.Dr. Mesut UYANER'e minnet ve şükranlarımı sunarım.

Numunelerin hazırlanmasında bilgilerinden ve tecrübelerinden faydalandığım Prof. Dr. Ahmet Akdemir'e, Prof. Dr. Ramazan Karakuzu'ya, Arş.Gör. Bülent Murat İçten'e, İzoreel firması çalışanlarına, cihazın mekanik aksamının tasarlanmasında yardımcı olan Mak. Müh. Recep Görk'e, elektronik aksamın temininde yardımcı olan Salih Şahin'e yardımlarından dolayı teşekkür ederim.

Ayrıca, bu çalışmalarım süresince büyük bir sabırla bana destek olan, aileme sonsuz teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET i
ABSTRACT ii
TEŞEKKÜR iii
SEMBOLLER VE KISALTMALAR vi
1. GİRİŞ 1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI 4
3. KOMPOZİT MALZEMELER 7
3.1. Kompozit Malzemelerin Tanıtımı 7
3.2. Matris Malzemeleri 8
3.2.1. Plastik Matrisler 9
3.3. Takviye Malzemeleri 10
3.4. Tabakalı Kompozitler 12
3.4.1. Polimer Esaslı Tabakalı Kompozit Malzemeler 13
4. DARBE MEKANİĞİ 14
4.1. Giriş 14
4.2. Düşük Hızlı Darbenin Mekaniği 14
4.3. Katı Cisim Darbesinin Tanımı 15
4.4. Katı Cisim Darbe Mekaniğinin Dayandığı Esaslar 17
4.5. Dinamiğin İlkeleri 18
4.5.1. Parçacık Kinetiği 18
4.6. Merkezi Çarpışma İçin Katı Cisim Teorisi 20
4.6.1. Doğrudan Darbenin İzafi Hareket Denklemi: 21
4.6.2. Çarpışmanın Sıkışma ve Geri Bırakma Aşamaları 24
4.6.3. Normal Temas Kuvvetinin İşi 27
4.7. Serbest düşme hareketi 27
4.8. Darbe enerjisi 28
5. TABAKALI KOMPOZİT MALZEMELERİN DARBE DAVRANIŞI 29
5.1. Düşük Hızlı Darbenin Belirlenmesi 30
5.2. Enine Darbe 30
5.3. Darbe Testleri 31
5.4. Tabakalı Kompozit Malzemede Darbe Sonucu Oluşan Hasar Modları 34

5.4.1. Matris Hasarı 35
5.4.2. Delaminasyon 37
5.4.3. Elyaf Kopması 38
5.4.4. Nüfuziyet 38
6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR 39
6.1. Deney Numunesinin Hazırlanması 39
6.2. Malzeme Özelliklerinin Belirlenmesi 40
6.2.1. Yakma Deneyi 41
6.3. Deney Cihazının Hazırlanması 42
6.3.1. Ağırlık Düşürme Test Cihazı 42
6.3.2. Vurucu Durdurma Mekanizması 45
6.3.3. Vurucu Geometrisi ve Kuvvet Algılayıcı 45
6.3.4. Elektronik Kontrol Ünitesi 46
6.4. Deneyin Yapılması 48
6.5. Kalibrasyon 49
7. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME 50
7.1. Vurucu ile Deney Numunesi Arasındaki Temas Kuvvetleri 50
7.1.1. Çarpma Hızının Temas Kuvvetine Etkisi 55
7.1.2. Numune Boyutlarının Temas Kuvvetine Etkisi 57
7.2. Kinetik Analiz Neticesinde Elde Edilen Değerler 60
7.2.1. İvme – Zaman Değişimi 60
7.2.2. Hız – Zaman Değişimi 61
7.2.3. Yer Değiştirme – Zaman Değişimi 62
7.2.4. Kuvvet–Yer Değiştirme Değişimi 63
7.3. İmpuls Kuvveti 66
7.4. Düşük Hızlı Darbede Enerji Dağılımı ve Hasar Bölgeleri 67
8. SONUÇLAR 80
9. KAYNAKLAR 82

SEMBOLLER VE KISALTMALAR

V_y : Yumuşak bir cisimde plastik akmayı başlatmak için gerekli en düşük izafi hız

σ_r : Gerilmenin radyal bileşeni

r : Radyal mesafe

F : Bileşke kuvveti

P*(t)* : Vurucunun impulsu

P'*(t)* : Hedefin impulsu

V : Vurucunun hızı

V' : Hedefin hızı

v : izafi hız

M : Vurucunun kütlesi

M' : Hedefin kütlesi

m : Etkin kütle

n : Çarpışmada temas noktasına teğet düzlemin normali

p_f : Bitiş impulsu

δ : İzafi yerdeğiştirme

P_c : Tepki impulsu

tc : Darbe sırasında izafi hızın sıfır olduğu an

W_n : Darbe esnasında yapılan iş (numunede yutulan enerji)

Π : Potansiyel enerji (darbe enerjisi)

Wf : Elyafın ağırlığı

Wc : Kompozitin ağırlığı

ρf : Elyafın yoğunluğu

ρc : Kompozitin yoğunluğu

Vf : Elyaf–hacim oranı

1. GİRİŞ

Günümüz dünyasında, insanların ihtiyaçları teknolojinin gelişimi ile beraber artmaktadır. Yeni malzeme üretimi, bu ihtiyaçların başında gelmektedir. Tabiatta sınırlı sayıda bulunan ana malzemeler ve bu malzemelerin özellikleri teknolojinin gelişmesiyle, yetersiz kaldığı görülmektedir. Dolayısıyla hem ekonomik hem mukavemetli hem de çok hafif malzemelerin üretilmesi için yapılan çalışmalar yoğunlaştırılmıştır. Böylece, değişik özelliklere sahip birden fazla malzemenin özel yöntemlerle fiziksel olarak birleştirilmeleri suretiyle, elde edilen kompozit malzemeler büyük önem kazanmıştır.

Kompozit malzemeler; tasarımda aranan özellikleri verebilecek uygun bir malzeme üretmek amacıyla, makro boyutta iki veya daha fazla malzemenin birleştirilmesi ile elde edilen yeni malzemelerdir. Makro boyuttan kasıt, malzemenin çıplak gözle veya büyüteçle görülebilecek boyutta olmasıdır. Kompozit malzeme daha iyi mekanik veya ısıl özellikler elde etmek amacıyla makro boyutta birleştirilerek elde edilmiş bir yapıdır.Kompozit malzemeler, kendilerini meydana getiren malzemelerin en iyi özelliklerini gösterecek tarzda, genellikle matris adı verilen ana yapı ile takviye malzemeden oluşurlar. Bundan dolayı bu malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi bu sınıftaki malzemelerin kullanılabilirliklerinin tespiti açısından önemlidir.

Mühendislik uygulamalarında, özellikle de mekanik uygulamalarda, dışarıdan gelecek herhangi bir darbeye karşı beklenmedik sonuçların ortaya çıkmaması için, malzemenin en uygun cevabı verebilmesi istenir. Uygulama yerine ve kullanım amacına göre malzemenin maruz kalabileceği darbeler çok farklı şekillerde olabilir. Genel olarak, darbeler düşük hızlı veya yüksek hızlı olarak sınıflandırılırlar, fakat bu kategoriler arasında açık bir geçiş yoktur. Yapılan araştırmalar bu geçişin belirlenmesinde henüz net bir sonucun elde edilemediğini göstermektedir. Bu konuda yapılmış çalışmalardan bir kısmı düşük hızlı darbeyi hedefin rijitliğine, malzeme özelliklerine, çarpan cismin kütle ve rijitliğine bağlı olarak 1 ila 10 m/s arasında değişen hızlar olarak değerlendirilmesi gerektiğini savunmaktadır.

Buna karşın darbeye karşı olan cevap da malzemenin kendisi tarafından belirlenir. Şöyle ki, metal ve metal alaşımlarında darbe sonucunda oluşan hasar darbeye maruz kalan yüzeyde meydana gelir. Kompozit malzemelerde ise darbe sonucunda oluşan hasar, çarpmanın türüne göre darbeye maruz kalmayan yüzeyde de meydana gelebilir. İçyapıda delaminasyonlar (tabakalar arasında ayrılma) şeklinde görülebilir. Metallerde darbe cevabı, plastik şekil değiştirme sonucunda bir kopma veya kırılma şeklinde olmasına rağmen, kompozitler çok değişik modlarda hasara uğrayabilirler ve bu hasar modlarında parçanın yapısal bütünlüğünde ciddi bir değişiklik meydana gelmez.

Tabakalı kompozitler birçok mühendislik alanında kullanılır ve yabancı cisimler tarafından darbeye maruz kalabilirler. Darbeden kaynaklanan hasar, üretim, bakım ve servis işlemleri sırasında ortaya çıkabilir. Kullanım sırasındaki darbeye örnek olarak uçağın kalkış ve iniş sırasında lastiklerin yüksek hız kazanmasından sonra pistten fırlayan taş ve küçük parçacıkların yaptığı darbe verilebilir. Üretim ve bakım sırasında kullanılan takımlar yapı üzerine düşürülebilir. Bu durumda darbe hızları küçük fakat etkisi büyüktür. Tabakalı kompozit yapılar benzer metalik yapılara nazaran darbe hasarına daha duyarlıdır. Kompozit yapılarda darbe gözle muayenede belirlenemeyen iç hasarlar oluşturur. Bu iç hasar mukavemette azalmaya sebep olur ve yük altında büyür. Bu nedenle kompozit yapılar üzerine yabancı cisim darbelerinin etkileri anlaşılmalıdır ve tasarım aşamasında uygun önlemler dikkate alınmalıdır. Darbelerin kompozit yapıların performansına etkileri kompozit malzemelerin kullanımında kısıtlayıcı bir etkendir. Bu nedenlerle kompozit malzemelerin düşük hızlardaki darbe problemi önemli pratik ve teorik uygulamaları temsil eder.

Darbe üretmek için birçok test tekniği kullanılmaktadır. Bununla birlikte kompozit malzemelerin darbe davranışını karakterize etmek için standart bir test tekniği veya farklı ülkeler, kuruluşlar ve araştırmacılar arasında yaygın bir şekilde kabul edilen herhangi bir teknik mevcut değildir. Bu durum, farklı kaynaklardan alınan sonuçların karşılaştırılacağı zaman problem oluşturmaktadır. Çünkü kompozit

malzemelerin darbe cevabı için uygun bir model geliştirme girişimleri zorlaşmaktadır. Bu olumsuzluklara rağmen kompozit malzemelerin darbe dirençlerinin belirlenmesi amacıyla günümüzde çeşitli şekillerde geliştirilen test cihazları yaygın olarak kullanılmaktadır.

Bu çalışmanın yapılabilmesi için öncelikle Selçuk Üniversitesi Kadınhanı Meslek Yüksekokulu laboratuarında özel bir ağırlık düşürme test cihazı geliştirilmiştir. Darbe testleri özel olarak geliştirilen düşey ağırlık düşürme test cihazı ile yapılmıştır.

Bu çalışmada kullanılmak üzere İzoreel firmasında 18 tabakalı E camı/epoksi kompozit malzeme üretilmiştir. $[0°,–45°,+45°,0°,90°,0°,+45°,–45°,0°]_s$ şeklinde tek yönlü güçlendirilmiş kompozit malzeme bu çalışmada kullanılmıştır.

Farklı boyutlardaki deney numunelerine düşük hızlı darbeler yapılmıştır. Darbe sonucu kuvvetin zamana göre değişimini veren grafikler elde edilmiştir. Ayrıca ivme-zaman, hız zaman, yer değiştirme-zaman ve kuvvet-yer değiştirme grafikleri çıkarılmıştır. Darbe enerjisinin ne kadarlık bir kısmının malzeme tarafından yutulduğu tespit edilmiştir. Malzemedeki hasar bölgeleri incelenmiş ve oluşan hasar modları tespit edilmiştir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Tabakalı kompozit malzemelerin düşük hızlı darbeye vermiş oldukları cevap ile ilgili birçok deneysel çalışmalar yapılmıştır ve analitik yöntemler geliştirilmiştir. Bu alandaki önemli çalışmaların bir kısmı şunlardır:

Dinamik yükleme altındaki kompozit malzemeleri karakterize etmek için ilk çalışmalar Rotem ve Lifshits (1971), Lifshits (1976) ve Sierakowski ve ark. (1971) tarafından yapılmıştır. Sierakowski ve Chaturvedi (1997) ve Abrate (1998) çeşitli darbe modeli ve muayene yöntemlerinde ilerlemeler kaydetmişlerdir.

Teorik hesaplamalar darbe cevabını önceden belirlemek için yapılmıştır. Sun ile Chattopadhyay (1975) ve Dobyns (1981), Whitney ile Pagano (1970) tarafından merkezinden darbeye maruz basitçe desteklenmiş bir ortotropik plağı incelemek için geliştirilen plaka denklemlerini kullanmışlardır. Green (1992,1993) darbe altındaki gerilme alanlarını değerlendirmek için dalgalı yayılma teorisini kullanmıştır. Chritoforou ve Yiğit (1996) moment denge metodu kullanarak basitçe desteklenmiş bir kompozit kirişin enine darbesi üzerinde çalışmıştır. Sankar (1992) en büyük temas kuvveti, temas süresi ve arka yüzeydeki en büyük şekil değiştirme gibi darbe karakteristiklerini önceden belirlemek için yarı ampirik bir formül sunmuştur.

Tabakalı kompozitlerin düşük hızlı darbe cevabı analitik olarak Ramkuar ve Chen (1982), Sun ve Jih (1995) ve Abatan ve ark. (1998) tarafından araştırılmıştır. Gong ve Lam (1999) tarafından düşük hızlı darbeye karşı plaka cevabının önceden tahmin edilmesi için yaklaşık bir çözüm sunulmuştur. Bu çözüm, temas kuvveti ve enine kayma şekil değiştirmesinin etkisi gibi plakanın ve takviye elemanlarının beraberce hareketlerini içerir. Hibrit tabakalı kompozit plakaların düşük hızlı darbeye bağlı cevabı kayma deformasyon teorisi kullanılarak Lee ve ark. (1997) tarafından araştırılmıştır. Kim ve Kang (2001) darbe kuvvetini önceden belirlemek için enine darbeye maruz kompozit plakaların dinamik şekil değiştirmesinden yeni bir analitik metot geliştirmişlerdir.

Goo ve Kim (1997) düşük hızlı darbe altında tabakalı kompozit plakaların dinamik temas analizini yapmışlardır. Düzeltilmiş Hertz temas kanunu gibi basit kanunlar, kompozit plakaların dinamik temas durumuna uyarlamak için kullanılmıştır. Pierson ve Vaziri (1996) tarafından tabakalı kompozit plakaların darbe cevabı için analitik bir model sunulmuştur.

Lal (1982,1983) grafit/epoksi tabakaların enine darbe davranışı ile ilgili deneysel ve analitik bir çalışma yapmıştır. Basit bir enerji yayma modeli darbe sonrası numunenin kalıntı mukavemetini tespit etmek için geliştirilmiştir.

Rijit bir küre ile darbe yapılan kompozit sandviç plakanın dinamik cevabı nümerik ve deneysel olarak Lee ve ark. (1993) tarafından araştırılmıştır. Wang ve Vukhann (1994) karbon elyaf bulunan PEEK çapraz katlı tabakaların düşük hızdaki darbesini iki basit yaklaşım kullanarak araştırmıştır.

Whittingham ve ark. (2004) ön gerilme altındaki karbon fiber/epoksi tabakaların düşük hızlı darbe cevabını araştırmışlardır. Ön gerilme altındaki numunede oluşan vurucu dalma miktarı, vurucu delme miktarı, yutulan enerji ve en büyük darbe kuvveti deneysel olarak tespit edilmiştir.

Belingardi ve Vadori (2003) karbon-elyaf/epoksi kompozit malzemelerde plaka kalınlığının düşük hızlı darbe davranışına etkilerini araştırmışlardır. Üç farklı kalınlıktaki deney numunelerine yarı-statik ve dinamik darbe yüklemesi yapılmıştır. Kuvvet-yer değiştirme eğrileri çıkarılarak numunelerin farklı darbe hızlarındaki enerji yutma kabiliyetlerini araştırmışlardır. Mitrevski ve ark. (2005) farklı vurucu geometrilerinin kompozit malzeme üzerindeki darbe etkilerini incelemişlerdir. Karbon-epoksi tabakalara yarı küresel, konik ve sivri vurucularla darbeler yapmışlardır. Kuvvet-zaman değişimini ve numunelerin yuttuğu enerji miktarlarını deneysel olarak tespit ederek vurucu geometrilerinin etkilerini değerlendirmişlerdir.

Hosseinzadeh ve ark. (2005) fiberle güçlendirilmiş kompozit levhaların düşen ağırlık darbelerindeki hasar cevabını incelemişlerdir. Dört farklı fiberle

güçlendirilmiş tabakalı kompozit plakalara düşük hızlı darbeler yapmışlardır. Numunelerdeki hasar bölgelerinin haritalarını çıkararak darbe enerjisi-hasar çapı değişimi elde etmişlerdir. Farklı numunelerdeki değişimleri rapor etmişlerdir. Sugun ve Rao (2004) cam, karbon ve kevlar takviyeli kompozitlere tekrarlı düşürme testleri yaparak düşük hızlı darbe karakteristiklerini çalışmışlardır. Kompozit plakalar üzerine delinme oluncaya kadar tekrarlı darbeler yapmışlardır. En büyük kuvvet-darbe sayısı değişimi ve darbe enerjisi-darbe sayısı değişimlerini deneysel olarak tespit etmişlerdir. Son darbeden sonra numunelerdeki hasar bölgelerinin haritaları çıkarılarak incelenmiştir.

E-camı/epoksi tabakalı kompozit plakaların darbe altındaki davranışı Mili ve Necip (2001) tarafından deneysel olarak çalışılmıştır. Ağırlık düşürme darbe cihazı kullanmışlardır. Vurucu hızlarının ve tabakalanma sırasının kompozit plağın davranışına etkilerini değerlendirmişlerdir. Aslan ve ark. (2003) ile Aslan ve Karakuzu (2002) düşük hızlı darbeye maruz fiber takviyeli tabakalı kompozitlerin dinamik davranışını değerlendirmişlerdir. Cam fiber/epoksi kompozitin zamana bağlı analizi üzerine deneysel ve nümerik araştırma yapmışlardır. Nümerik olarak hesaplanan temas kuvveti-zaman değerleri, deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Düşük hızlı darbeye maruz tabakalı kompozitlerde darbe hızının, darbe kütlesinin, kompozit plağın boyutlarının ve kalınlığının önemini belirlemişlerdir. Baucom ve Zikry (2005) E camı kompozit sistemlerde düşük hızlı darbedeki hasar ilerlemelerini incelemişlerdir. Numunede delinme oluşuncaya kadar aynı enerji seviyesinden düşük hızlı darbeler yapılmış ve buna bağlı olarak en büyük temas kuvveti-darbe sayısı ve enerji dağılımı-darbe sayısı grafikleri elde ederek incelemişlerdir. Belingardi ve Vadori (2002) cam fiber epoksi matris kompozit plakaların düşük hızlı darbe davranışlarını incelemişlerdir. Tek yönlü ve örgülü olarak üç farklı yönlenmeye sahip kompozit malzemeye serbest dart düşürme cihazı ile testler yapmışlardır. Darbe enerjisi-hasar değeri, temas kuvveti-zaman değişimleri elde edilerek farklı özellileri olan numunelerin darbe davranışı değerlendirilmiştir.

3. KOMPOZİT MALZEMELER

3.1. Kompozit Malzemelerin Tanıtımı

Kompozit malzeme tasarımda aranan özellikleri verebilecek daha uygun bir malzeme oluşturmak için makro-seviyede iki ya da daha fazla malzemenin birleştirilmesi sonucu elde edilen yeni malzemedir. Kompozit malzeme üretilmesiyle aşağıda verilen bazı özellikler sağlanabilmektedir. (Şahin, 2002)

a) Yüksek dayanım
b) Yüksek rijitlik
c) Yüksek yorulma dayanımı
d) Mükemmel aşınma direnci
e) Yüksek sıcaklık kapasitesi
f) İyi korozyon direnci
g) İyi termal ve ısı iletkenliği
h) Düşük ağırlık
i) Çekicilik ve estetik görünüm vb.

Bütün bu özellikler aynı zamanda oluşmaz ve herhangi bir uygulama için böyle bir gereksinime ihtiyaç yoktur. Özellikleri bilinen bileşenlerden yararlanılarak bir kompozit malzemenin bazı özellikleri, örneğin; yoğunluk, elastik modülleri ve çekme dayanımları vb. hesaplanabilir.

Yukarıda belirtilen bu özellikler için gerekli şartlar, uygun matris ve takviye eleman çifti, üretim tekniği, bileşenlerin mukavemet özellikleri ve diğer faktörler göz önüne alınarak üretim yapılırsa istenilen özelliği elde etmek mümkündür.

Kompozit malzemeler, mukavemet, rijitlik ve hafiflikleri nedeniyle metallerin yerini almaktadır. Bugün, uçaklar, uzay araçları, denizaltı araçları ve malzeme özellikleri kritik olan bir çok makine elemanı kompozit malzemelerden üretilmektedir.

Kompozit malzemeler *matris* adı verilen bir ana bileşenle, yüksek mukavemete ve yüksek elastiklik modülüne sahip olan *takviye edici* (elyaf, parçacık, vs.) olarak adlandırılan yapısal bileşenlerden oluşurlar. Matrisler, kompozit malzemeler içerisinde takviye elemanları olan elyafları bir arada tutmaya yarar, yani bağlayıcı olarak görev yaparlar. Matrisin amacı; desteklemek, korumak ve gerilmeyi transfer etmektir. Matrislerin yoğunlukları, rijitlikleri, mukavemetleri elyaflara göre daha düşüktür. Bununla birlikte elyaflarla birleştiklerinde daha mukavemetli ve daha iyi rijitlik özelliği olan bir malzeme ortaya çıkar.

3.2. 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 şekilde çevreleyebilecek katı forma kolaylıkla geçebilmelidir.

Kompozit yapılarda yükü taşıyan elyafların fonksiyonlarını yerine getirmeleri açısından matrisin mekanik özelliklerinin rolü çok büyüktür. Örneğin matris malzemesi olmaksızın bir elyaf demeti düşünüldüğünde yük bir ya da birkaç elyaf tarafından taşınacaktır. Matrisin varlığı ise yükün tüm elyaflara eşit dağılımını sağlayacaktır. Kesme yükü altındaki bir gerilmeye dayanımı, elyaflarla matris arasında iyi bir yapışma ve matrisin yüksek kesme mukavemeti özelliklerini gösterir.

Elyaf yönlenmelerine dik doğrultuda, matrisin mekanik özellikleri ve elyaf ile matris arasındaki bağ kuvvetleri, kompozit yapının mukavemetini belirleyici önemli hususlardır. Matris elyafa göre zayıf ve daha esnektir. Bu özellik kompozit yapıların tasarımında dikkat edilmesi gereken bir husustur.

Matrisin kesme mukavemeti ve matris ile elyaf arası bağ kuvvetleri çok yüksek ise elyaf ya da matriste oluşacak bir çatlağın yön değiştirmeksizin ilerlemesi mümkündür. Bu durumda kompozit gevrek bir malzeme gibi davrandığından kopma

yüzeyi temiz ve parlak bir yapı gösterir. Eğer bağ mukavemeti çok düşükse, elyaflar boşluktaki bir elyaf demeti gibi davranır, neticede kompozit zayıflar. Orta seviyede bir bağ mukavemetinde ise, elyaf veya matristen başlayan enlemesine doğru bir çatlak elyaf/matris ara yüzeyine dönüp elyaf doğrultusunda ilerleyebilir. Bu durumda kompozit sünek malzemelerin kopması gibi lifli bir yüzey sergiler.

3.2.1. Plastik Matrisler

Plastikler hafif olması ve kolay işlenebilmelerinden dolayı geniş bir uygulama alanına sahiptir. Kompozitlerde plastik esaslı matrisler termoset ve termoplastik matrisler şeklinde iki tür olarak bulunmaktadır.

3.2.1.2 Termoset Matrisler

Termosetler en çok kullanılan matris malzemeleridir. Termoset plastikler sıvı halde bulunurlar, ısıtılarak ve kimyasal tepkimelerle sertleşir ve sağlamlaşırlar. Termosetler termoplastiklerden farklı olarak geri dönüşü olmayan matris malzemeleridir. Yüksek sıcaklıklarda dahi yumuşamazlar. Çoğu termoset matris sertleşmemeleri için dondurulmuş olarak depolanmak zorundadır. Dondurucudan çıkarılıp oda sıcaklığında bir müddet (1-4 hafta arası) bekletildiğinde sertleşmeye başlar ve özelliklerini kaybederek biçim verilmesi zor bir hâl alır ve kullanılamaz duruma gelir. Dondurucu içinde olmak şartıyla raf ömürleri ise 6 ila 18 ay arasında değişmektedir**.**

Polyester, epoksi reçine, fenolik reçine ve silikon gibi termoset polimerler, elyaf takviyeli kompozit malzemelerde yaygın olarak kullanılan matris malzemelerdir.

Uzay ve havacılık gibi ağırlığın kritik olduğu ve yüksek dayanım istenen yerlerde klasik olarak epoksi reçine tercih edilir. Polyester gibi daha ucuz olan bir reçineye tercih edilme sebepleri, daha iyi mekanik özellikler, yorulma dayanımı, ısıl dayanım, takviye malzemesine iyi yapışma ve sertleşme esnasında düşük çekme oranı şeklinde sayılabilir.

Epoksi reçine, epoksit grubunun polimerizasyonu ile elde edilir. Farklı formüller kullanılarak özelliklerini büyük ölçüde değiştirmek mümkündür. Çok değişik epoksiler geliştirilmiştir ve uygun bir seçim yapmak çok önemlidir. Kullanılan sertleştiricinin türü, ortaya çıkan karma malzemenin özelliklerini büyük ölçüde etkiler. Reçinenin homojen olarak sertleşmemesi, özellikle gerilmeli korozyon olayında reçinenin çok faklı tepkiler vermesine sebep olur. Sertleşme 1 saat dolayında olup 127°C ve 177°C sıcaklıklarda ve genellikle basınç altında gerçekleştirilir. Ayrıca epoksilerin 250°C 'ye kadar ısıl kararlı türleri de geliştirilmiştir. Sertleşme sırasında kendini çekme sorunu yoktur. Dayanımları yüksektir, birçok elyaf ile iyi bir bağ oluşturur ve ayrıca kimyasal dayanımları da yüksektir.

Epoksi reçineler, Bisfenol-A bazlı reçineler, glisidil esterler, glisidil aminler, novolaklar, bromlu reçineler, sikloalifatikler ve diğer reçineler olmak üzere altı sınıfa ayrılır.

3.3. Takviye Malzemeleri

Elyafları meydana getiren malzemelerin özellikleri, büyük boyutlu formlarından daha farklıdır. Bir elyaf sadece uzunluğunun çapa göre çok büyük olması ile değil aynı zamanda kristallerin çap yönünde dizilmesi ile de ayırt edilir. Kompozit malzemelerdeki elyafların en önemli fonksiyonu yükü taşımaktır. Elyaflar, kompozit malzemeye dayanım sağlarken rijitlik te sağlar. Kompozit malzemedeki sürekli elyaflara filaman, metalik filamanlara ise tel adı verilir. Eğer elyafların şekli dikdörtgen prizması şeklinde ise yani kesit alanı dikdörtgense ve dikdörtgen kenarlarından biri diğerinin 4 katından fazla olursa bu tür elyaflara şerit adı verilir.

Cam elyaflar, kompozitlerde takviye malzemesi olarak en çok kullanılan ve en ucuz olanıdır. Cam elyafların genellikle dayanım/ağırlık oranı yüksektir. Alüminyum alaşımlara göre elastik modülü büyük olurken, grafit ve aramid elyaflara göre daha düşüktür. Cam elyafların içyapıları amorf değildir. Cam elyafla kuvvetlendirilmiş plastiklerin rijitlik/yoğunluk oranları, metallerin rijitlik/yoğunluk

oranına göre daha düşüktür. Cam elyaflar çok yüksek kimyasal dirence sahiptirler. Su absorbe etmezler. Fakat çekme dayanımları nemli ortamda azalır. Cam elyafların sürünmeye karşı direnci ve rijitliği sıcaklık arttıkça azalır. Bununla birlikte faydalı kullanım sıcaklık aralığı oldukça büyüktür. Cam 500°C'ye kadar yumuşamaz.

Kompozit malzemelerde kullanılan cam elyaflar sürekli elyaflar şeklinde üretilirler. İlk önce ham cam fırında eritilir, daha sonra fiberler yüksek hızla bu eriyikten çekilir. Elyaf yüzeyi koruyucu ve bağlayıcı bir maddeyle kaplandıktan sonra desteler halinde bir araya getirilir, bunlara demet denir.

Kimyasal bileşimlerine göre cam elyaflar, E, C, D ve S camı olarak adlandırılırlar. Bunlardan S camı, yüksek dayanımlı olduğu için önceleri askeri sahalarda kullanılmıştır. Elastisite modülü E camına göre % 20 daha büyüktür ve 1/3 katı daha dayanıklıdır. Çizelge 3.1'de E camı ile S ve D cam elyaflarının özellikleri gösterilmektedir.

Çizelge 3.1 E, S ve D camı elyaflarının özellikleri
(Cam Elyaf San.A.Ş.1984)

Özellikler	E camı	S camı	D camı
Yoğunluk, ρ (g/cm^3)	2.60	2.50	2.16
Elastik modülü E (GPa)	72	87	51.7
Çekme dayanımı σ (GPa)	3.45	4.54	2.41
Çekme uzaması (%)	4	2.9	–
Özgül modül E/ ρ ((MN/m)	27.7	34.8	23.9
Özgül dayanım σ/ρ (MN/m/kg)	1.37	1.81	1.16
Boyuna termal genleşme katsayısı α ($\mu m/C^o \times 10^{-5}$)	5	5.6	3.06

Cam elyaflar reçine ile birleşerek uygun bir malzeme ortaya çıkar. Elyaflar ile matris malzeme arasında yetersiz bağlar iç yüzey hatalarını oluşturabilir. Bir grup elyaf, şerit yapı oluşturmak için bir araya gelirse ve silindirik bir makaraya sarılırsa buna bobin denir.

Cam elyafının kullanım amacına bağlı olarak elyaf sarma biçimleri farklı olabilir. Elyaf çapı ve demetteki lif sayısı farklılaşabilir. Cam elyafı biçimlendirildikten sonra yıpranma dayanımının artması için kimyasallarla bir kaplama işlemi yapılır. Kaplama malzemesi olarak genellikle elyafın kompozit malzemeye uygulanmasından önce kolaylıkla kaldırılabilen ve suyla çözülebilen polimerler kullanılmaktadır.

Elyaf ile reçinenin birbirine iyi yapışması çok önemlidir. İyi yapışmamaktan dolayı birbirinden kayan takviye malzemesi ve matris, kompozit malzemenin sertliğini ve sağlamlık performansını düşürür. Bu durumun engellenmesi için elyaf kimyasallarla kaplanır.

3.4. Tabakalı Kompozitler

Tabakalı kompozitler bilinen en eski kompozit malzeme şeklidir. En az iki değişik levha malzemenin tabakalar halinde dizilerek oluşturduğu malzemelere tabakalı kompozit malzemeler denir. Ayrıca; tabakalar halinde bulunması her tabakanın ayrı bir kompozit olmasına izin vermektedir. Tabakalı kompozitlerin tasarım, üretim, standartlaştırma ve kontrolü diğer kompozitlerden daha kolay olmaktadır. Bu kompozitlerde özel gereksinimleri karşılamak amacıyla birden çok tabaka birlikte kullanılabilir. Bunlara sandviç malzeme de denir. Tabakalama işlemiyle kompozit malzemenin mukavemeti, katılığı, aşınma direnci, ısıl yalıtım özellikleri iyileştirilebilir.

Tabakalı kompozit malzemeler en az iki tabakadan oluşurlar. Ancak, dayanım ve mekanik özelliklerin özellikle önem taşıdığı hallerde, malzemenin bu özelliklere sahip olabilmesi için en az üç veya daha fazla tabaka kullanılmaktadır. Bu tabakaları

oluşturan malzemeler farklı olabileceği gibi, aynı tür malzemeden de yapılabilmektedir.

Tabakalı kompozitlerin üretiminde, genel olarak tabaka niteliğindeki her türlü malzeme kullanılabilmektedir. Burada ilke birbirlerinin özelliklerini olumlu yönde takviye edecek bir kompozisyonun oluşturulmasıdır.

Tabakalı kompozitlerin üretiminde farklı türden veya tekbir türden malzeme kullanılabilmektedir. Tabakalı kompozitleri, üretimde kullanılan malzemelerin türlerinden hareketle,

- Farklı malzemelerden oluşan tabakalı kompozit malzemeler
- Tek tür malzemelerden oluşan tabakalı kompozit malzemeler,

şeklinde iki gurupta toplamak mümkündür.

3.4.1. Polimer Esaslı Tabakalı Kompozit Malzemeler

Çeşitli polimer malzeme katmanlarının bir arada kullanılmasıyla çeşitli kompozit malzemeler üretilmektedir. Cam lifi veya asbest lifi dokumaların silikonlara emdirilmesiyle yüksek sıcaklığa dayanıklı tabakalı kompozitler de elde edilmektedir. Ayrıca cam ve naylon elyaf dokumalar çeşitli reçinelerle tabakalar halinde birleştirilerek, çarpmaya, herhangi bir nesnenin batmasına veya benzer etkilere dirençli, çok hafif kompozitler üretilmektedir. Bu malzemeler çeşitli zırh kalkan ve benzeri elemanların yapımında da kullanılmaktadır. Plastik esaslı tabakalı kompozit malzemelerin çok değişik türleri mevcuttur ve farklı alanlarda kullanılmaktadır.

4. DARBE MEKANİĞİ

4.1. Giriş

Darbe mekaniği (impact mechanics), bir çarpışma esnasında ortaya çıkan tepki kuvvetleri ile yapıların bu tepki kuvvetlerine olan dinamik cevabıyla ilgilenmektedir. Bu konu, otomobillerin çarpışma dayanımını geliştirmeden spor aletlerinin tasarımına kadar geniş aralıktaki birçok mühendislik uygulamalarını kapsar.

4.2. Düşük Hızlı Darbenin Mekaniği

Çarpışan iki cismin yüzeyleri bir araya geldiğinde küçük bir temas alanında basınç yükselir. Temas süresince her bir anda, temas alanındaki basınç yerel bir deformasyon ve akabinde bir nüfuziyet (indentation) doğurur.

Darbe sırasında her bir anda, arayüz veya temas basıncı çarpışan iki cisimde zıt doğrultularda etki eden bir etki veya tepki bileşke kuvvetine sahiptir, böylece cisimlerin birbirine geçmesine karşı direnme oluşur. Başlangıçta nüfuziyetin artmasıyla kuvvet de artar ve bu kuvvet birbirine yaklaşan cisimlerin süratini azaltır. Darbe olayında belli bir anda temas kuvvetlerinin yaptığı iş her iki cismin süratinin sıfır olmasını sağlar ve neticede sıkışma sırasında biriktirilen enerji iki cismi birbirinden ayırmaya zorlar, sonunda bu cisimler birbirlerinden belli bir izafi hızla ayrılırlar. Katı cisimlerin arasındaki darbede, çarpışma süresince etki eden temas kuvveti, iki cisim yüzeylerinin bir temas alanı oluşturması için gerekli yerel deformasyonların bir neticesidir.

Darbe esnasında ortaya çıkan yerel deformasyonlar çarpışan cisimlerin sertliliğine olduğu kadar temas başlangıcındaki izafi çarpma hızına bağlı olarak ta değişir. Düşük hızlı çarpışmalar sadece küçük deformasyonlara neden olan temas basınçlarını doğurur. Bunlar temas alanının yakınlarındaki küçük bir bölgede önemlidir. Yüksek hızlarda temas alanının yakınlarında plastik akmadan kaynaklanan büyük deformasyonlar (birim şekil değiştirmeler) vardır. Bu büyük

yerel deformasyonlar, krater oluşturma (cratering) ve dalma (penetration) şeklinde büyük belirginlikte olup kolaylıkla gözlenebilir. Her bir durumda deformasyonlar, çarpışan cisimlerde hız değişimine neden olan temas kuvvetlerinin bir parçasıdır. Büyük plastik deformasyonlara neden olacak çarpma hızı $10^2 \times V_y$ ile $10^3 \times V_y$ arasındadır. Buradaki V_y yumuşak bir cisimde plastik akmayı başlatmak için gerekli en düşük izafi hızdır (metaller için akmadaki normal çarpma hızı 0.1 m/s mertebesindedir). (Stronge, 2000)

4.3. Katı Cisim Darbesinin Tanımı

Sert olan (küçük kompliyansı olan) cisimler için çok büyük temas basıncının oluşturulmasında sadece çok küçük deformasyonlar yeterlidir. Eğer yüzeyler başlangıçta birbiriyle öpüşmüyorsa bu küçük deformasyonlar temas alanının temas süresi boyunca küçük kaldığına işaret eder. Bu küçük temas alanındaki ara yüzey basıncı başlangıçta birbiriyle öpüşmeyen temas yüzeylerinin birbiriyle öpüşünceye veya değinceye kadar deforme olmasına neden olur. Her ne kadar cisimlerin kesit alanlarına nazaran temas alanı küçük kalıyorsa da, temas basıncı büyük olup büyük bir gerilme bileşkesi veya temas kuvveti oluşturur. Bu temas kuvveti, temas bölgesini çevreleyen küçük deformasyon bölgesi boyunca izafi hızın normal bileşenini çabuk bir şekilde değiştirecek kadar büyüktür. Bu büyük temas kuvveti cisimleri çabucak ivmelendirir.

Böylece temas alanını çevreleyen küçük bölgede çarpışan cisimler malzemenin akma zorlanmasını aşacak büyük gerilmeler ve buna karşılık gelen büyük zorlanmalara uğrar. Orta derecede çarpma hızlarında (yapı metallerinde 0.1 m/s mertebesinde) çarpışma esnasında bir miktar enerjiyi dağıtan dönüşümsüz plastik deformasyon başlar; bunun neticesinde bir miktar kinetik enerji kaybolur. Her ne kadar temas bölgesinde gerilmeler büyük olsa da, bunlar, temas bölgesinden olan mesafe arttıkça çabucak azalırlar. Küresel koordinat sistemi başlangıç temas noktasına yerleştirilmiş bir elastik cisimde, gerilmenin radyal bileşeni σ_r, temas bölgesinden olan radyal mesafe r arttıkça hızlı bir şekilde azalır (bir elastik cisimde 3-boyutlu deformasyon alanında σ_r, r^{-2} ile hızlı bir şekilde azalır). Sert bir cisim için

karşılık gelen zorlanmadaki hızlı düşüş başlangıç temas noktası civarındaki küçük bölgede önemli deformasyonların meydana geldiği anlamına gelir ki netice olarak temas alanının çökmesi veya batması çok küçük kalır.

Önemli zorlanma bölgesinin derin veya geniş olmaması nedeniyle, sert cisimler çok küçük kompliyansa sahiptirler (büyük kuvvetler küçük bir çökme doğururlar). Bu küçük önemli deformasyon bölgesi, temas süresince iki cisim tarafından sıkıştırılan kısa ve katı bir yaya benzer. Bu yay büyük bir yay sabitine sahip olup çok küçük bir temas süresine izin verir. Mesela sopa ile hızlı bir şekilde vurulmuş beyzbol topunda temas süresi 2.0 ms iken, çelik bir çekiç ile vurulan bir çivideki temas süresi 0.2 ms'dir. Çekiç ile çivi arasındaki temas süresi azdır çünkü çarpışan cisimler, top ve sopaya nazaran daha sert malzemelerden yapılmıştır. Her iki çarpışma 10 kN (kabaca 1 ton) civarında bir en büyük kuvvet doğurur.

Analitik bakış açısından, katı cisimlerin küçük kompliyanslı olmalarının en önemli neticesi, çok kısa temas süresinde çok küçük yer değiştirmenin meydana gelmesidir. Çok büyük temas kuvvetlerine rağmen çarpışma sırasında cisimlerin önemli derecede yer değiştirmelerine yetecek kadar zaman yoktur. Bu gözlem *rijit cisim çarpışma teorisinin* temel öngörüsünü (hipotezini) oluşturur. Katı cisimler için darbenin analizinde temas süresinin ortadan kalkacak kadar küçük olduğu düşünülebilir. Bunun neticesinde hızlardaki değişim ani olarak meydana gelir. Bu teori temas süresince hareketin olmadığını varsayar.

4.4. Katı Cisim Darbe Mekaniğinin Dayandığı Esaslar

(a) Çarpışan cisimlerin her birinde temas alanı her iki cismin kesit ölçüleri ve normal doğrultudaki cisim derinliğine nazaran küçük kalmaktadır.

(b) Temas esnasındaki yer değiştirmeler ihmal edilebilecek kadar temas süresi yeterince kısa olmakta ve böylece sistem durumunda bir değişiklik meydana gelmemektedir.

Eğer bu şartlar yaklaşık olarak sağlanırsa katı cisim darbe teorisi uygulanabilir. Genelde bu gereksinimler cisimlerin sert olması ve sadece çarpışma sırasında küçük yerel deformasyonları kaldırması olarak söylenebilir. Bir katı cisimde küçük temas alanı sadece başlangıç temas noktası civarındaki küçük bir bölgede önemli zorlanmalar (strain) doğurur. Eğer cisim sert ise önemli deformasyonların çok sınırlı olan bölgesi kompliyansın küçük olmasına neden olur ve netice olarak temas süresi çok kısa olur. Bu ise iki önemli basitleştirmeyi doğurur.

a) Hız değişimi ve tepki impulsu arasındaki cebirsel bağlantıların elde edilebilmesi amacıyla düzlem hareket denklemlerinin, entegrali alınabilir.

b) Temas süresince etki eden sonlu etken kuvvetler (yerçekimi veya manyetik çekim) çarpışma sırasında herhangi bir iş yapmadıkları için ihmal edilebilirler.

Temas süresince önemli etkin kuvvetler sadece cisimlerin temas noktalarındaki tepki kuvvetleridir. Bu tepkiler yer değiştirmenin kısıtlanmasından kaynaklanmaktadır.

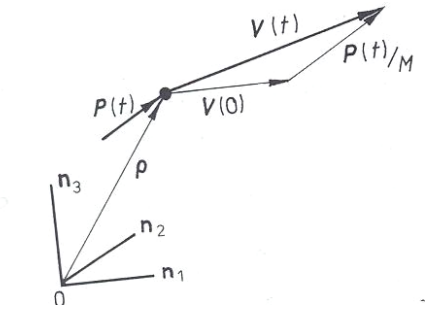
Katı cisim teorisini kurarak çarpışan iki cismi sonsuz küçük şekil değiştirebilen bir parçacıkla ayırabileceğimizi düşünebiliriz. Şekil değiştirebilen parçacık, her ne kadar bu iki nokta üst üste çakışsa da, çarpışan cisimlerin ilk temas noktaları arasında yer almaktadır. Temas noktasında cisimleri birbirinden ayıran sonsuz küçük tamamlayıcı elemanın fiziksel yapısı, darbe sırasındaki hızdaki değişimleri, impulsun normal bileşeninin bir fonksiyonu olarak ayrılabilmesine

müsaade eder. Bu impulsun normal bileşeni, çarpışma sonunda normal temas kuvvetinin temas periyodu üzerindeki entegraline eşdeğerdir. Yapışkan olmayan temas yüzeyli cisimler arasındaki çarpışmalar sadece deforme edilen parçanın sıkışmasıyla -çekilmesiyle değil- vuku bulduğundan impulsun normal bileşeni çarpışmadan sonra zamanın monoton artan bir fonksiyonu olur. Bu nedenle ani çarpışmada, hızdaki değişimler, zaman yerine impulsun normal bileşeni olan bir bağımsız bileşene ayrılabilir. Bu da bize impulsun sürekli (düzgün) bir fonksiyonu olan hız değişimini verir.

4.5. Dinamiğin İlkeleri

4.5.1. Parçacık Kinetiği

Dinamiğin birçok ilkesinin en temel hali bir parçacığın dinamiğidir. Bir parçacık, boyutları ihmal edilebilen veya sonsuz küçük olan bir cisimdir. Parçacık, gerek katı gerekse şekil değiştirebilen cisimler için darbe dinamiğini geliştirmek üzere kullanılacak olan bir yapı taşıdır. M kütlesine sahip bir parçacık **V** hızıyla hareket ediyorsa M**V** momentumuna sahiptir. Eğer bir parçacığa **F** bileşke kuvveti etki ediyorsa, bu durum Newton'un ikinci kanuna göre momentumda bir değişikliğe yol açar.



Şekil.4.1 M kütleli bir parçacığın hızındaki **P***(t)* impulsundan kaynaklanan değişim

Newton'un II. Kanunu: Bir parçacığın M**V** momentumunda ki zamana göre değişimi ona etki eden kuvvetle orantılı olup doğrultusu ise etki eden kuvvetle aynı doğrultudadır.

$$\frac{d(M\mathbf{V})}{dt} = \mathbf{F} \tag{4.1}$$

Genellikle parçacığın kütlesi sabit olduğundan hızdaki değişimi **P***(t)* impulsunun sürekli bir fonksiyonu olarak elde etmek için (4.1) denkleminin entegrali alınabilir.

$$\mathbf{V}(t) - \mathbf{V}(0) = M^{-1}\int_0^t \mathbf{F}(t').dt' \equiv M^{-1}\mathbf{P}(t) \tag{4.2}$$

Bu vektör ifadesi Şekil 4.1' de gösterilmiştir.

Çarpışan B ve B' parçacıklarının *t=0* zamanındaki etkileşimi karşılıklı olarak birbirlerine etki eden **F***(t)* ve **F'***(t)* etkin kuvvetlerini doğurur. Etkileşim süreci $0<t<t_f$ esnasında bu etkileşim kuvvetleri parçacıkların birbirine girmelerini önler. Etkileşim kuvvetlerinin bu özel tabiatı kendi kaynaklarına bağlıdır; bunlar ister birbirine nüfuz edemeyen katı cisimler arasındaki temas kuvvetleri isterse atomik parçacıklar arasında etki eden atomlar arası kuvvetler olabilir. Her halukarda bu kuvvet, her bir parçacığa radyal doğrultuda tek başına etki eder. Bu etkileşim kuvvetleri Newton'un üçüncü kanunuyla ilgilidir.

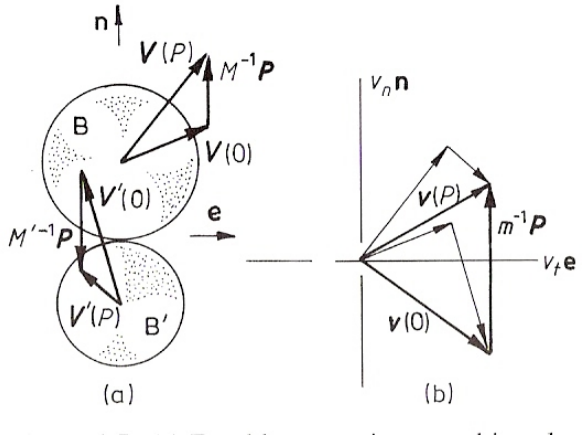
Newton'un III. kanunu: Etkileşim halinde iki cisimde, şiddeti eşit aynı doğrultuda ve zıt yönde tepki kuvvetleri vardır.

$$\mathbf{F'} = -\mathbf{F} \tag{4.3}$$

II. ve III. kanunlar darbe analizindeki impuls-momentum yönteminin temelini oluştururlar. B parçacığının kütlesi *M* ve B' parçacığının kütlesi *M'* olsun. (4.3) denkleminin entegrali eşit fakat zıt $-\mathbf{P'}(t)=\mathbf{P}(t)$ impulslarını verir. İzafi hıza ait hareket denklemleri $\mathbf{v} \equiv \mathbf{V}-\mathbf{V'}$ şu şekilde elde edilir.

$$\mathbf{v}(t) = \mathbf{v}(0) + m^{-1}P(t), \qquad m^{-1} = M^{-1} + M'^{-1} \tag{4.4}$$

burada *m*, etkin kütledir. Durağan bir referans sistemindeki **V***(t)* hız değişkeninin izafi hız **v***(t)*'ye dönüşmesi Şekil 4.2'de gösterilmiştir. (4.4) denklemi izafi hareketin denklemi olup temas sürecinin limitle sıfıra yaklaştığında *($t_f \rightarrow 0$)* uygulanabilir.
Bu denklem parçacıklar ve katı cisimlerin çarpışmasının düzgün (smooth) dinamiğinin temelidir.



Şekil 4.2 (a) Eşit fakat zıt olan normal **P** impulsları çarpışan *M* ve *M'* kütleli iki cisimde sırasıyla M^{-1}.**P** ve M'^{-1}.**P** kadar hız değişimine sebep olur. **(b)** Kalın çizgiler başlangıç izafi hız **v**(0), son izafi hız **v**(P) ve izafi hızdaki değişim m^{-1}**P** yi gösteriyorken ince çizgiler her bir cismin başlangıç ve son hızlarını göstermektedir.

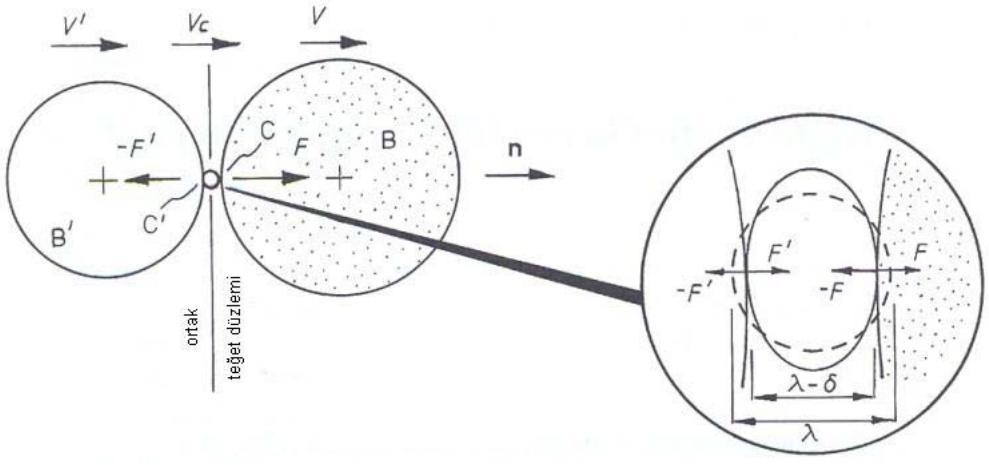
4.6. Merkezi Çarpışma İçin Katı Cisim Teorisi

B ve B' ile isimlendirdiğimiz iki cisim, bir başlangıç hızıyla birbirine doğru geldiğinde çarpışırlar. Dokundukları ilk andaki temas noktası C ile gösterilsin. Kısa süreli temas süresince B cisminin yüzeyindeki C noktası B' cisminin yüzeyindeki C' noktası ile çakışıktır. Eğer B veya B' cisimlerinin birbirlerine temas noktasında topolojik olarak düzgün bir yüzeyi varsa C noktasında bu yüzeye teğet bir düzlem vardır. Çakışan C ve C' noktaları bu teğet düzlem üzerinde bulunmaktadır. Eğer her iki cisim dış bükey ve temas noktası civarında sürekli bir eğriliğe sahip yüzeyleri varsa bu teğet düzlemi temas noktası C de her iki yüzeye de teğettir; çarpışan cisimlerin ortak teğet düzlemi vardır. Teğet düzleme dik olan doğrultu **n** birim vektörü ile belirlenir; bu doğrultu *ortak normal doğrultu* olarak isimlendirilir. Temas

noktası C deki temas kuvveti ve izafi hızdaki değişim ortak teğet düzlemine dik ve teğet bileşimlerine ayrılabilir.

4.6.1. Doğrudan Darbenin İzafi Hareket Denklemi:

M ve *M′* kütlelerine sahip B ve B' cisimlerinin **n** doğrultusuna paralel zamana bağlı *V(t)* ve *V′ (t)* hızlarıyla çarpıştığını ele alalım. Doğrudan çarpışmada cisimler çarpıştığında dönme hareketi yapmazlar ve her bir cismin hızları düzgündür (her noktada aynıdır). Temas esnasında, temas noktası C ve C''nde birbirine eşit fakat zıt yönde basma tepki kuvvetleri gelişir. Bu kuvvetler cisimlerin birbirine girmesine karşı koyar. Aynı doğrultudaki cisimler arasındaki doğrudan darbe halinde, temas noktaları C ve C' arasındaki izafi hız temas süresi boyunca ortak normal doğrultuya paralel kalır. Yerel temas bölgesinin sıkışmasının bir sonucu olarak temas noktasında bir tepki kuvveti gelişir. Bu kuvvet temas süresince izafi hareketi engeller. Doğrudan çarpışmada tepki kuvveti normal doğrultuda, Şekil 4.3'de gösterildiği gibi hızlara paralel etki eder. Eğer çarpışan cisimler sert ise, yani temas kuvveti diğer cisim kuvvetlerine nazaran çok büyükse; sonuç olarak herhangi bir cismin katı cisim darbe teorisinde uygulanan sonlu büyüklükte ki temas kuvvetleri C temas noktasındaki tepki kuvvetine kıyasla ihmal edilebilecek kadar küçüktür.



Şekil 4.3 Temas noktası şekil değiştirebilir sonsuz küçük parçacıkla ayrılmış iki katı cismin merkezi çarpışması. Parçacık, temas bölgesindeki küçük yerel deformasyonu temsil etmektedir.

Sonlu cisim kuvvetleri, küçük yer değiştirme esnasında ortadan kaybolacak kadar bir iş yapmadıkları için göz ardı edilebilir. Bu da yerçekimi gibi cisim kuvvetlerinin çarpışma sırasında hızdaki değişimi etkilememesinin nedeni olarak söylenebilir. İki sert cismin darbesi esnasında tek etkin kuvvet, temas noktasındaki tepki kuvvetidir. Bu tepki kuvvetleri çok büyüktür ama temas süresince bir anda izafi hızı sürekli olarak değiştiren sonlu bir impuls üretir.

Çarpışan cisimlerin deformasyonunu, sonsuz küçük şekil değiştirebilen bir parçaya toplamak kabulü, çok küçük temas süresince hızdaki değişimi impulsun bir fonksiyonu olarak elde etmede önemli bir düşüncedir. Temas noktasında B ve B' cisimleri **F***(t)* ve **F'***(t)* temas kuvvetlerine maruzdur. Bu kuvvetlerin normal bileşenleri sırasıyla $F(t) \equiv \mathbf{F} \cdot \mathbf{n}$ ve $F'(t) \equiv \mathbf{F}' \cdot \mathbf{n}$ dir. Bu tepkiler impulsun normal bileşeni *P(t)* ve *P'(t)*'yi doğurur.

$$dP = Fdt \quad \text{ve} \quad dP' = F'dt$$

Her bir cismin **n** doğrultusundaki ötelenme hareketi şu şekilde ifade edilebilir.

$$MdV = dP \quad \text{ve} \quad M'dV' = dP'$$

Temas noktasında şekil değiştirebilen parçacık boyunca izafi hızın normal bileşeni

$v = V - V'$ olsun.

Bu modelleme, şekil değiştirebilen parçacığın ihmal edilebilir kütlesi olduğundan bu parçacığın her iki tarafından etki eden impulsların şiddetçe eşit fakat zıt yönde olduğunu tanımlar. Böylece çarpışan her bir cisim üzerine aynı tepki impulsu etki eder. Fakat bu impusların doğrultuları terstir,

$$dP = -dP'$$

B cismi üzerindeki impulsu pozitif olarak tanımlayarak $dp \equiv dP$ ve öteleme hareket denklemini, temas noktaları arasındaki izafi hız tanımında yerine koyarak izafi hızın normal bileşeninin değişimi için diferansiyel denklemi elde ederiz,

$$dv = m^{-1} dp \tag{4.5}$$

Buradaki etkin kütle *m* şu şekilde tanımlanır,

$$m \equiv (M^{-1} + M'^{-1})^{-1} = \frac{MM'}{M + M'} \tag{4.6}$$

Denklem (4.5) i entegre ettikten ve başlangıç şartı $v_0 \equiv v(0) = V(0) - V'(0)$ ı uyguladıktan sonra normal izafi hız *v(p)* normal impuls *p*'nin bir fonksiyonu olarak elde edilir,

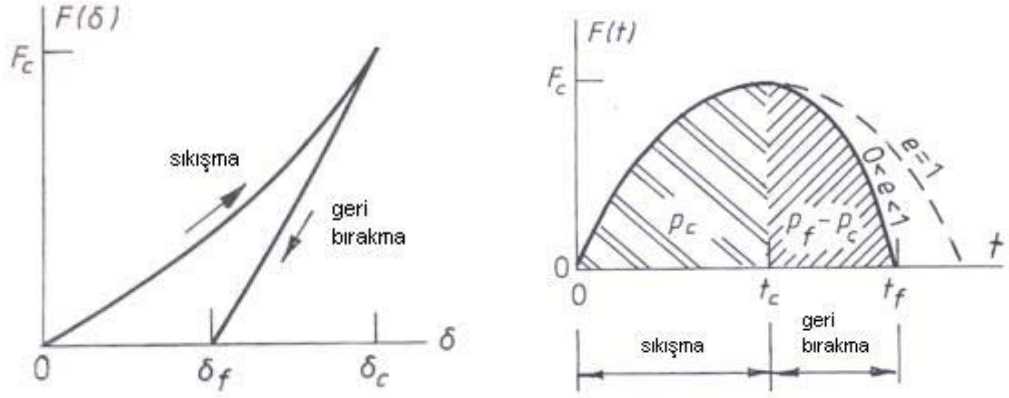
$$v = v_0 + m^{-1} p \qquad \text{burada} \qquad v_0 < 0 \tag{4.7}$$

Böylece çarpışma süresince izafi hızın normal bileşeni, normal impulsun doğrusal bir fonksiyonudur.

Darbe esnasında hızdaki değişimi hesaplama düşüncesi, ayrılmada bitiş impuls p_f' yi elde etmede bir araç bulmak içindir. Eğer bitiş impulsu fiziksel mülahazalara dayanıyorsa katı cisim darbe teorisi daha faydalı olacaktır.

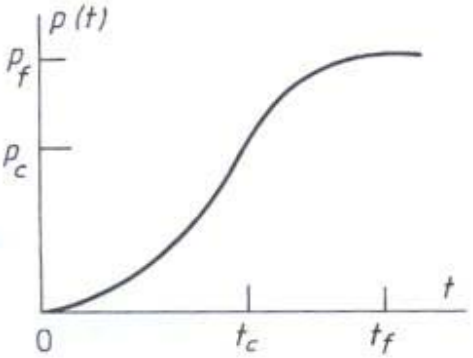
4.6.2. Çarpışmanın Sıkışma ve Geri Bırakma Aşamaları

Çarpışan cisimlerin ilk temasından sonra şekil değiştirebilen parçacık sıkıştırıldıkça temas kuvveti *F(t)* yükselir. Şekil değiştirebilen parçacığın batması veya sıkışması δ olsun. (Parçacık toplam kütlenin önemli miktarda deformasyonu olan küçük bir parçasının kompliyansını, temas noktası C yi çevreleyen cismin bir bölgesini temsil etmektedir.) Çarpışan cisimlerin kompliyansı hakkında ayrıntılı bilgiye girmeden, δ yı doğrudan elde etmenin bir yolu bulunmamaktadır. Ama eğer kompliyans hıza bağımlı ise en büyük batma ve en büyük kuvvet izafi hızın normal bileşenin sıfır olduğunda, aynı anda meydana gelir. Şekil 4.4a normal temas kuvvetini batma δ nın bir fonksiyonu olarak göstermektedir. Şekil 4.4b bu kuvveti zamanın bir fonksiyonu olarak gösterirken sonraki grafik temas süresinin yaklaşımın başlangıç aşaması veya *sıkışma* aşaması ile takip eden *geri bırakma* aşamasına ayrılmasını göstermektedir. Sıkışma sırasında, kinetik enerji temas kuvvetleri yardımıyla deformasyon iç enerjisine dönüştürülür. Eşit ve zıt yöndeki temas kuvveti şekil değiştirebilen parçacığın iç deformasyon enerjisini artıran bir iş yaparken, temas kuvveti çarpışan cisimlerin başlangıçtaki normal izafi hızlarını düşüren bir iş yapar. Temas noktasının normal izafi hızı sıfır olduğunda sıkışma aşaması sona erer ve geri bırakma başlar. Takip eden geri bırakma aşaması sırasında, iç enerjisinin elastik kısmı bırakılır. Sıkışma sırasında biriktirilen elastik zorlanma enerjisi geri bırakma sırasında cisimleri birbirinden ayırmaya zorlayan kuvvet doğurur. Bu kuvvet tarafından yapılan iş, kinetik enerjinin bir kısmını yerine koyar.

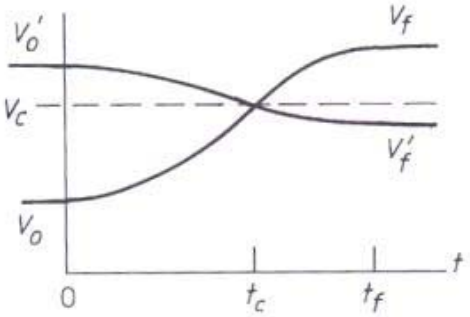


(a)

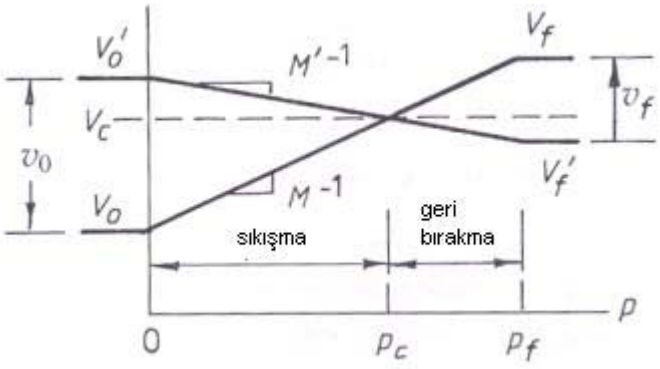
(b)



(c)



(d)



(e)

Şekil 4.4 (a) izafi yer değiştirme δ nın **(b)** zaman t nin bir fonksiyonu olarak normal temas kuvveti F; **(c)** zaman t nin bir fonksiyonu olarak normal impuls $p(t)$ **(d)** zaman t nin bir fonksiyonu olarak çarpışan cisimlerin normal hızları V ile V' nün değişimi **(e)** normal impuls p' nin bir fonksiyonu olarak çarpışan cisimlerin normal hızları V ile V' nün değişimi

Geri bırakma sırasında şekil değiştiren bölgenin kompliyansı, sıkışma sırasındakinden daha küçüktür, bu nedenle temas son bulduğunda şekil değiştirebilen parçacığın bir kalıcı sıkışması δ_f bulunur.

Çarpmadan sonra herhangi bir t zamanında temas kuvveti F nin normal bileşenin Şekil 4.4b deki eğrinin altında kalan alana eşit olan bir impulsu vardır (Kuvvetin impulsu, impuls kuvveti olarak ta anılır). Normal kuvvet her zaman basma olduğundan, impulsun normal bileşeni Şekil 4.4c'de gösterildiği gibi monoton olarak artar. Böylece normal impuls p, bağımsız bir değişken olarak zaman t ile yer değiştirebilir. Sıkışma esnasında impuls artması B' cismini yavaşlatır ve B cisminin hızını artırır. (Şekil 4.4d)

Batmanın sıkışmadan geri bırakmaya döndüğü an t_c olsun. Çarpışan cisimlerin temas noktalarındaki izafi hızları sıkışma aşamasının sonunda kaybolur: $v(t_c) = 0$; temas noktaları normal doğrultuda aynı V_c hızlarına sahip olduklarında sıkışma biter. Şekil 4.4e Denklem (4.7) ile ifade edildiği gibi hızdaki değişimin temas noktası C deki normal tepki impulsu ile doğru orantılı olduğunu göstermektedir.

İki cismi ortak hıza getiren $p_c = \int_0^{t_c} F(t)dt$ tepki impulsu, sıkışmanın normal impulsu olarak adlandırılır. Bu impuls, çarpışma süreçlerinin analizinde faydalı olan bir karakteristiktir. Sıkışmanın normal impulsu, denklem (4.7) ve sıkışma sonunda izafi hızın normal bileşenlerinin kaybolması $[v(p_c) = 0]$ şartı ile elde edilir. Böylece, sıkışmanın normal impulsu, etkin kütle ile C deki başlangıç izafi hızının çarpımına eşit olur,

$$p_c = -mv_0 \qquad \text{burada} \quad v_0 < 0$$

4.6.3. Normal Temas Kuvvetinin İşi

Normal temas kuvvetinin sıkışma ve geri bırakma aşamalarında yaptığı iş, sıkışma esnasında uygulanan impuls p_c ile ayrılmadaki son impuls p_f arasında bir bağıntı verir. Sıkışma süresince normal temas kuvveti şekil değiştirebilen parçacık üzerinde bir iş yapar (gerçekte, temasın başlangıç noktası civarındaki şekil değiştiren küçük bölgede). Bu iş parçacığı deforme eder ve iç enerjisini yükseltir. Şüphesiz, parçacığı sıkıştıran kuvvetin bir eşi olan fakat zıt yöndeki kuvvet sıkışma esnasında normal izafi hareketin kinetik enerjisini düşürür. Parçacığın sıkışmasında yutulan enerjinin bir kısmı, geri bırakma sırasında eski haline gelebilir. Enerjinin eski haline gelebilen bu kısmı elastik zorlanma enerjisi olarak bilinir.

Kuvvetin impuls'un türevi $dp = Fdt$ ile bağıntılı olduğu hatırlanarak F kuvvetinin normal bileşeninin sıkışabilir parça üzerinde yaptığı iş W_d hesaplanabilir:

$$W_d = \int_0^t Fvdt' = \int_0^p vdp' \tag{4.8}$$

4.7. Serbest düşme hareketi

Hava direnci ihmal edilir ve yerçekimi ivmesinin yükseklikle değişmediği kabul edilirse, serbest düşen bir cismin hareketi sabit ivme altındaki bir boyutlu harekete özdeştir. Bu nedenle sabit ivme için kullanılan kinematik eşitlikleri uygulanabilir. Serbest düşme denklemleri;

$$v = v_0 - gt \tag{4.9}$$

$$v_{ort} = \frac{v_0 + v}{2} \tag{4.10}$$

$$y = -\frac{1}{2}gt^2 + v_0 t + y_0 \tag{4.11}$$

$$v^2 = {v_0}^2 - 2g(y - y_0) \tag{4.12}$$

Serbest düşmede ilk hız sıfır olduğu için;

$$v = \sqrt{2gh} \tag{4.13}$$

4.8. Darbe enerjisi

h yüksekliğinde vurucu kütlesinin sahip olduğu potansiyel enerji ise;

$$\Pi = m.g.h \tag{4.14}$$

Çizelge 4.1' de her bir çarpma hızı için Denklem (4.13) ve Denklem (4.14) kullanılarak hesaplanan vurucu kütlesinin darbeden önce sahip olduğu potansiyel enerji değerleri verilmiştir.

Çizelge 4.1 İstenilen çarpma hızı için hesaplanan yükseklik ve darbe enerjisi değerleri

Çarpma Hızı (m/s)	Yükseklik (cm)	Darbe Enerjisi (J)
2	20,4	60,00
2,5	31,9	93,75
3	45,9	135,00

5. TABAKALI KOMPOZİT MALZEMELERİN DARBE DAVRANIŞI

Mühendislik uygulamalarında, özellikle de mekanik uygulamalarda, dışarıdan gelecek herhangi bir darbeye karşı beklenmedik sonuçların ortaya çıkmaması için, malzemenin gerekli en uygun cevabı veya davranışı verebilmesi istenir. Uygulama yerine ve kullanım amacına göre malzemenin maruz kalabileceği darbeler çok farklı şekillerde olabilir. Buna karşın darbeye karşı olan cevap da malzemenin kendisi tarafından belirlenir. Şöyle ki, metal ve metal alaşımları durumunda darbeye karşı malzemenin cevabı; elastik uzama ve plastik şekil değiştirme şeklinde meydana gelir ve darbe hasarı, çoğunlukla, çarpma yüzeyinde başladığı anda 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 soğurabilir. Metaller sabit bir gerilme durumunda yapı sertleşmeden önce çok büyük uzamalarda akabilirler, bu nedenle oluşacak kopmalar ani ve beklenmedik olmaz. Kompozit malzemelerde bir darbe sonucunda oluşan hasar, çarpmanın türüne göre darbeye maruz kalmayan yüzeyde meydana gelebilir, içyapıda oluşan delaminasyonlar (tabakalar arasında ayrılma) şeklinde başlayabilir. Yukarıda da bahsedildiği gibi metallerde darbe cevabı, plastik şekil değiştirme sonucunda bir kopma şeklinde olmasına rağmen, kompozitler çok değişik modlarda hasara uğrayabilirler ve bu hasar modlarında parçanın yapısal bütünlüğünde ciddi bir değişiklik meydana gelmez. Genellikle gözle görülmeyen veya çok zayıf bir şekilde görülebilen hasarlar meydana gelir. Plastik matrisli kompozit malzemeler enerjiyi elastik deformasyon ve bazı hasar mekanizmaları (matris çatlaması, delaminasyon, fiber kopması v.b) sayesinde soğurabilirler. Tabakalı kompozit malzemede, eğer kalınlık boyunca bir takviye söz konusu değil ise, en büyük darbe hasarı enine doğrultuda oluşacaktır. Bunun en önemli nedenlerinden birisi, enine doğrultudaki malzeme elastik özelliğinin düşük olmasıdır. Bu nedenle bir kompozit malzemenin enine hasar direnci nispeten zayıftır. Tabakalar arası gerilmeler (kesme ve normal) tabakalar arası mukavemetin düşük olmasından dolayı ilk kopmalara sebep olan gerilmelerdir. Darbe esnasında kompozit malzemeye aktarılacak enerjinin miktarı, malzemenin bu enerjiyi sönümleyebilmesi için oluşacak hasar modlarını

belirleyecektir. Bu nedenle tabakalı bir kompozit malzemede darbenin oluşturacağı hasarı tahmin etmek için darbe hızının belirlenmesi çok büyük bir öneme sahiptir.

5.1. Düşük Hızlı Darbenin Belirlenmesi

Genel olarak, darbeler düşük hızlı ve yüksek hızlı olarak sınıflandırılırlar, fakat bu kategoriler arasında açık bir geçiş yoktur. Yapılan araştırmalar bu geçişin belirlenmesinde henüz net bir sonucun elde edilemediğini göstermektedir. Bu konuda yapılmış çalışmalardan bir kısmı düşük hızlı darbeyi ki bunlar statikmiş gibi düşünülebilir, hedefin ve çarpan cismin rijitliğine, malzeme özelliklerine ve çarpan cismin kütlesine bağlı olarak 1 ila 10 m/s arasında değişen hızlar olarak değerlendirilmesi gerektiğini savunmaktadır. Düşük hızlı darbeye en basit örnek olarak kompozit malzeme üzerine imalat veya bakım esnasında kaza sonucu bir parçanın düşmesi verilebilir. Düşük hızlı darbeler normal olarak çarpışma temas anında malzeme içyapısında deformasyon oluşturan darbelerdir. Bazen düşük hızlı darbe, düşük enerjili darbe olarak da kullanılır. Düşük hızlı darbede, malzemenin içyapısında darbeye karşı cevap verebilmek için gerekli olan temas süresi yeterlidir. Bu nedenle hedefin dinamik yapısal cevabı çok büyük bir öneme sahiptir. (Ceyhun ve Turan, 2003).

5.2. Enine Darbe

Kompozit malzemelerin en hassas oldukları yükleme durumu düzlem dışına doğru (tabaka veya fibere dik yükleme) olandır çünkü kalınlık doğrultusunda tabaka düzleminde olduğundan daha zayıftırlar. Sonuç olarak, enine darbeye maruz kalan kompozit malzemeler, toplam yük taşıma kapasitelerinde önemli düşüşlere sebep olan hasarlara uğrarlar. Kompozit malzemelerin bu darbe yüklerine karşı göstermiş oldukları cevap çok karmaşıktır. Bu, kompozit malzemeyi meydana getiren her bir bileşenin kendi özellikleri kadar yapılandırılmasına da bağlıdır. Ayrıca, darbeye verilen cevap çarpan cismin geometrisine, hızına ve kütlesine de bağlıdır. Her biri enine darbenin toplam etkisini nitelendirme de önemli bir rol oynar. Darbe yüklemesi altında çarpan cismin gözle görülemeyen veya zayıf şekilde seçilebilen nüfuziyetine

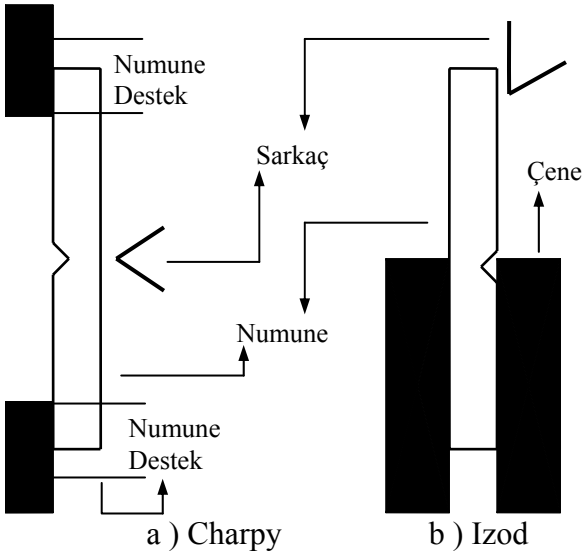
kadar değişebilen farklı şekillerde hasar modları mevcuttur. Düşük hızlı darbeler tabakalar üzerinde gözle görülen hasarlar oluşturmayabilirler. Fakat tabaka içerisinde, matris çatlaması, delaminasyon, fiber kopması şeklinde hasarlara sebep olabilirler. Bu da mukavemette önemli derecede bir düşüşe sebep olur. Rijitlikte azalma da mümkündür fakat genellikle ihmal edilebilir seviyededir. (Ceyhun ve Turan, 2003).

5.3. Darbe Testleri

Tabakalı kompozit malzemelerin darbe direncinin, bir cismin kompozit malzemeye enine doğrultudaki darbesini benzeştiren deneylerle karakterize edilebileceği açıktır. Bununla birlikte kompozit malzemelerin darbe davranışını karakterize etmek için standart bir test tekniği veya farklı ülkeler, kuruluşlar ve araştırmacılar arasında yaygın bir şekilde kabul edilen herhangi bir teknik mevcut değildir. Bu durum, farklı kaynaklardan alınan sonuçların karşılaştırılacağı zaman, kompozit malzemelerin darbe cevabı için uygun bir model geliştirme girişimleri için problem yaratmaktadır. Bu olumsuzluklara rağmen kompozit malzemelerin darbe dirençlerinin belirlenmesi amacıyla günümüzde aşağıdaki test yöntem ve cihazları yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunlar genellikle üç kategoride sınıflandırılabilirler:

- Sarkaç testleri (Izod ve Charpy)
- Hava veya gaz silah testleri (düşük hız veya balistik testler)
- Ağırlık düşürme testleri

Bu testlerden Izod ve Charpy test düzenek şemaları Şekil 5.1'de görüldüğü gibidir.



Şekil 5.1 Charpy ve Izod darbe test düzenekleri

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 soğurulan darbe enerjisi olarak ölçülür. Darbeden sonraki sarkacın yüksekliği ne kadar az ise, soğrulan darbe enerjisi, dolayısıyla malzemenin darbe direnci veya tokluğu da o derece yüksektir. Charpy ve Izod test yöntemleri ufak farklılıklar dışında birbirine çok benzerler. Bu farklılıklardan en önemli olanı, numunenin desteklenme şekli ile çentiğin destek ve darbe noktalarına göre konumudur (Şekil 5.1). Bu test yöntemleri ile elde edilmiş bazı sonuçlar Çizelge 5.1'de görülmektedir. (Ceyhun ve Turan, 2003).

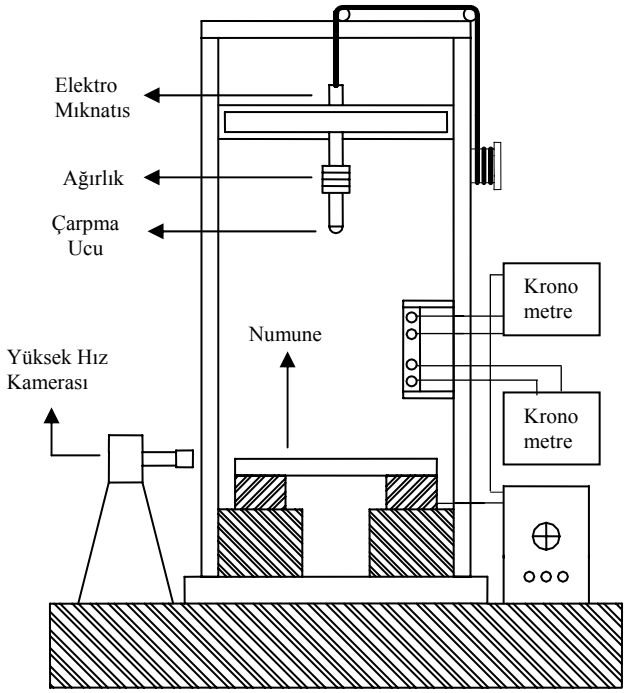
Çizelge 5.1 Farklı malzemelerin standart V-Çentik Charpy ve Izod darbe enerjileri

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 (Rc=43–46)	214	-
7075–T6 Alüminyum Alaşımı	153	-
6061–t6 Alüminyum Alaşımı	67	-

Son yıllarda kompozit malzemelerin düşük hızdaki darbe testlerini karakterize etmek için sarkaç veya ağırlık düşürme darbe test cihazlarının bir araya getirilmesiyle oluşturulmuş darbe test cihazlarının kullanımı giderek artmaktadır. 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.

Bu cihazların bazıları yer değiştirmeyi veya ivmeyi ölçmektedirler. Bu sayede yük, yer değiştirme ve ivmenin çarpma anındaki değişimi kaydedilir. Bu sonuçlar, darbe yükü-zaman ve darbe enerjisi-zaman değişimlerine dönüştürülebilir. Bunlar sayesinde, en uç noktadaki yük ve soğurulan enerji gibi özellikler malzemede meydana gelen kırılma işlemiyle ilişkilendirilebilirler. Tipik bir ağırlık düşürme test cihazı Şekil 5.2'de görüldüğü gibidir. Böyle bir cihazı meydana getiren donanım: platformlarla desteklenen numune, tüp içerisine yerleştirilen yük ölçme cihazları

(yük hücresi), çarpışmadan hemen önceki tüp hızını ölçmeye yarayan fotoelektrik hücreler ve darbe olayını görüntülemek için kullanılan yüksek hız kamerasıdır.



Şekil 5.2 Ağırlık düşürme test düzeneği

Kompozit malzemelerin darbe özelliklerini darbe test cihazı (serbest ağırlık düşürme, sarkaç, silah v.b), çarpan cismin karakteristiği (içi dolu veya boş, uç şekli ve boyutu v.b), çarpan cismin hızı ve kütlesi (veya enerjisi), numunenin yapılandırması (boyutu, geometrisi, numune ve destek noktalarındaki uçların sabitlenmesi v.b) etkilemektedir. Bu nedenle kompozit malzemelerin darbe özellikleri söz konusu olduğu zaman tüm bu kıstasların da göz önünde bulundurulması gerekmektedir.

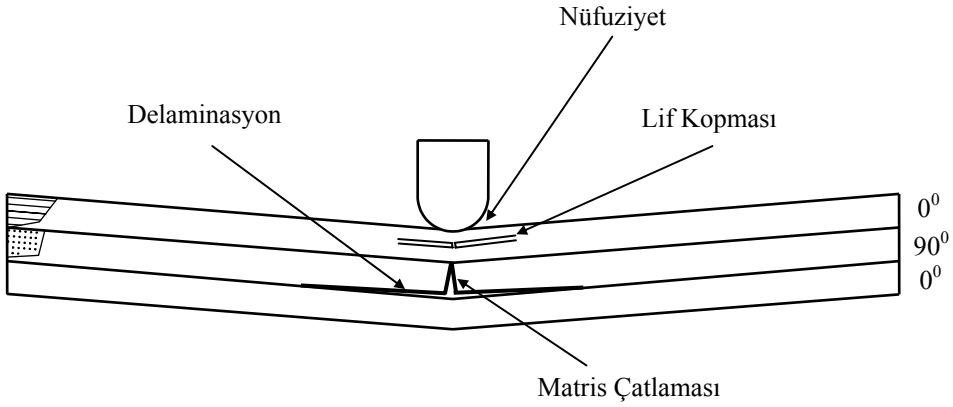
5.4. Tabakalı Kompozit Malzemede Darbe Sonucu Oluşan Hasar Modları

Elyaf takviyeli plastik tabakalar, anizotropik ve heterojen yapılarından dolayı dört değişik önemli darbe hasar modunun ortaya çıkmasına müsaittirler (bunların dışında daha birçok hasar modundan bahsetmek mümkündür). Bu modların tabakalı

bir kompozit üzerindeki modeli Şekil 5.3'de görüldüğü gibidir. (Ceyhun ve Turan, 2003).

1. **Matris modu:** Çatlama liflere paralel meydana gelir. Bunun nedeni bası gerilmesi ve kesme gerilmeleridir.
2. **Delaminasyon modu:** Tabakalar arası eğilme cevabı uyumsuzluğundan ortaya çıkar.
3. **Elyaf modu:** Gerilme altındaki lif kopar, sıkıştırma altındaki lif eğilir.
4. **Nüfuziyet:** Çarpan cisim kompozit malzemeye tamamıyla nüfuz eder.

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

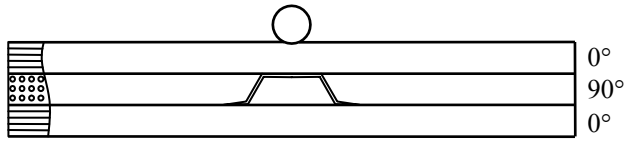


Şekil 5.3 Darbe sonucu kompozit malzemede oluşan hasar çeşitleri

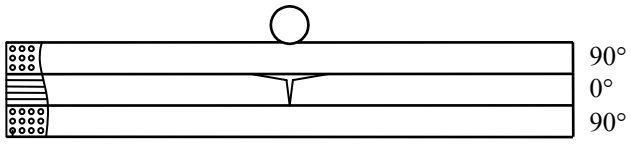
5.4.1. Matris Hasarı

Literatürde rapor edilen darbe testlerinin çoğunluğu, düşük enerjili testleri içerir. Matris hasarı, düşük hızlı enine darbenin oluşturduğu hasarın ilk tipidir ve genellikle matris çatlaması şeklinde meydana gelir. Matris hasarı ayrıca lif ve matris ara yüzeyi arasındaki bağın kopması şeklinde de oluşur. Matris çatlamaları, tek yönlü liflerden oluşmuş tabakalarda genellikle lif doğrultusuna paralel düzlemlerde oluşur.

Darbeden sonra, tahmin edilmesi çok zor olan ve karmaşık bir düzende bulunan matris çatlakları vardır. Tabakalı kompozitin darbe sonrası özelliklerinde matris çatlaklarının çok büyük etkisi olmadığından bunların belirlenmesi çok ta gerekli değildir. Ama, hasar süreci matris çatlakları ile başlar ve arkasından bu çatlaklar tabaka ara yüzlerinde tabaka ayrılmasına (delaminasyon) neden olur. İki tür matris çatlağı gözlenir: çekme çatlakları ve kayma çatlakları (Şekil 5.4). Çekme çatlakları, düzlem için normal gerilmelerin tabakacığın enine kayma mukavemetini aştığı zaman ortaya çıkar. Kayma çatlakları orta düzlemden belli bir açıda bulunurlar ki bu durum enine kayma gerilmelerin bu tür çatlakların oluşumunda önemli rolü oynadığını göstermektedir. Kalın tabakalı kompozitlerde yüksek yerel gerilmeler nedeniyle matris çatlakları vurucunun çarptığı ilk katmanda meydana gelir. Hasar, yukarıdan aşağıya doğru bir çam ağacı görüntüsü oluşturacak şekilde ilerler (Şekil 5.5a). İnce tabakalı kompozitler için, kompozitin arka yüzündeki eğilme gerilmeleri en alt katmanda matris çatlağına neden olur. Bu da matris çatlakları ve delaminasyonları başlatarak ters çevrilmiş çam ağacı şeklinde bir hasar görüntüsü verir (Şekil 5.5b).

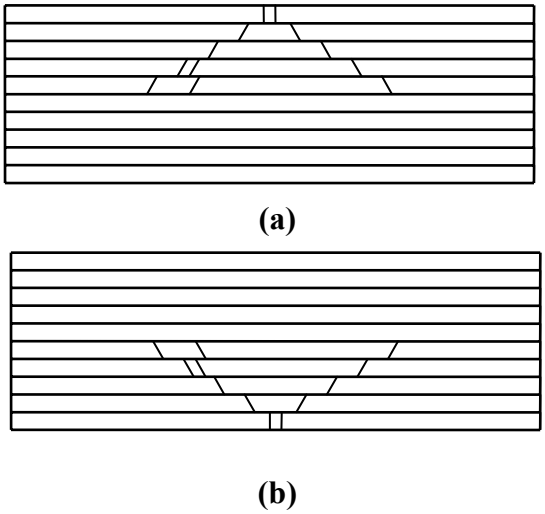


(a)



(b)

Şekil 5.4 Matris çatlakları (a) çekme çatlağı (b) kayma çatlağı



(a)

(b)

Şekil 5.5 (a) Çam ağacı (b) ters çevrilmiş çam ağacı görünümlü hasar örnekleri

5.4.2. Delaminasyon

Delaminasyon, aynı katman grubundaki tabakalar arasında değil, farklı elyaf yönlendirmelerine sahip tabakalar arasında matris bakımından zengin bölgede meydana gelen bir ayrılmadır. Tabakalı kompozit malzemede katmanlar arasındaki farklı elyaf yönlenmelerinden dolayı bu katmanların eğilme rijitlikleri farklılık gösterir. Delaminasyonun en önemli sebebi; tabakalar arasındaki bu eğilme rijitlik farklılığı ve eğilme kaynaklı kayma gerilmeleridir. Bu konudaki deneyler ve analizler, eğilmenin enine doğrultuda dış bükey olduğu ve lif doğrultusu boyunca tabakanın iç bükey eğilmeye eğilimli olduğunu göstermektedir. Tabakalar arası eğilme rijitliğindeki uyuşmazlık ne kadar büyük olursa ki 0°/90° en kötü elyaf doğrultusudur, delaminasyon alanı da o kadar büyük olur. Bunun yanı sıra delaminasyonu malzeme özellikleri, sıralanma düzeni ve tabaka kalınlığı gibi diğer bazı faktörler de etkilemektedir.

Matris çatlaması delaminasyonun başlaması açısından gerekli bir faktördür. Matris çatlaması ve delaminasyon arasında sıkı sıkıya bir ilişki mevcuttur. Delaminasyonlar, tabakalar arası ara yüzey bölgesinde meydana gelirler. Enine darbeye maruz 0°/90°/0° tabakaları için delaminasyon ve matris çatlaması etkileşmesi göz önüne alındığında; üst katmanlardaki eğimlenmiş çatlaklar ara

yüzeye ulaştığı zaman durdurulur ve katmanlar arasında delaminasyon olarak ilerler. Oluşan çatlakların ara yüzeye ulaşınca durdurulması; elyaf yönlenmelerindeki değişimden dolayıdır. Bu delaminasyon, ortadaki enine çatlama tarafından zorlanır Düşey eğilme çatlağı büyümesi, zorlanmayan en alt ara yüzey delaminasyonunu başlatır. Delaminasyona önderlik eden matris çatlamaları, kritik matris çatlamalarıdır. Delaminasyon, matris çatlamalarından dolayı meydana gelen yüksek mertebedeki düzlem dışı gerilmeler ve ara yüzey boyunca tabakalar arasındaki kesme gerilmelerinden dolayı Mod I ayrılma olarak başlamaktadır.

5.4.3. Elyaf Kopması

Hasar modlarından bir diğeri olan elyaf kopması, genellikle matris çatlaması ve delaminasyondan çok daha sonra meydana gelir. Elyaf kopmasına neden olan en önemli iki faktör:

1. Yüksek yerel gerilmeler ve nüfuziyetin neden olduğu etkilerdir (esas olarak kesme kuvvetleri tarafından idare edilen etkiler). Bu olay çarpan cismin hemen altında gerçekleşir.

2. Yüksek eğme gerilmeleridir. Bu olay ise, darbeye maruz kalmayan yüzde meydana gelir.

5.4.4. Nüfuziyet

Nüfuziyet, hasarın makroskobik bir modudur ve çarpan cismin malzeme üzerindeki dalma miktarını veya delme miktarını ifade eder. Elyaf hacim oranlarının aynı olduğu farklı boyutlardaki malzemelerde çarpan cismin nüfuziyet alanı yaklaşık olarak aynıdır.

6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

6.1. Deney Numunesinin Hazırlanması

Cam takviyeli plastik (CTP) tabakalı kompozitler ile çok sayıda düşük hızlı darbe çalışması mevcuttur. Yapılan çalışmalar incelendiğinde düşük hızlı darbe için standart numune ölçülerinin olmadığı görülmektedir. Ayrıca farklı tabaka sayılarında olan farklı numuneler kullanılmıştır. Tabaka sayısının belirlenmesi ile ilgili de herhangi bir standarda rastlanmamıştır. Örneğin bir çalışmada (Belingardi ve Vadori, 2002) [0/90]s, [0/ + 60/-60]s, [0/ + 45/-45]s şeklinde tek yönlü, güçlendirilmiş 4, 6 ve 8 tabakalı 2 mm kalınlığında numune kullanılırken, başka bir çalışmada (Aslan ve ark. 2003) 150×150 mm, 150×100 mm ve 150×50 mm boyutlarında (0°/90°/0°/90°)s şeklinde yönlendirilmiş 8 tabakalı 4.8 mm kalınlığında E-camı/epoksi tabakalı kompozit numune kullanılmıştır. Başka bir çalışmada ise (Whittingham ve ark. 2004) 215×215×1.66 ölçülerinde 8 tabakalı $[0°,+45°,-45°,90°]_s$ grafit/epoksi kullanılmıştır.

Bu çalışmada kullanılan deney numuneleri sırasıyla 180×50 mm, 180×100 mm ve 180×150 mm olarak seçilmiştir. Numuneler 18 tabakalı $[0°,–45°,+45°,0°,90°,0°,+45°,–45°,0°]_s$ şeklinde tek yönlü güçlendirilmiş E camı/epoksi tabakalı kompozit malzemeden hazırlanmış olup numunelerin her biri 7.0 mm kalınlığındadır.

Deney numuneleri İZOREEL Kompozit İzole Malzemeler San. ve Tic. Ltd. Şirketi tarafından üretilmiş ve istenilen ölçülerde kesilerek hazırlanmıştır.

Daha sonra yapısı ve çalışması açıklanacak olan cihaz üzerindeki vurucu 30 kg lık bir kütleye sahiptir. Tabaka sayısının belirlenmesinde bu kütle göz önünde tutulmuştur. Kütle fazla olduğu için deney numunesinin 18 tabakalı tek yönlü güçlendirilmiş kompozit malzeme seçilmesi uygun görülmüştür. Numunenin uzunluğu geliştirilen cihaz üzerindeki bağlama aparatına uygun olarak belirlenmiştir. Deney numunesi iki tarafı ankastre olarak bağlanmıştır. Kenarlarından 15 mm bağlanan numunenin boşta kalan kısmının uzunluğu 150 mm dir. Numune

genişliğinin belirlenmesinde ise bundan önce yapılan çalışmalar dikkate alınmıştır. Bundan önce yapılan çalışmalarda (Belingardi ve Vadori, 2002), (Aslan ve ark. 2003) uzunlukların değişmemesine rağmen genişlik 50 mm, 100 mm ve 150 mm şeklinde belirlenmiştir.

6.2. Malzeme Özelliklerinin Belirlenmesi

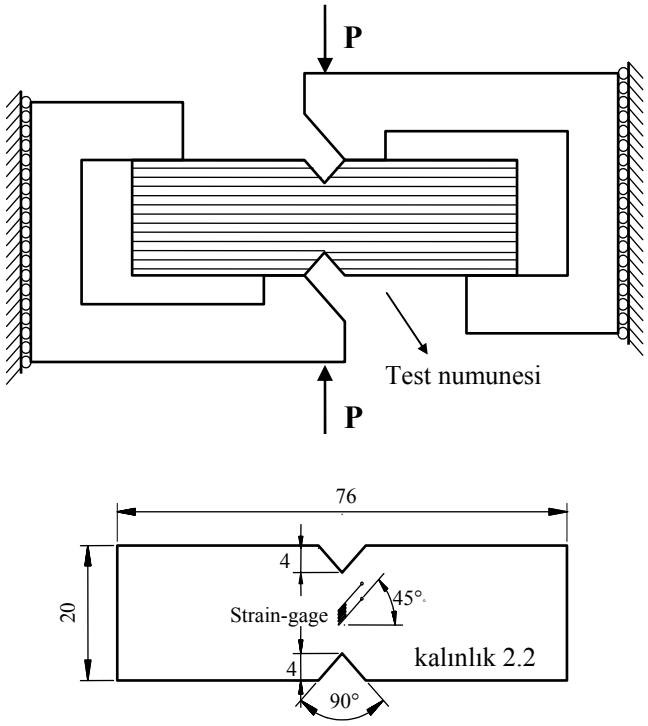
Tabakalı kompozitin mekanik davranışı deneysel olarak belirlenmiş mekanik özelliklerle tanımlanmıştır (Çizelge 6.1). Her bir malzeme özelliği için üçer adet deney numunesi kullanılmıştır. Mekanik testler INSTRON-1114 çekme test cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 6.1 E-camı/epoksi kompozitin mekanik ve fiziksel özellikleri

		Sembol [birim]	
Modul Parametreleri	Elyaf hacim oranı	V_f	0.60
	Yoğunluk	ρ [kg/m^3]	1840
	Boylamasına modül	E_L [GPa]	42
	Enlemesine modül	E_T [GPa]	9.5
	Düzlem-içi kayma modülü	G_{LT} [GPa]	3.5
	En büyük Poisson oranı	ν_{LT}	0.34
Mukavemet Parametreleri	Boylamasına çekme	X_t [MPa]	690
	Boylamasına basma	X_c [MPa]	300
	Enlemesine çekme	Y_t [MPa]	66
	Enlemesine basma	Y_c [MPa]	147
	Düzlem içi kayma mukavemeti	S [MPa]	56

Çekme özellikleri ASTM D3039-76 standart test yöntemine uygun olarak boylamasına [0°]8 ve enlemesine [90°]8 tek doğrultulu numunelerin statik çekilmesiyle ölçülmüştür. Düzlem içi kayma gerilme-birim şekil değiştirme cevabını belirlemek için Iosipescu kayma test yöntemi kullanılmıştır. Iosipescu deney numunesinin şekli ve boyutları Şekil 6.1 de görülmektedir. Bu test yöntemi birbirine zıt yönde etki eden kuvvet çifti ile numunenin orta uzunluğundaki kesitte yalın kayma halini oluşturmayı hedefler. Numunenin orta kesitinde sabit kayma yükleme

hali mevcut olup numunenin orta noktasında eğilme gerilmeleri sıfırdır (Gibson, 1994).



Şekil 6.1 Iosipescu kayma test yönteminin yükleme aparatı ve geometrisi.

6.2.1. Yakma Deneyi

ASTM-D2584'e uygun olarak yakma testleri yapıldı. Bu testlerden matris malzemesi ile takviye malzemesi hacimsel oranları elde edilmektedir. Bu sonuç, malzemenin tanımlanması ve teorik hesapların yapımında gerekmektedir.

50 mm genişliğindeki deney numunesinden 100 mm'lik üç adet parça kesildi. Kesilen bu halka numuneler, hassas terazide tartılarak ağırlıkları kaydedildi. Daha sonra kesilen deney numunelerinin hacimleri ve ağırlık değerleri yardımıyla, kompozit malzemenin yoğunluğu hesaplandı. Daha sonra bu numuneler 600 ^{o}C ta elektrikli ocakta yakıldı ve reçinesiz camın kalması sağlanarak yeniden tartıldı. Böylece cam ve reçine ağırlıkları tespit edildi. Cam yoğunluğu $\rho = 2.0$ g/cm^3 alınarak elyaf hacimsel oranı;

$$V_f = \frac{W_f / \rho_f}{W_c / \rho_c} \tag{6.1}$$

formülü ile hesaplandı. Burada W_f ve W_c elyaf ve kompozitin ağırlıklarıdır. ρ_f ve ρ_c ise elyaf ve kompozitin yoğunluklarıdır.

Bu çalışmada kullanılan malzemelerin yakma deneyi sonucunda elyaf hacimsel oranları (V_f), 18 tabakalı deney numuneleri için 0.65 olarak bulunmuştur.

6.3. Deney Cihazının Hazırlanması

6.3.1. Ağırlık Düşürme Test Cihazı

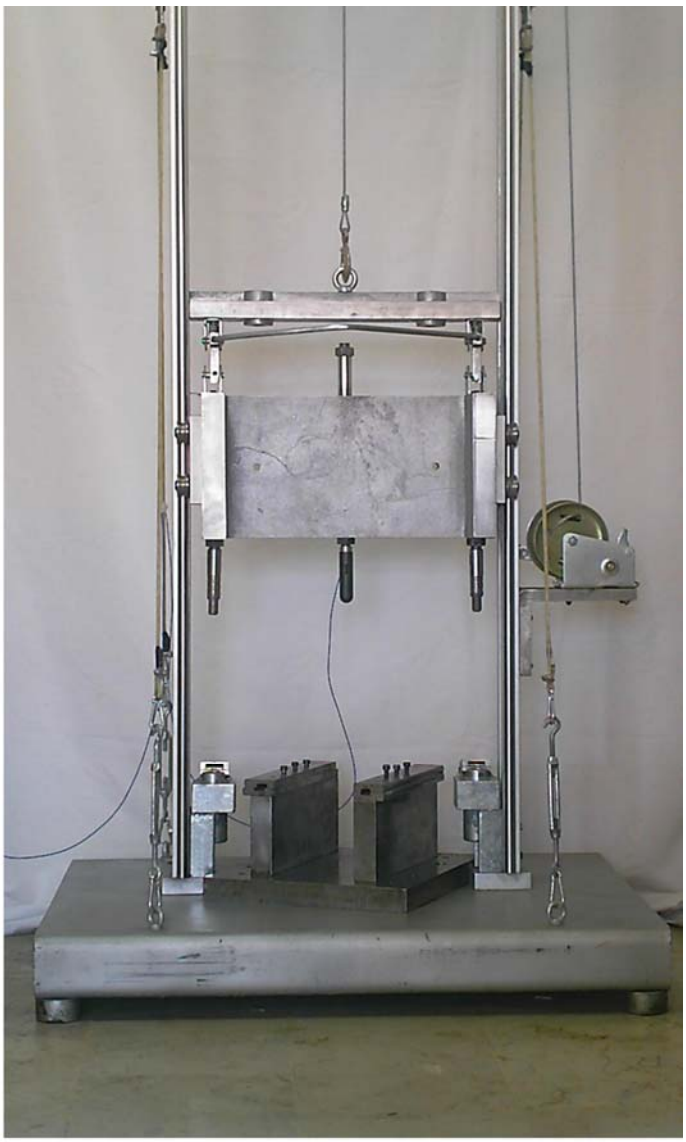
Dinamik darbe testleri numunelerin düşük hızlı darbe davranışlarını elde etmek için özel olarak imal edilmiş test cihazı ile yapılmıştır. Cihaz farklı darbe enerjilerinde, darbenin başlangıcından sonuna kadar, darbeyi kaydedebilen özel bir kabiliyete sahiptir.

Cihaz 3.0 m yüksekliğindedir. Vurucu 30 kg kütleli olup 2.5 m den serbestçe düşebilmektedir. Ağırlığın istenilen mesafeden bırakılabilmesi için kilit mekanizması vardır. Böylece değişik darbe hızlarında deney yapılabilmektedir. Serbest düşme ile öngörülen en büyük teorik hız 7.0 m/s dir.

Cihazımız üç ana elemandan oluşmaktadır. Bunlardan birincisi bağlama aparatı, çelik raylar ve vurucu kütlesini üzerinde tutan alt tabladır. İkincisi ise çelik ray-vurucu kütlesi bağlantısı ve numune bağlama aparatı grubudur. Son elemanımız ise elektronik kontrol ünitesidir. Ağırlık düşürme test cihazımız Şekil 6.2'de görülmektedir.

Ayrıca cihaz üzerinde vurucu kütlesini istediğimiz yüksekliğe kaldırabileceğimiz bir palanga sistemi mevcuttur. Palanga halatının uç kısmında vurucu kütlesini tutan bir mekanik kanca sistemi vardır. Bu sistemin üzerinde

bulunan manüel kol kaldırıldığı anda vurucu kütlesi serbest düşme ile çelik ray üzerinde düşey harekete geçer.



Şekil 6.2 Ağırlık düşürme test cihazı

Şekil 6.3'de vurucu kütlesinin en az sürtünmeyle serbest düşmesini sağlayan Tecnoline lineer yatak sistemi görülmektedir. Çelik ray üzerinde hareket eden karşılıklı dört adet tekerlek vardır. Şekilde 6.4'te görüldüğü gibi vurucu kütlesinin her iki kenarına da bağlanarak monte edilmiştir. Vurucunun kütlesi, bağlı olduğu

lineer yatak, Al döküm gövde, ucu ve bağlama elemanları ile beraber toplam 30 kg dır.



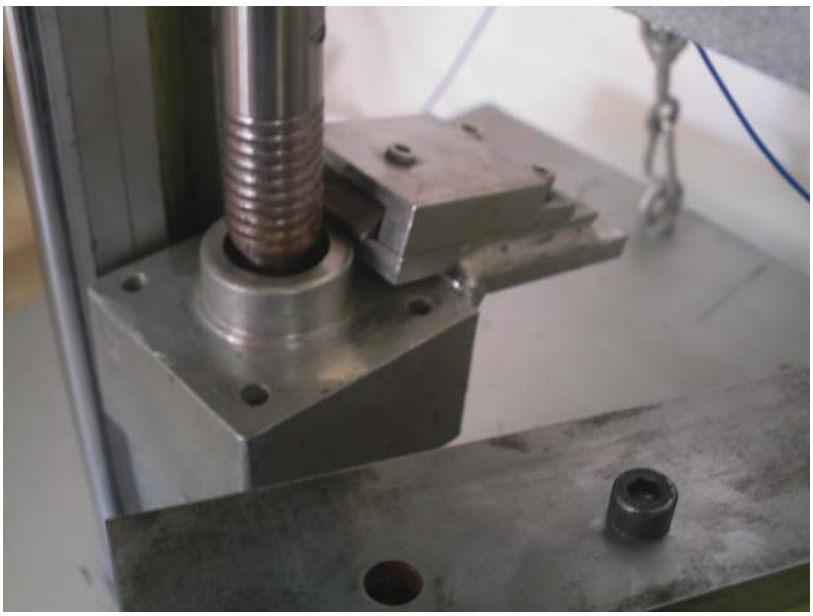
Şekil 6.3 Tecnoline lineer-yatak sistemi



Şekil 6.4 Vurucu

6.3.2. Vurucu Durdurma Mekanizması

Şekil 6.5'te kuvvet uygulandıktan hemen sonra vurucuyu durduran mekanik kilit sistemi görülmektedir. Vurucu kütlesinin her iki kenarına da kilit mekanizması yerleştirilmiştir. Vurucu numune üzerine ilk darbeyi yaptıktan sonra mekanik kilit sistemi vurucu kütlesinin hareketini durdurmaktadır. Böylece tekrarlı darbeler engellenmiştir.



Şekil 6.5 Vurucu durdurma mekanizması

6.3.3. Vurucu Geometrisi ve Kuvvet Algılayıcı

Şekil 6.6'da vurucu ile kuvvet algılayıcı bağlantısı görülmektedir. Deneyde kullanılan vurucu 24 mm çapında, yarı küresel uçlu bir geometriye sahiptir. Deneyde kullanılan kuvvet algılayıcı PCB Quartz ICP Force Sensor (M202B04) modelidir. 22.6 kN ölçme kapasitesi vardır. Vurucu kütlesi ile vurucu arasına monte edilmiştir. Kuvvet algılayıcıya bağlı teflon kablo yardımı ile sinyal elektronik kontrol ünitesine iletilmektedir.



Şekil 6.6 Vurucu-Kuvvet algılayıcı bağlantısı

6.3.4. Elektronik Kontrol Ünitesi

Elektronik aksamda kuvvet algılayıcıdan gelen sinyali algılayıp yükselten bir sinyal şartlandırıcı mevcuttur. Kuvvet algılayıcıya ve sisteme uyumlu olabilmesi için PCB 480C02 ICP tipinde bir sinyal şartlandırıcı seçilmiştir. 24 volt gerilimle çalışmaktadır. Enerjisi üç adet 9 volt'luk pil ile sağlanmaktadır. Kuvvet algılayıcı ile sinyal şartlandırıcı arasındaki bağlantıda PCB 003C30 teflon kablo kullanılmıştır. Kablo kuvvet algılayıcıdan gelen sinyalin özelliğini kaybetmeden iletilmesini sağlamaktadır.

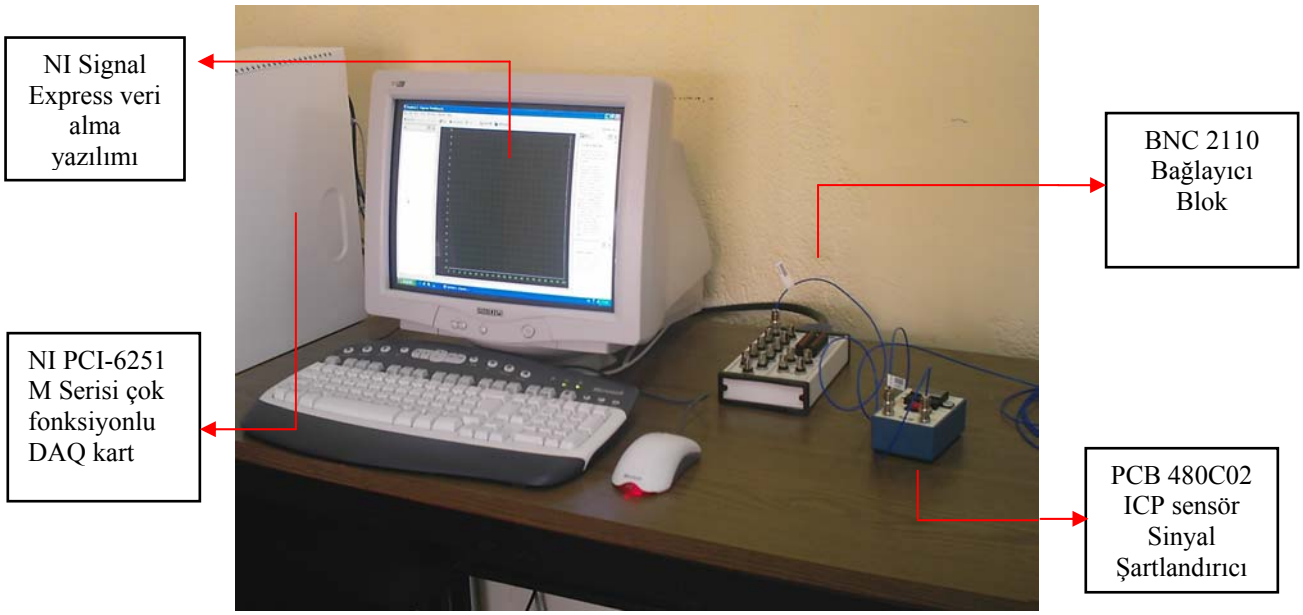
Sinyal şartlandırıcı' da yükseltilen sinyali DAQ karta iletilebilmesi için BNC bağlayıcı blok kullanılmıştır. Sinyalin doğrudan DAQ karta verilmesi risk taşımaktadır. Kartın yanmasına veya işlevini yitirmesine sebep olabilir. Bu yüzden yükseltilen sinyal bir bağlayıcı blok üzerinden iletilmektedir. Sistemle uyumlu çalışabilmesi için BNC 2110 bağlayıcı blok kullanılmıştır. Bağlayıcı blok farklı verilerinde aktarılmasında kullanılabilmektedir. Örneğin hız sensöründen alınan bir veri kolaylıkla DAQ karta iletilebilmektedir. Ayrıca mevcut sistemle beraber

çalıştırılacak cihazlar için DAQ kart tarafında üretilen gerilim bu bağlayıcı blok üzerinden alınabilmektedir. Sinyal şartlandırıcı ile bağlayıcı blok arasında kullanılan teflon kablo ise PCB 003D03 modelinde üretilen kablodur. Bağlayıcı blok ile DAQ kart arasında kullanılan kablo modeli ise SHC 6868EPM' dir.

Ana kart üzerine yerleştirilen DAQ kart ise gelen sinyali algılayıp işleyen karttır. NI PCI–6251 M serisi çok işlevli DAQ kart seçilmiştir. DAQ kart aynı anda birbirinden farklı birçok sinyali alıp işleyebilmektedir. Bunun yanı sıra istediğimiz özellikte yeni sinyaller de üretilebilmektedir. Bu sinyalleri bağlayıcı blok üzerinden alarak başka sistemler çalıştırılabilir.

NI Signal Express yazılımı ile zamana göre kuvvetin değişim grafiği elde edilmiştir. Bu yazılım sinyalin özelliklerini belirlemeye imkan vermektedir. Örneğin; kaç saniye boyunca sinyal alınacağı, saniyede kaç veri alınacağı ayarlayabilmektedir. Ayrıca hesaplanan bir katsayı ile alınan verileri çarparak kuvvet Newton olarak alınabilmektedir.

Şekil 6.7'de elektronik kontrol ünitesi görülmektedir.



Şekil 6.7 Elektronik kontrol ünitesi

6.4. Deneyin Yapılması

Şekil 6.8'de görüldüğü gibi deneyde kullanılan numuneler iki tarafı serbest, iki tarafı ankastre olacak şekilde bağlama aparatına bağlanmıştır. Numune boyutları sırasıyla 180×50 mm, 180×100 mm ve 180×150 mm dir. Numune kalınlığı ise 7 mm dir. Merkezi çarpmanın temini için önce her bir deney numunesinin merkezi markalama ile tespit edilmiştir. Bağlama aparatına yerleştirilirken darbe belirlenen bu merkeze olacak şekilde numunenin monte edilmesi sağlanmıştır.



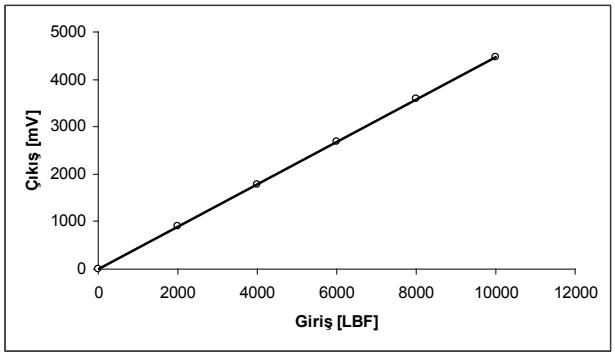
Şekil 6.8 İki tarafı serbest iki tarafı ankastre bağlanmış deney numunesi

Deneyler 2.0 m/s, 2.5 m/s ve 3.0 m/s'lik çarpma hızlarında yapılmıştır. Bu hızları elde edebilmek için vurucu kütlesini bırakacağımız yükseklik teorik olarak hesaplanmıştır. Vurucu kütlesi 2.0 m/s'lik çarpma hızı için 20.4 cm yükseklikten, 2.5 m/s'lik çarpma hızı için ise 31.9 cm yükseklikten ve 3.0 m/s çarpma hızı için ise 45.9 cm yükseklikten düşürülmüştür. Yarı küresel uçlu vurucu ile her bir numunenin merkezine darbe yapılmıştır. Vurucu ilk darbeyi yaptıktan sonra vurucu kütlesi tutularak tekrarlı darbeler engellenmiştir. Darbenin ilk başlangıcından sonuna kadar bütün veriler kuvvet algılayıcı tarafından elektronik aksama iletilmiştir. Bu veriler Signal Express yazılımı ile elde edilen kuvvetin zamana göre değişim grafiğinde

gösterilmiştir. Deneyde her bir deney numunesi için üç ayrı çarpma hızında elde edilen en büyük temas kuvvetleri ve bu kuvvetlerin etkisi incelenmiştir.

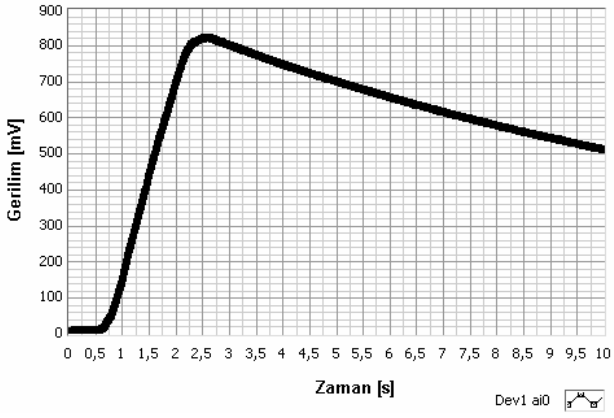
6.5. Kalibrasyon

Kuvvet sensörü PCB nin kalibrasyonu A2LA ISO/IEC 17025 belge numarası ile akredite edilmiştir. Garanti edilen değerlerin geçerli olması için kuvvet sensörü beraberinde verilen berilyum-bakır alaşımından yapılmış pulun kullanılması ve sensöre 2000 lb (8896.443 N) değerinde ön yükleme yapılması gerekmektedir. Cihaz ile beraber verilen kalibrasyon eğrisi Şekil 6.9 da görülmektedir.



Şekil 6.9 PCB Quartz ICP (M202B04) kuvvet sensörü kalibrasyon eğrisi

2000 lb lik bir ön yükleme 898 mV luk bir gerilim çıkışına karşılık gelmektedir. Kuvvet sensörünün ön yüklemesinde NI Signal Express yazılımından alınan ön yükleme grafiği Şekil 6.10 da verilmiştir.

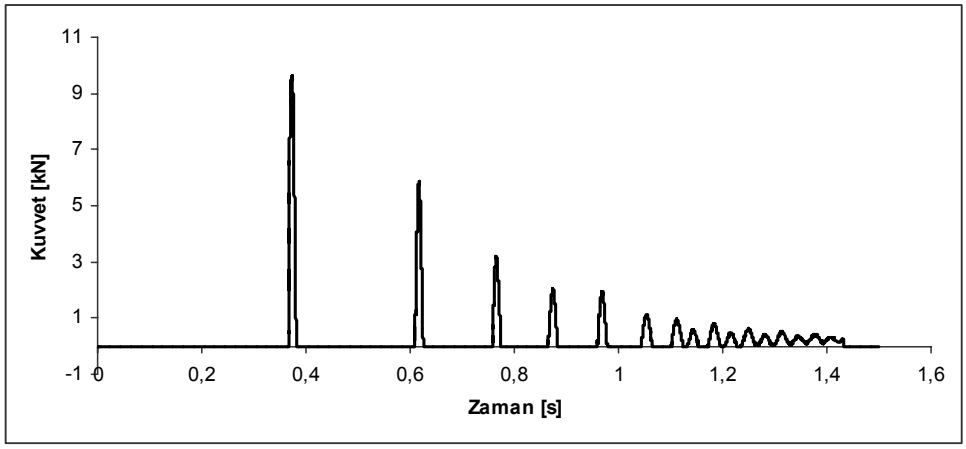


Şekil 6.10 PCB kuvvet sensörü ön yüklemesi

7. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME

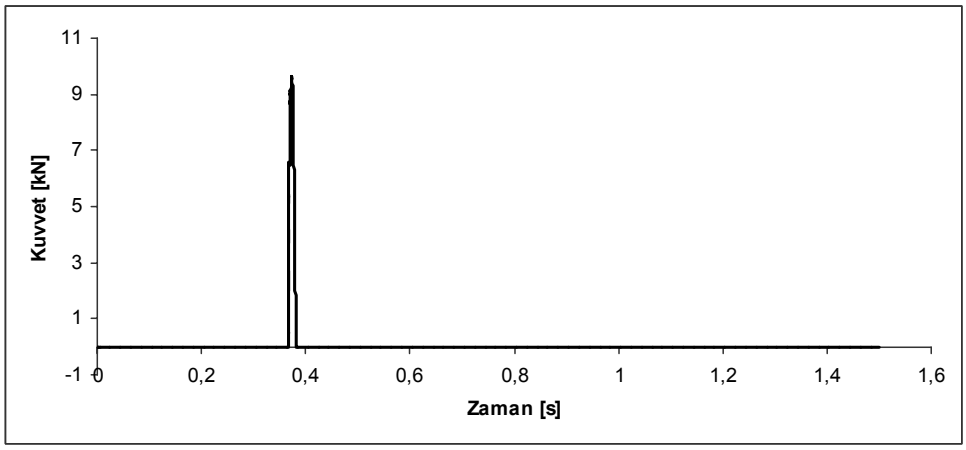
7.1. Vurucu ile Deney Numunesi Arasındaki Temas Kuvvetleri

Düşük hızlı darbe deneyleri 2.0 m/s, 2.5 m/s ve 3.0 m/s çarpma hızlarında 30 kg kütleli vurucu ile yapılmıştır. İki tarafı ankastre, diğer iki tarafı serbest olan deney numunelerinin düşük hızlı darbe cevabını araştırmak için geliştirilen cihazın elektronik aksamında kullanılan NI Signal Express 1.0 yazılımından alınan örnek bir sinyal Şekil 7.1'de görülmektedir. Burada vurucu 32 cm yükseklikten bırakılmış ve numune üzerinde tekrarlı darbeler yapılmıştır. Vurucu serbest düşmeye bırakıldığı yükseklikten deney numunesine temas edinceye kadar geçen sürede alınan sinyal değeri sıfırdır. Vurucunun deney numunesine temas ettiği andan itibaren kuvvet değeri yükselmeye başlamıştır. Kuvvet değeri azami bir değere (peak value) ulaştıktan sonra tekrar düşmüş ve sıfır seviyesine gelmiştir. Kuvvet değeri sıfır olur olmaz vurucu geriye doğru sıçramış ve numune ile teması kesilmiştir. Belirli bir yüksekliğe ulaştıktan sonra yerçekiminin etkisiyle tekrar serbest olarak düşmüştür ve deney numunesine ikinci darbeyi yapmıştır. Birinci darbede enerjinin bir kısmı soğurulduğu için ikinci darbe daha düşük bir enerji seviyesinde olmuş ve buna bağlı olarak azami kuvvet değeri de daha düşük olmuştur. Vurucu numune üzerinde duruncaya kadar tekrarlı darbeler devam etmiştir. Her darbede vurucunun enerjisi azaldığından azami kuvvet değeri zamana göre azalmış vurucu durduğunda sıfır olmuştur.



Şekil 7.1 Tekrarlı darbeye maruz deney numunesinden zamana bağlı olarak alınan kuvvet sinyalleri

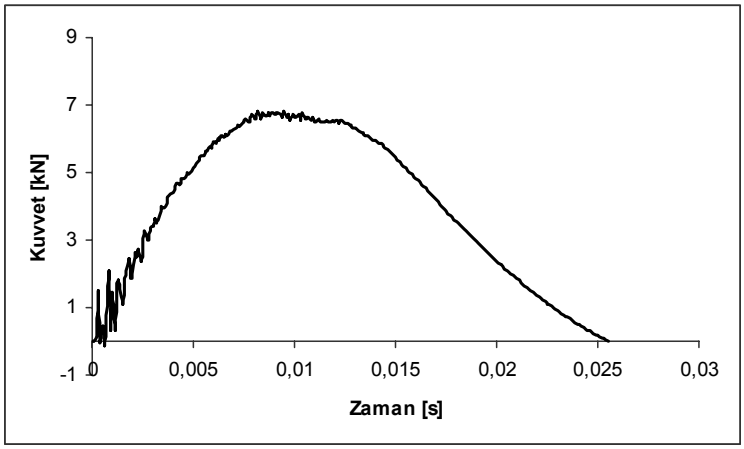
Bu tez çalışmasında sadece ilk darbenin etkileri araştırılmıştır. Bunu amaçla ilk darbeden sonra vurucu tutulmuştur. Vurucunun tutulmasıyla elde edilen örnek bir sinyal Şekil 7.2' de görülmektedir.



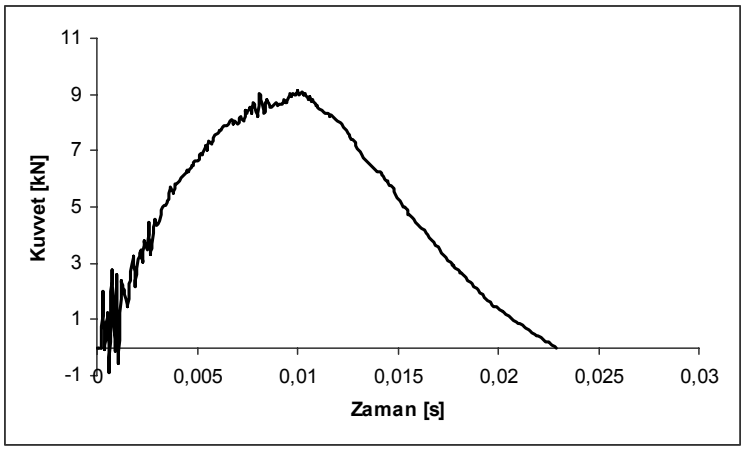
Şekil 7.2 Tek darbeye maruz deney numunesinden zamana bağlı olarak alınan kuvvet sinyalleri

Şekil 7.3a-c de 180×50 mm, Şekil 7.4a-c de 180×100 mm ve Şekil 7.5a-c de, 180×150 mm deney numunelerinde 2.0 m/s, 2.5m/s ve 3.0 m/s çarpma hızlarında elde edilen kuvvet-zaman değişimleri görülmektedir.

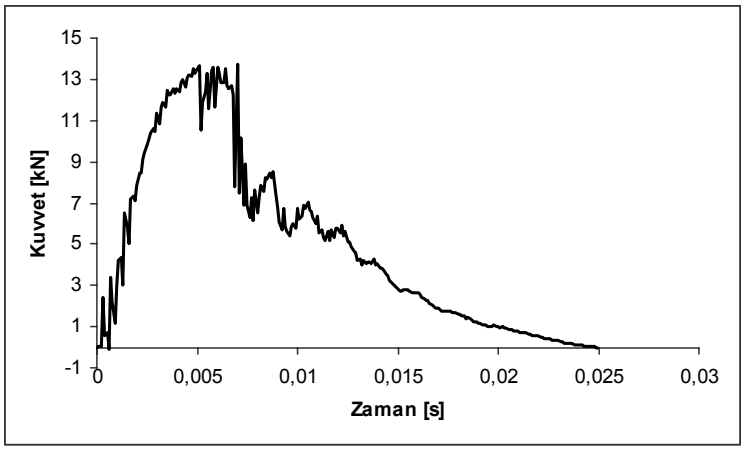
Elde edilen kuvvet–zaman değişimlerinin çıngırak eğrisi şeklinde olduğu görülmektedir. Bütün şekillerde kuvvet hızla artarak bir azami kuvvet değerine ulaşmaktadır ve daha sonra sıfıra düşmektedir. Her bir grafikte darbenin başlangıcında bir salınım meydana geldiği görülmektedir. Bu durum numunenin merkezi üzerinde hasar mekanizması oluştuğunu göstermektedir (Wang & Vukhanh, 1994). Ayrıca darbe başlangıcında numunede meydana gelen titreşim sonucunda kuvvet algılayıcı üzerinde bir normal kuvvet oluşturduğu ve bunun sonucu olarak darbe başlangıcında salınım meydana geldiği düşünülmektedir (Aslan ve ark. 2003, Whittingham 2004). Kuvvet en yüksek değerine ulaşıncaya kadar hasar oluşumunun hızla devam ettiği düşünülmektedir. Salınım miktarı arttıkça oluşan hasar miktarı da artmaktadır.



(a)

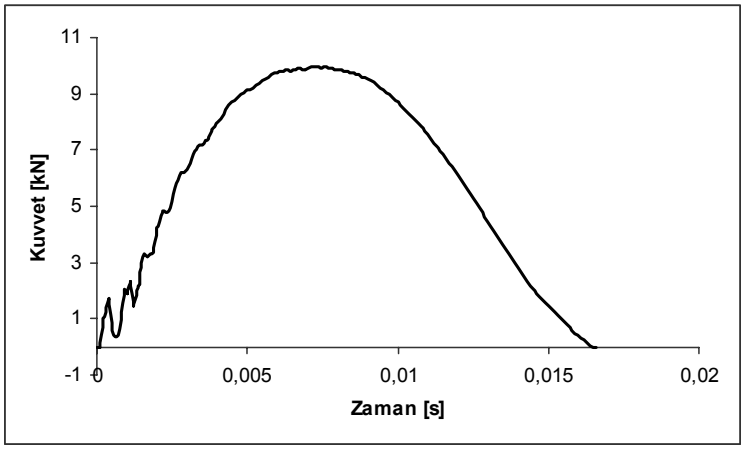


(b)

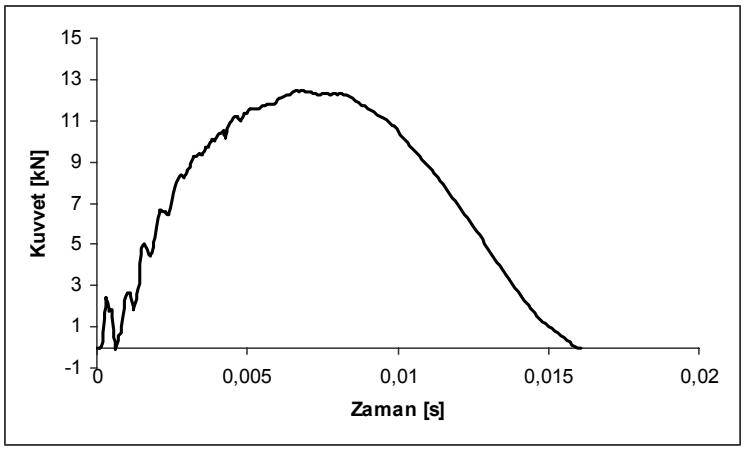


(c)

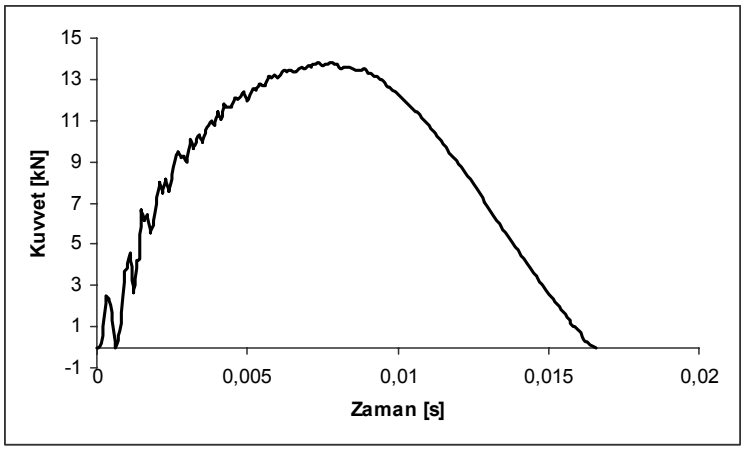
Şekil 7.3 180×50 mm boyutlarındaki numunede a) 2.0 m/s b) 2.5 m/s c) 3.0 m/s çarpma hızları için temas kuvveti–zaman değişimi



(a)

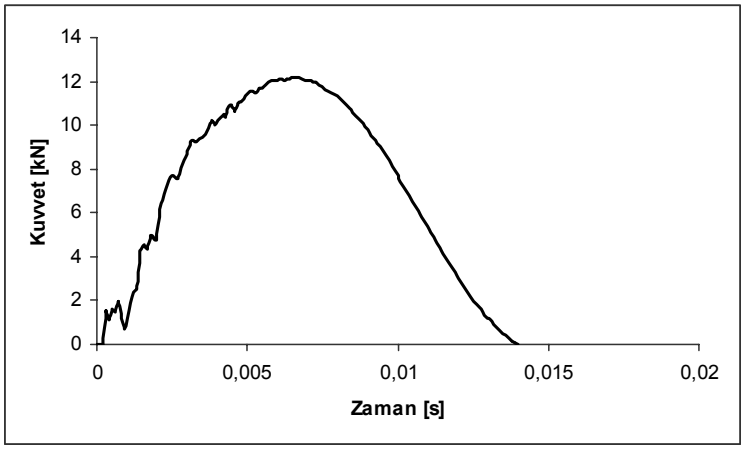


(b)

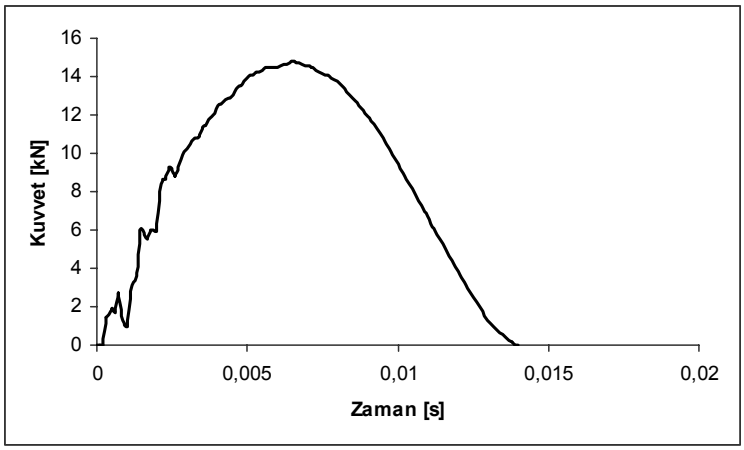


(c)

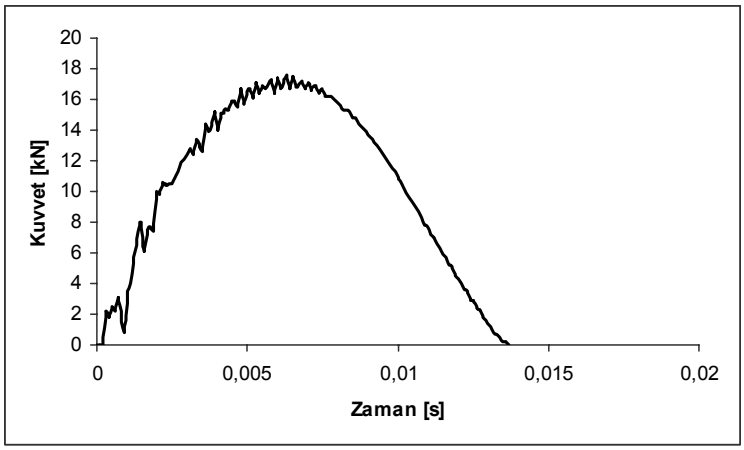
Şekil 7.4 180×100 mm boyutlarındaki numunede a) 2.0 m/s b) 2.5 m/s c) 3.0 m/s çarpma hızları için temas kuvveti–zaman değişimi



(a)



(b)



(c)

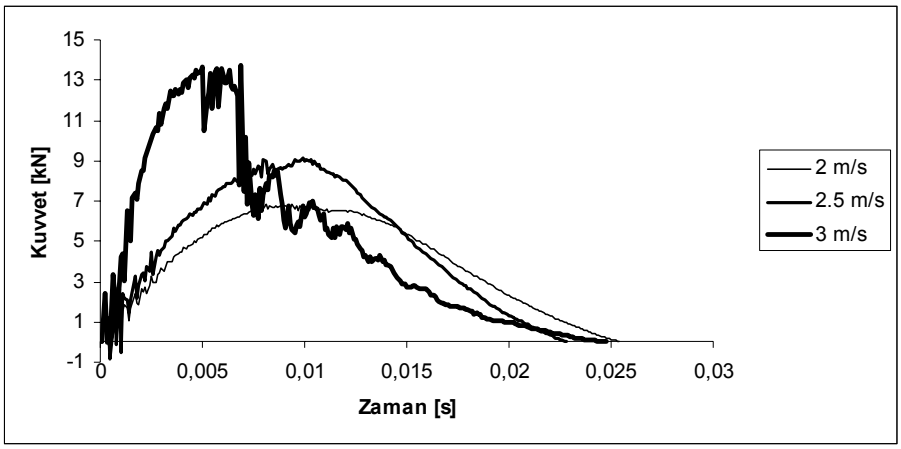
Şekil 7.5 180×150 mm boyutlarındaki numunede a) 2.0 m/s b) 2.5 m/s c) 3.0 m/s çarpma hızları için temas kuvveti–zaman değişimi

7.1.1. Çarpma Hızının Temas Kuvvetine Etkisi

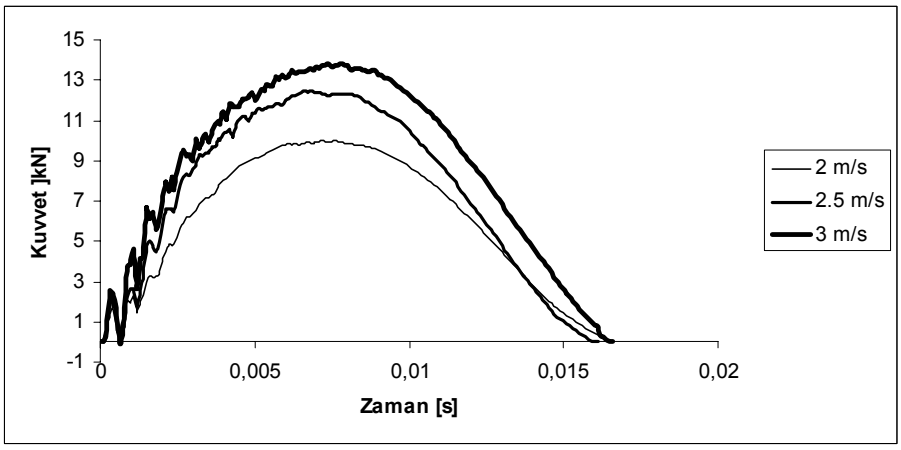
Düşük hızlı darbeye maruz bir numunede çarpma hızının temas kuvvetine olan etkisini belirleyebilmek için deneylerden elde edilen veriler değişik boyuttaki numuneler için derlenmiş ve bu değişimler Şekil 7.6a-c de çizilerek gösterilmiştir.

Şekil 7.6a-c deki grafiklerde sırasıyla 180×50 mm, 180×100 mm ve 180×150 mm boyutlarındaki kompozit numuneler için temas kuvvetinin zamana bağlı değişimi verilmiştir. Her bir grafikte farklı çarpma hızları (2.0 m/s, 2.5 m/s ve 3.0 m/s) birer ayrı seri olarak görülmektedir. Her bir grafikte, bir numunedeki tüm darbeler yaklaşık olarak aynı sürede gerçekleşmiştir. Bunun sebebi, aynı boyutlardaki numunelerin aynı kompliyansa sahip olmalarıdır.

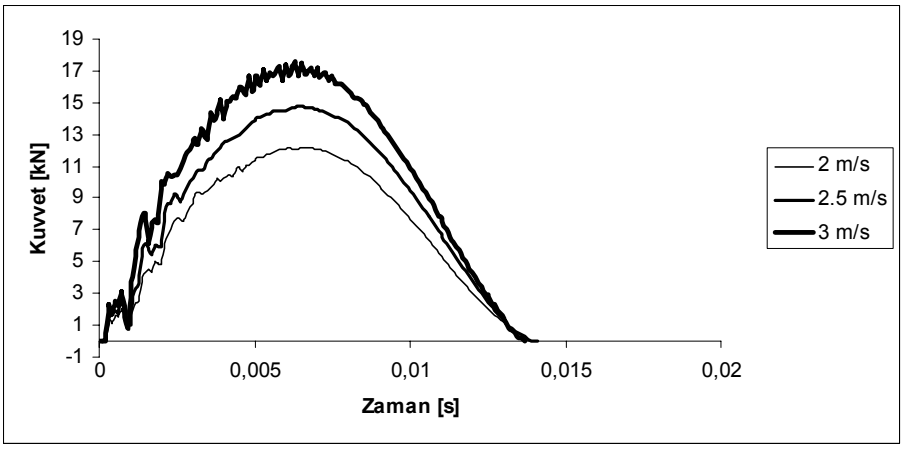
180×50 mm lik numunenin 3.0 m/s çarpma hızındaki darbesi istisna olmak üzere tüm eğriler tipik çıngırak eğrisi şeklinde çıkmıştır. Bu eğrilerdeki darbenin sıkışma aşamasındaki bölümlerinde küçük salınımlar görülmektedir. Bu salınımlar numunede gerçekleşen hasarlanmayı –muhtemelen delaminasyonu– işaret etmektedir. 180×50 mm lik numunede yüksek çarpma hızında bu darbe hasarına ilave olarak eğilme gerilmelerinden kaynaklanan hasarlar da geliştiği için bu deneyin eğrisi tam bir çıngırak şeklinde oluşmamıştır. 3.0 m/s hız için elde edilen seride kuvvetteki dalgalanmalar daha fazla olup temas süresinin yaklaşık 3/5 ine kadar devam etmiştir. Darbe ile numune ortasında başlayan hasar eğilme gerilmeleri nedeniyle numunenin eni boyunca her iki kenarına kadar ilerlediğinden temas kuvvetinde süreksizlik ve dalgalanmalar meydana gelmiştir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 7.6 Değişik çarpma hızlarında (a)180×50 mm, (b)180×100 mm ve (c)180×150 mm numunelerde kuvvet–zaman değişimi

Numunelerin değişik çarpma hızlarında yapılan darbe deneylerinde elde edilen en büyük temas kuvveti ile temas süresi değerleri Çizelge 7.1 de verilmiştir.

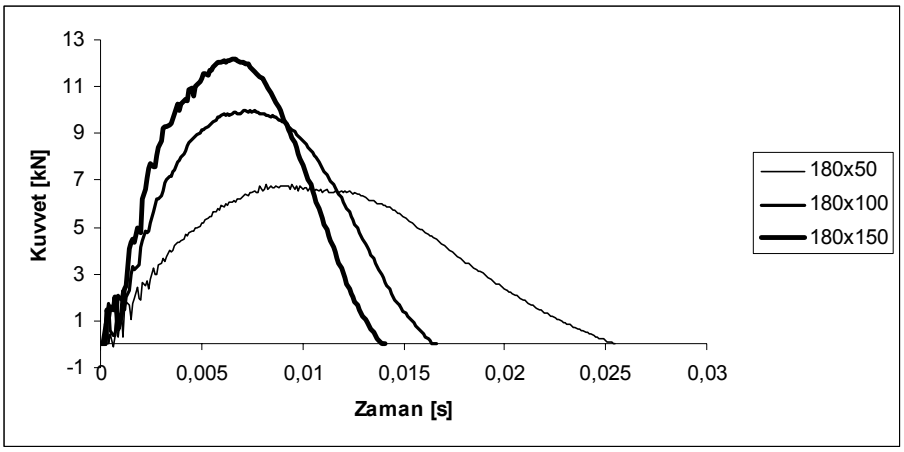
Çizelge 7.1 Düşük hızlı darbe deneylerinde elde edilen en büyük temas kuvveti ve vurucu temas süresi değerleri

Numune Boyutları [mm]	Çarpma Hızı [m/s]	En Büyük Temas Kuvveti [kN]	Temas Süresi [s]
180×50	2	6,806	0,0254
	2.5	9,122	0,0228
	3	13,721	0,0248
180×100	2	9,975	0,0165
	2.5	12,458	0,0161
	3	13,827	0,0166
180×150	2	12,179	0,0140
	2.5	14,760	0,0140
	3	17,636	0,0137

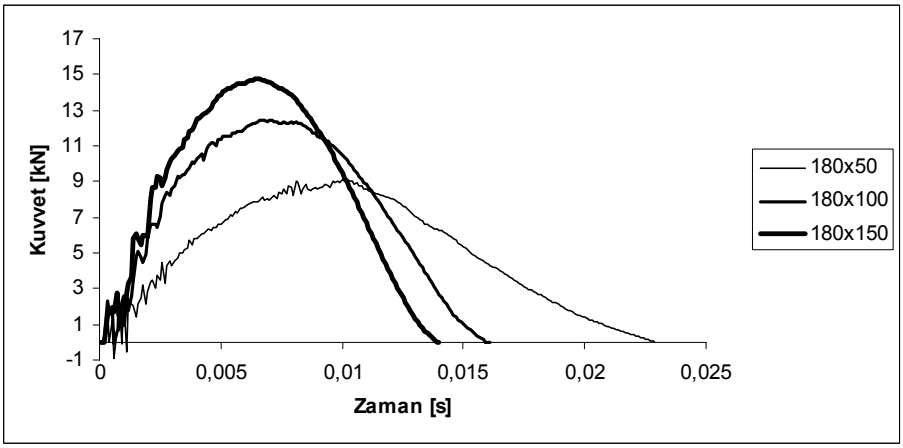
7.1.2. Numune Boyutlarının Temas Kuvvetine Etkisi

Sabit bir çarpma hızında (sabit bir darbe enerjisi) numune boyutlarının temas kuvvetine etkisini görebilmek için deney değerleri uygun bir şekilde gruplanmış ve değişimler Şekil 7.7a-c' de grafik halinde gösterilmiştir.

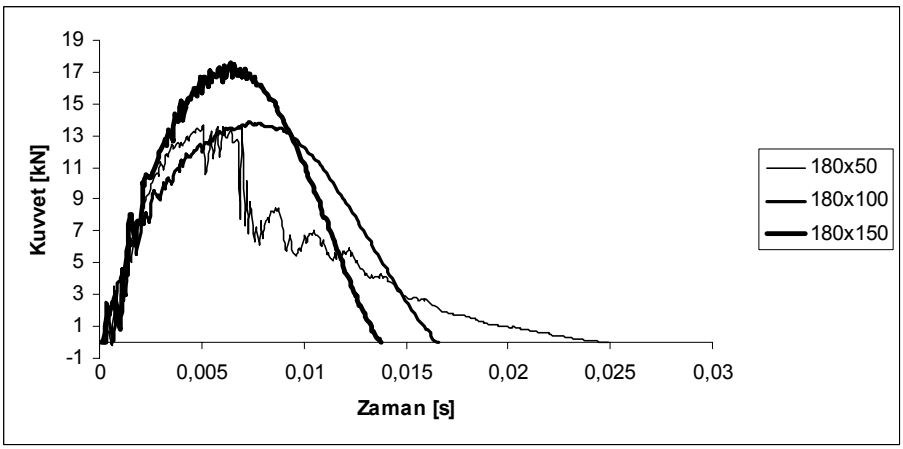
Şekil 7.7a-c' deki grafiklerde sırasıyla 2.0 m/s, 2.5 m/s ve 3.0 m/s çarpma hızlarında kuvvetin zamana göre değişimi görülmektedir. Her bir grafikte farklı numuneler ayrı birer seri olarak verilmiştir. Her bir deneyde numunelerin iki kenarı ankastre diğer iki kenarın serbest olacak şekilde bağlanmıştır. Bu durumda numune iki tarafı ankastre bağlı kiriş gibi davranmıştır. Numune genişliği büyüdükçe numunenin kompliyansı da düşmektedir. Bu durumda kuvvetler karşısında numune daha az çöker. Bunun neticesinde darbe süresi azalır. Grafiklerden ayrıca numunenin genişliği arttıkça darbe süresinde gelişen en büyük kuvvetin de arttığı görülmektedir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 7.7 Değişik numunelerde (a) 2.0 m/s, (b) 2.5 m/s ve (c) 3.0 m/s çarpma hızlarında kuvvet–zaman değişimi

Çizelge 7.2 de 2.0 m/s, 2.5 m/s ve 3.0 çarpma hızlarında, farklı boyutlardaki deney numunelerinde darbe süresi boyunca ölçülen en büyük temas kuvveti ve temas süresi değerleri verilmiştir. Çizelgedeki değerler incelendiğinde numune boyutu arttıkça vurucunun temas süresi azalırken elde edilen en büyük temas kuvveti arttığı görülmektedir.

Çizelge 7.2 Düşük hızlı darbe deneylerinde elde edilen en büyük temas kuvveti ve vurucu temas süresi değerleri

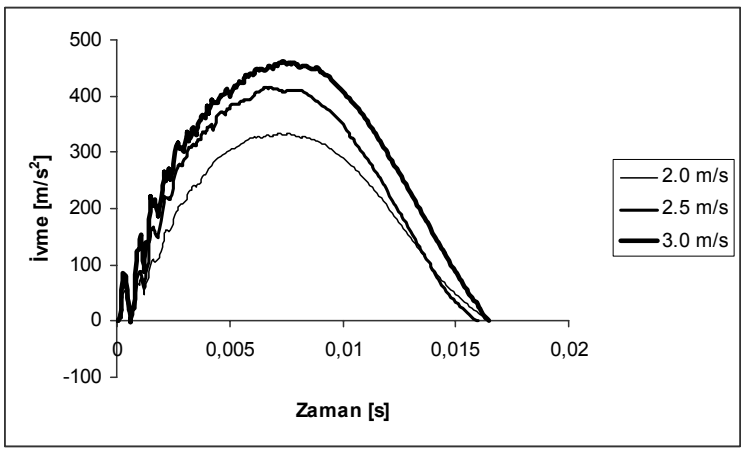
Çarpma Hızı [m/s]	**Numune Boyutları [mm]**	**En Büyük Temas Kuvveti [kN]**	**Temas Süresi [s]**
2.0	180×50	6,806	0,0254
	180×100	9,975	0,0165
	180×150	12,179	0,014
2.5	180×50	9,122	0,0228
	180×100	12,458	0,0161
	180×150	14,760	0,0140
3.0	180×50	13,721	0,0248
	180×100	13,827	0,0166
	180×150	17,636	0,0137

7.2. Kinetik Analiz Neticesinde Elde Edilen Değerler

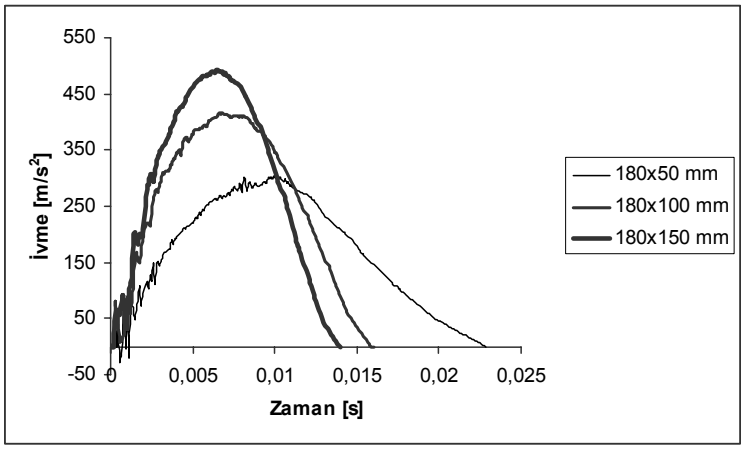
Tüm deney değerleri üzerinde yapılan hesaplamalar neticesinde ivme-zaman, hız-zaman, yer değiştirme-zaman, kuvvet-yer değiştirme değişimleri elde edilmiştir. Her bir deney numunesi için elde edilen grafikler, karakteristik olarak diğer numuneler için elde edilene benzemektedirler. Bu nedenle değişimleri göstermesi amacıyla 180×50 mm, 180×100 mm ve 180×150 mm boyutlarındaki deney numunelerinde 2.0 m/s, 2.5 m/s ve 3.0 m/s çarpma hızları için elde edilenler grafik olarak takip eden alt bölümlerde verilmiştir.

7.2.1. İvme – Zaman Değişimi

İvmenin zamana bağlı değişimi bir parçacık için Newton'un II kanununun uygulanmasıyla kuvvet-zaman değerlerinden elde edilmiştir. İvmenin zaman göre değişimi temas kuvvetinin zamana göre değişimine benzemektedir. Bu nedenle ivme değişimlerine örnek olması hasebiyle Şekil 7.8'de değişik çarpma hızlarında 180×100 mm boyutundaki numunede ivme-zaman değişimi, Şekil 7.9'da ise değişik numunelerde 2.5 m/s çarpma hızında ivme-zaman değişimi verilmiştir.



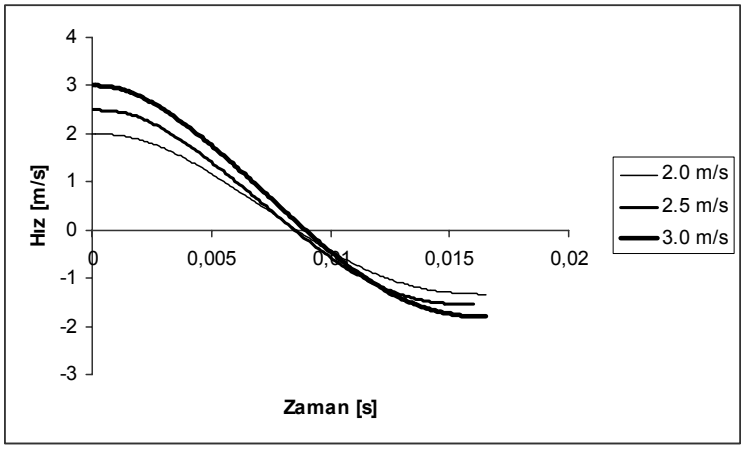
Şekil 7.8 Değişik çarpma hızlarında 180×100 mm numunede ivme–zaman değişimi



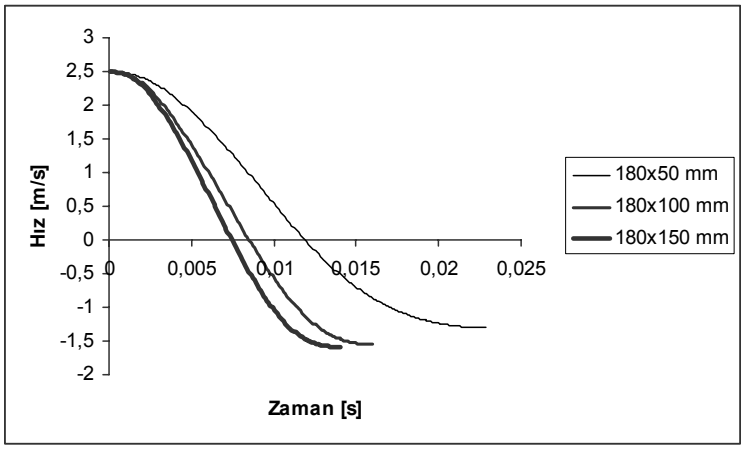
Şekil 7.9 Değişik numunelerde 2.5 m/s çarpma hızındaki ivme–zaman değişimi

7.2.2. Hız – Zaman Değişimi

Hızın zamana bağlı değişimi, ivme-zaman değerlerinden iki veri arasındaki değişimin doğrusal olması yaklaşımı ile sayısal integral yöntemlerinden yamuklar kuralı yardımıyla elde edilmiştir. Hızın zaman göre değişimi katı cisim darbe teorisiyle verilen değişime benzer çıkmıştır. Şekil 7.10'da değişik çarpma hızlarında 180×100 mm numunede hız-zaman değişimi, Şekil 7.11'de ise değişik numunelerde 2.5 m/s çarpma hızındaki hız-zaman değişimi örnek olarak sunulmuştur.



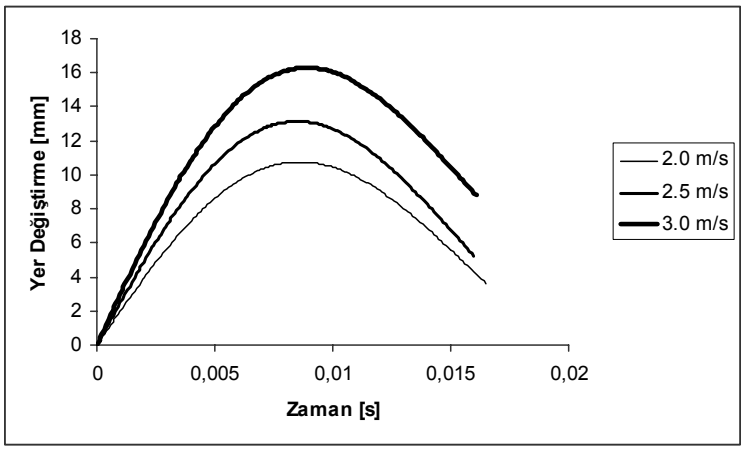
Şekil 7.10 Değişik çarpma hızlarında 180×100 mm numunedeki hız–zaman değişimi



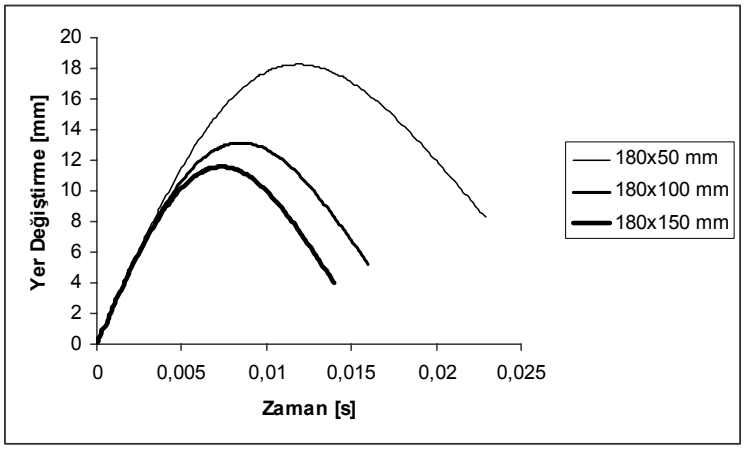
Şekil 7.11 Değişik numunelerde 2.5 m/s ve çarpma hızındaki hız–zaman değişimi

7.2.3. Yer Değiştirme – Zaman Değişimi

Yer değiştirmenin zamana bağlı değişimi, hız-zaman değerlerinden iki ivme verisi arasındaki değişimin doğrusal olması yaklaşımı ile sayısal entegral yöntemlerinden yamuklar kuralı yardımıyla elde edilmiştir. Şekil 7.12'de değişik çarpma hızlarında 180×100 mm numunedeki yer değiştirme-zaman değişimi, Şekil 7.13'de ise değişik numunelerde 2.5 m/s çarpma hızındaki yer değiştirme-zaman değişimi örnek olarak verilmiştir.



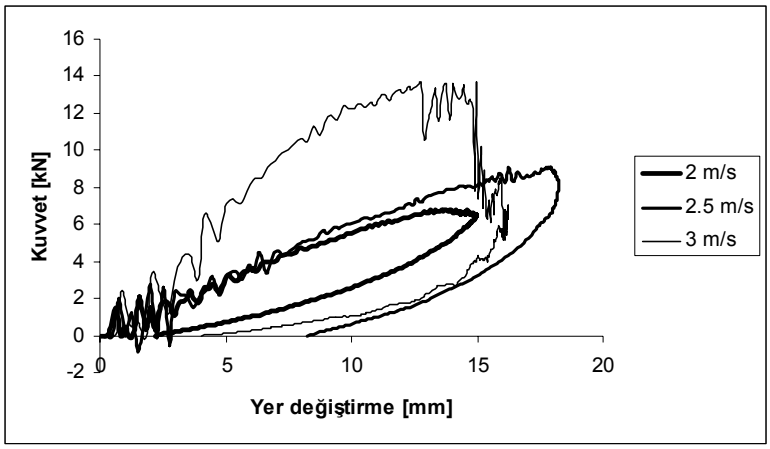
Şekil 7.12 Değişik çarpma hızlarında 180×100 mm numunedeki yer değiştirme – zaman değişimi



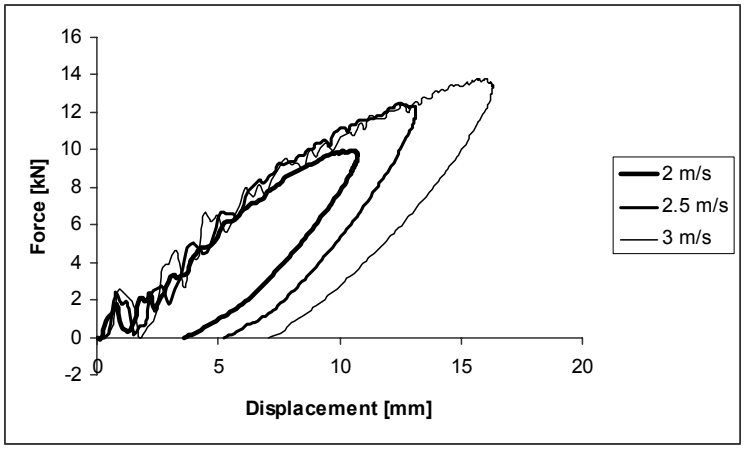
Şekil 7.13 Değişik numunelerde 2.5 m/s çarpma hızındaki yer değiştirme –zaman değişimi

7.2.4. Kuvvet–Yer Değiştirme Değişimi

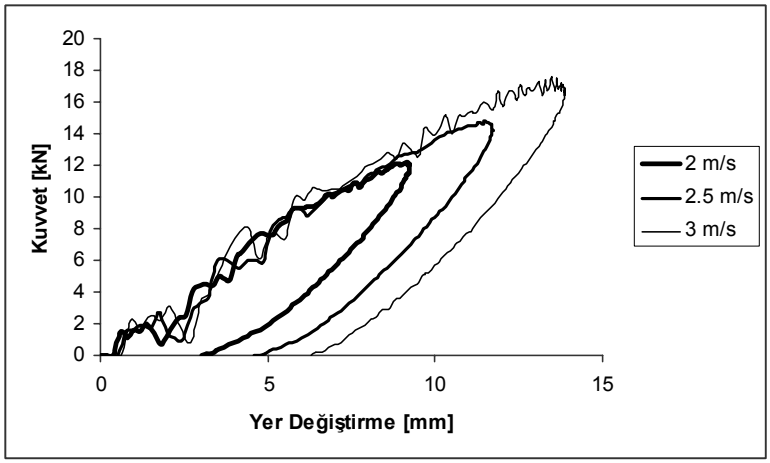
Kuvvetin yer değiştirmeye göre değişimi aşağıdaki grafiklerde sunulmuştur. Bu değişim katı cisim darbe teorisiyle verilen değişime benzer çıkmıştır. Kuvvet-yer değiştirme grafiği altında kalan alan numune üzerinde yapılan işi (numunede yutulan enerjiyi) vermektedir. Şekil 7.14a-c'de değişik çarpma hızlarında 180×50 mm, 180×100 mm ve 180×150 mm numunelerde kuvvet–yer değiştirme değişimi, Şekil 7.15a-c'de ise değişik numunelerde 2.0 m/s, 2.5 m/s ve 3.0 m/s çarpma hızlarında kuvvet–yer değiştirme değişimi görülmektedir.



(a)

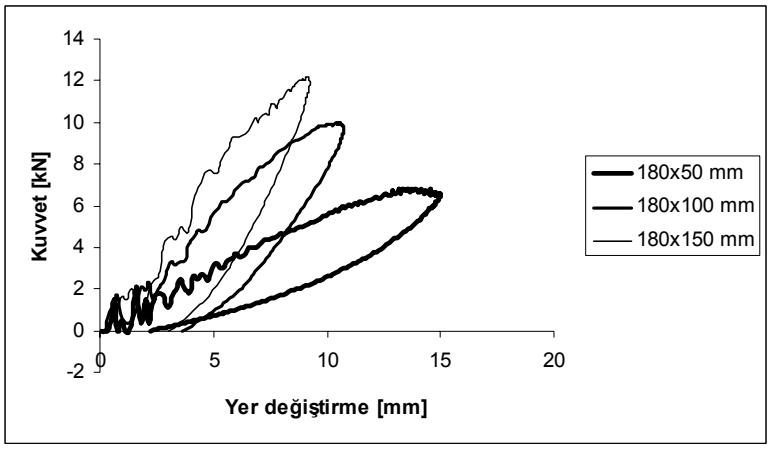


(b)

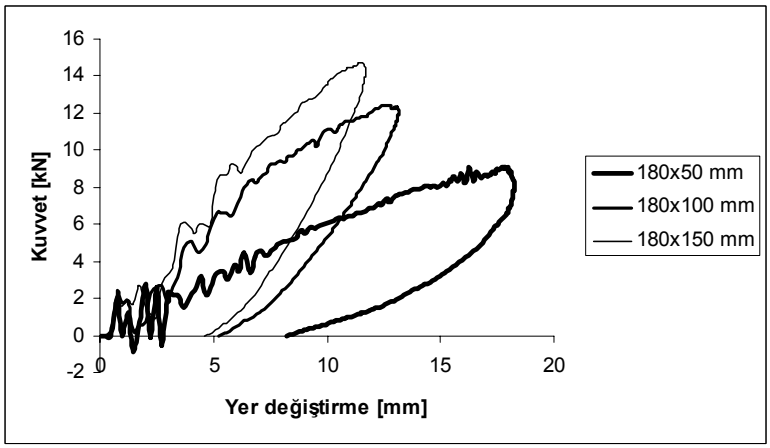


(c)

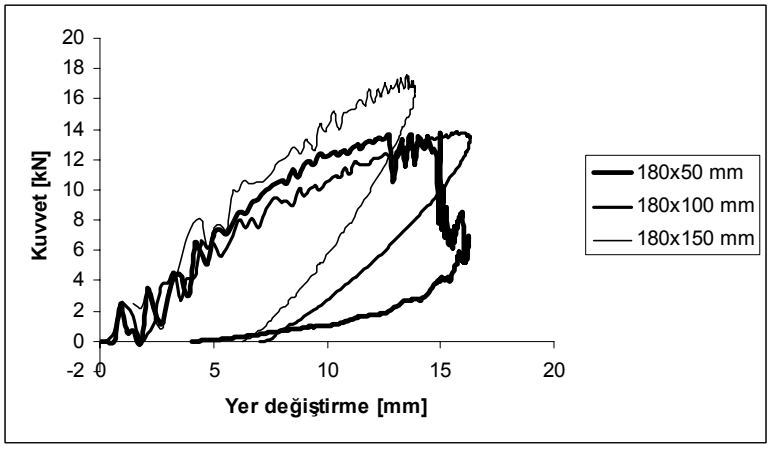
Şekil 7.14 Değişik çarpma hızlarında (a)180×50 mm, (b)180×100 mm ve (c)180×150 mm numunelerde kuvvet–yer değiştirme değişimi



(a)



(b)

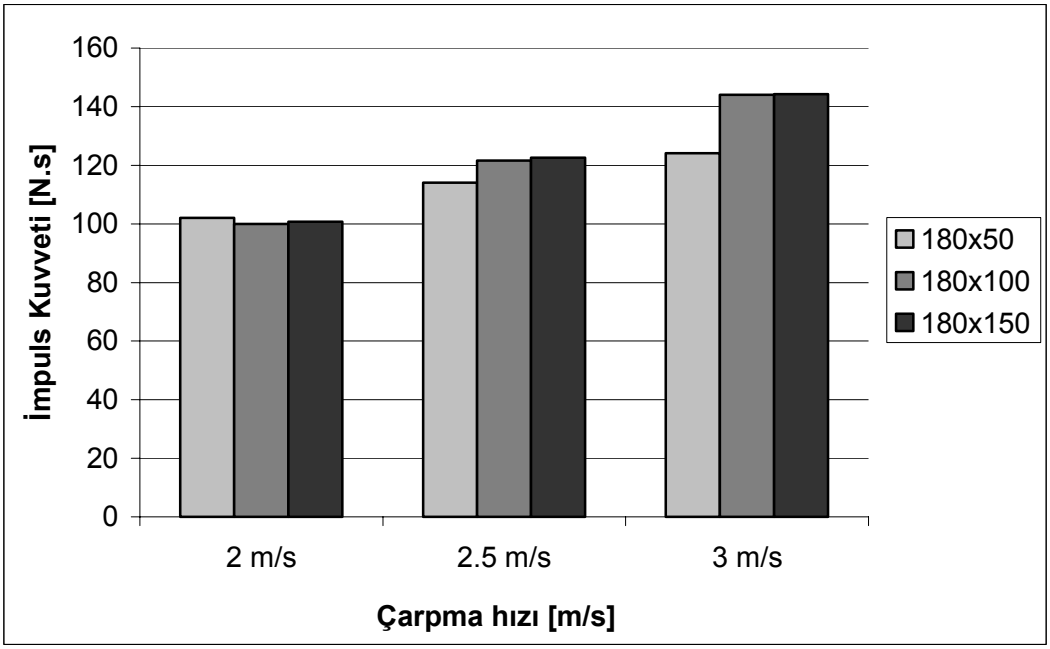


(c)

Şekil 7.15 Değişik numunelerde (a) 2.0 m/s, (b) 2.5 m/s ve (c) 3.0 m/s çarpma hızlarında kuvvet–yer değiştirme değişimi

7.3. İmpuls Kuvveti

Çarpışma sırasında cisimlerin hareketini değiştiren kuvvet, genellikle çok kısa sürelerde etkilidir. İmpuls kuvveti lineer momentumdaki değişmeye eşit olup aynı zamanda kuvvet-zaman eğrisinin altında kalan alana da eşittir. İmpuls kuvveti yamuklar kuralı yardımıyla eğri altında kalan alanın tespit edilmesiyle bulunmuştur. Elde edilen değerler Şekil 7.16'da gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi 2.0 m/s çarpma hızında impuls kuvvetleri eşit çıkmıştır. Hız arttıkça 180×50mm boyutlarındaki numunede impuls kuvveti değeri diğerlerine göre azalmıştır. Bunun nedeni numunedeki eğilmeden meydana gelen hasarlanmalardır. 180×150 mm ve 180×100 mm boyutlarındaki deney numunelerinde impuls kuvveti aynı hız değerlerinde eşit çıkmıştır. Çarpma hızı arttıkça en büyük temas kuvveti artmakta ancak vurucunun temas süresi azalmaktadır. Ayrıca aynı hız değerlerinde numunelerin yuttuğu enerji miktarları da eşit çıkmıştır. Bu sebeplerden dolayı impuls kuvvetlerinin aynı hız değerlerinde 180×150 mm ve 180×100 mm boyutlarındaki deney numunelerinde eşit olduğu gözlenmiştir.



Şekil 7.16 Değişik numunelerde 2.0 m/s, 2.5 m/s ve 3.0 m/s çarpma hızları için elde edilen impuls kuvvetleri

7.4. Düşük Hızlı Darbede Enerji Dağılımı ve Hasar Bölgeleri

Düşük hızlı darbede vurucu kütlesinin serbest düşmeye başlamadan önce sahip olduğu enerjinin (darbe enerjisi) aşağıdaki mekanizmalara harcanır.

- Sıçrama enerjisi
- Kuvvet algılayıcıda tüketilen enerji
- Vurucuda harcanan enerji
- Mesnet sisteminde harcanan elastik enerji
- Bağlama noktasında kayma enerjisi
- Parçaya aktarılan enerji (Parçada harcanan elastik enerji + Hasar enerjisi)

Kuvvet algılayıcı PCB kullanım el kitabında önerildiği şekilde sisteme bağlanmış ve ön yükleme yapılmıştır. Bu şartlar sağlandığında kalibrasyon eğrisinde garanti edilen değerler içerisinde kuvvet algılayıcıda harcanan enerji dikkate alınmamıştır. Bağlama aparatı ve alt tabla deney numunesine nazaran kalın, ağır ve rijit olduğu için bunlardaki elastik deformasyona harcanan enerji deney numunesine harcanan enerjiye göre çok azdır ve dikkate alınmamıştır. Vurucu Ç4140 malzemesinden yapılıp 63 Rc sertlik derecesinde sertleştirilmiştir. Bu nedenle vurucudaki elastik şekil değiştirme deney numunesine göre oldukça küçük olduğunda burada harcanan enerji ihmal edilmiştir. Numune bağlama aparatına yeterli sıklıkta bağlanarak kayması önlenmiştir. Vurucu kütlesinin hareket ettiği ray ve lineer yatak sistemi 0.001 mm hassasiyetle çalışmakta olduğu için yatakta meydana gelen sürtünme kayıpları ihmal edilmiştir. Bu nedenlerle toplam enerji, parçaya aktarılan enerji ve sıçrama enerjisi olmak üzere iki kısımda değerlendirilmiştir. Parçaya aktarılan enerji şekil değiştirme enerjisi ve hasar enerjisi olarak harcanmaktadır.

Kinetik analiz sonucu elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafiklerinin altında kalan alan numune üzerine yapılan işi (numunede yutulan enerjiyi) vermektedir. Bu durumdan yararlanarak sıçrama enerjisi ve numuneye aktarılan enerji tespit edilmiştir.

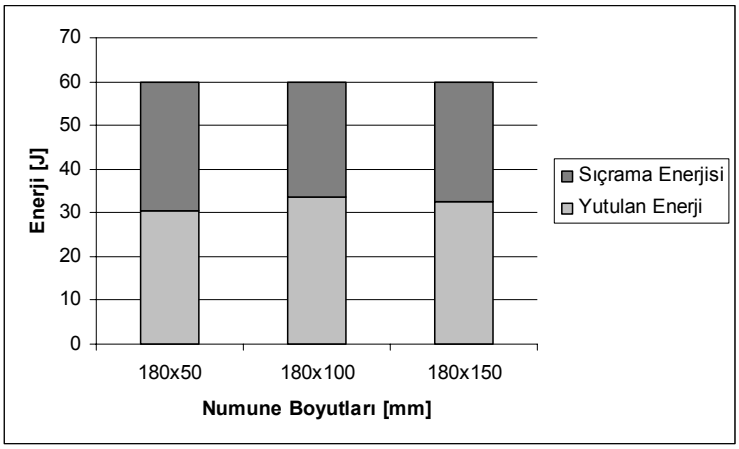
Vurucunun serbest düşmeye başlamadan önce sahip olduğu potansiyel enerji (darbe enerjisi) Bölüm 4.8'de verilmiştir. Bu enerji değerinden numunede yutulan enerji değeri çıkarıldığı zaman sıçrama enerjisi tespit edilmektedir. Deneylere ait tüm enerji bilançosu Çizelge 7.3 e verilmiştir. Şekil 7.17a-c'de değişik numunelerde 2.0 m/s, 2.5 m/s ve 3.0 m/s çarpma hızlarında enerji dağılımı verilmiştir.

180×50 mm boyutlarındaki numunede sıçrama enerjisi 2.0 m/s çarpma hızında diğer numunelere göre daha fazla olurken 2.5 m/s ve 3.0 m/s çarpma hızlarında daha az olmaktadır. Darbe enerjisi arttıkça 180×50 mm boyutlarındaki numunede kalıcı eğilme şekil değiştirmesi de artmaktadır. 180×100 mm ve 180×150 mm boyutlarındaki numunelerde ise aynı darbe enerjisi için yutulan enerji miktarının da yaklaşık olarak eşit olduğu görülmektedir.

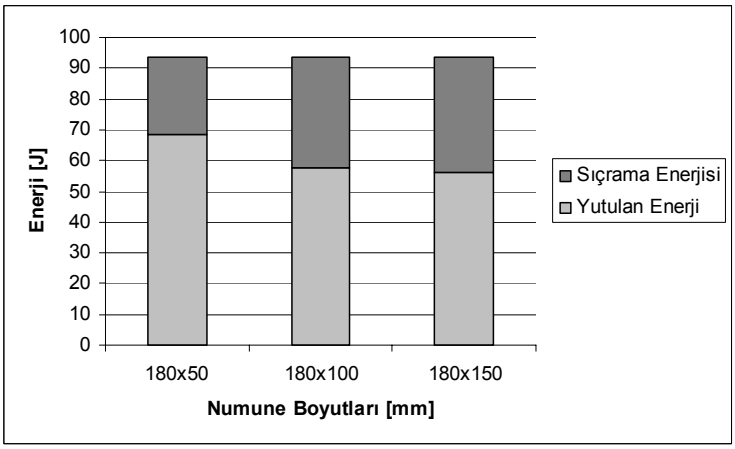
Elde edilen enerji dağılımlarında gözlenen diğer bir husus ise, darbe enerjisi arttıkça yutulan enerjinin toplam enerjiye oranı artmaktadır. Örneğin 180×100 mm boyutlarındaki numune 2.0 m/s çarpma hızında toplam enerji miktarının %55'ini, 2.5 m/s çarpma hızında toplam enerji miktarının %61'ini ve 3.0 m/s çarpma hızında toplam enerji miktarının %63'ünü yutmuştur. Darbe enerjisi arttıkça yutulan enerji oranının artması numunelerde oluşan hasarında arttığını göstermektedir.

Çizelge 7.3 Düşük hızlı darbe deneylerinde elde edilen en büyük temas kuvveti ve vurucu temas süresi değerleri

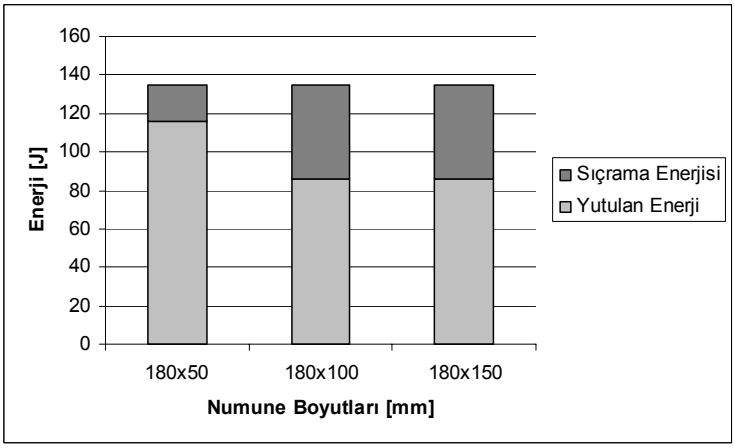
Darbe enerjisi [J]	**Numune Boyutları [mm]**	**Sıçrama enerjisi [J]**	**Yutulan enerji [J]**
60	180×50	17.47	42.53
	180×100	18.68	41.32
	180×150	18.69	41.31
93.75	180×50	16.25	77.5
	180×100	30.37	63.38
	180×150	31.00	62.75
135	180×50	11.29	123.71
	180×100	38.14	96.86
	180×150	38.28	96.72



(a)



(b)



(c)

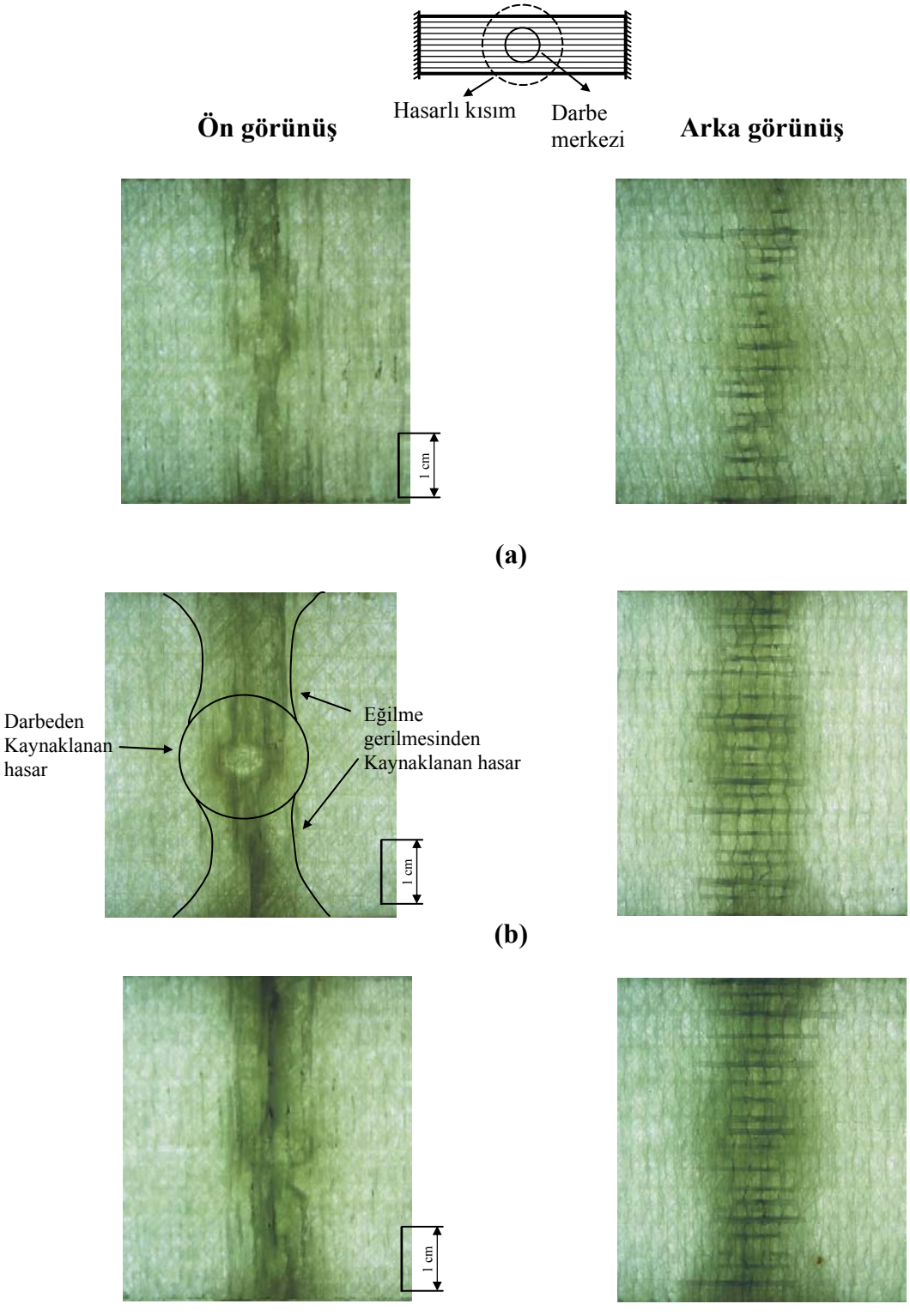
Şekil 7.17 Değişik numunelerde (a) 2.0 m/s, (b) 2.5 m/s ve (c) 3.0 m/s çarpma hızlarında enerji dağılımı

Kevlar ve cam/epoksi kompozitlerde gelişen hasarlar numune arkasından ışık tutulmak suretiyle belirlenir. Delaminasyonların boyutu ve şekli ile mevcut olan matris çatlakları göz ile belirlenebilir (Abrate 1998). Deney numunelerine darbe yapıldıktan sonra ön ve arka bölgelerinin ışık altında yüksek çözünürlükte fotoğrafları çekilmiştir. Şekil 7.18a-c'de düşük hızlı darbe yapılmış 180×50 mm boyutlarındaki numunelerde, Şekil 7.19a-c'de 180×100 mm boyutlarındaki numunelerde, Şekil 7.20a-c'de ise 180×150 mm boyutlarındaki numunelerde sırasıyla 2.0 m/s, 2.5 m/s ve 3.0 m/s çarpma hızlarında ön ve arka hasar bölgeleri görülmektedir.

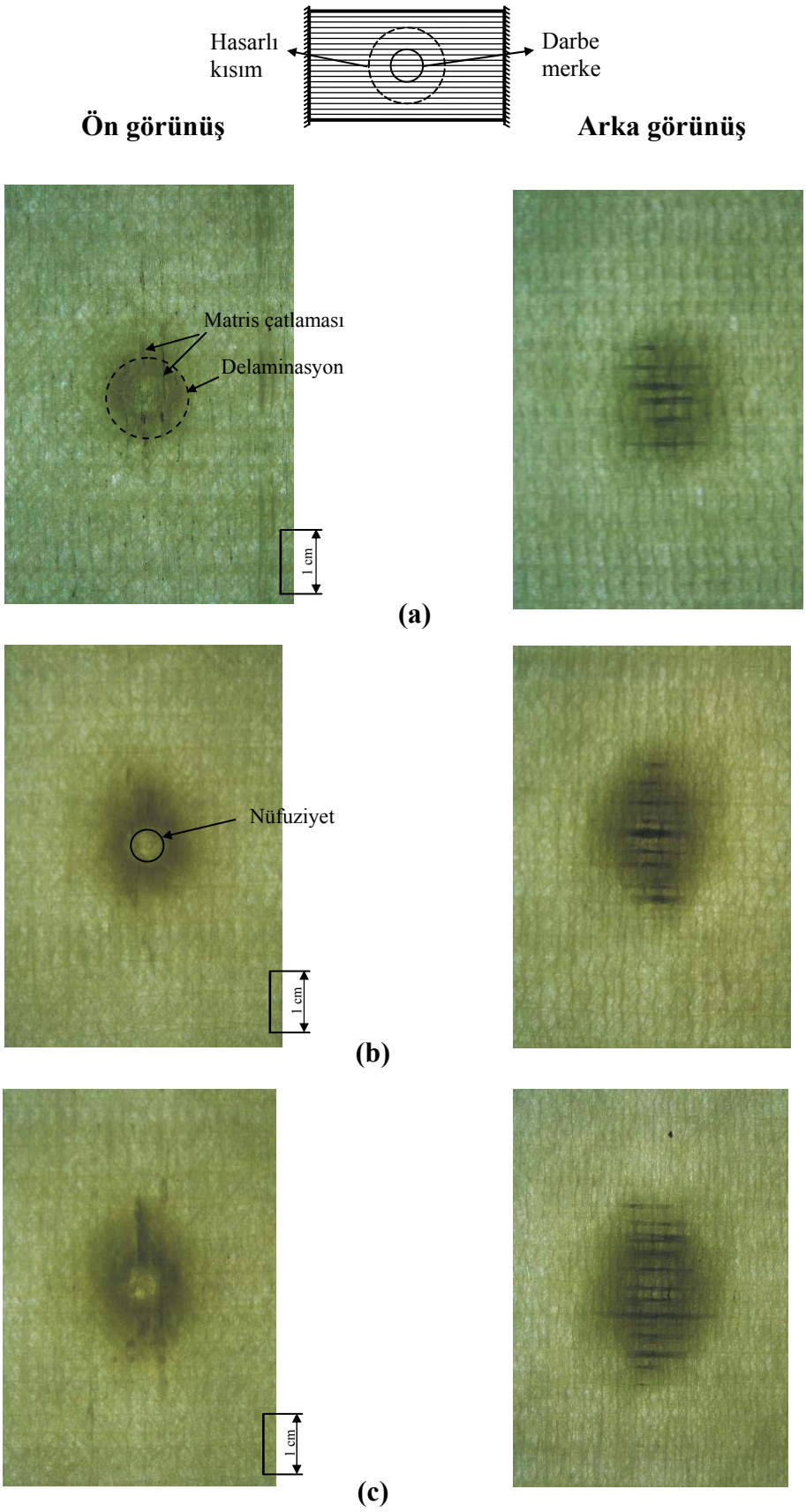
Düşük hızlı darbe yapılan bütün deney numunelerinde, darbeye maruz ön yüzeydeki hasarın arka yüzeyden daha az olduğu görülmektedir. Ön yüzeyde darbe sonucu basmadan kaynaklanan hasarlar oluşurken, arka yüzeyde çekmeden kaynaklanan hasarlar oluşmaktadır. Çekmeden kaynaklanan hasarlar daha fazladır.

180×50 mm boyutlarındaki numunelerde hasar bölgesi kenara doğru ilerlemiştir. Şekil 7.18a-c'de numunenin tam kenar boyutu görülmektedir. Bu numunelerde kalıcı eğilme şekil değiştirmesi oluşmuş ve darbe enerjisi arttıkça eğilme miktarı da artmıştır. Bu numunelerde darbe hasarına ilaveten eğilmeden kaynaklanan hasarlar oluşmuştur.

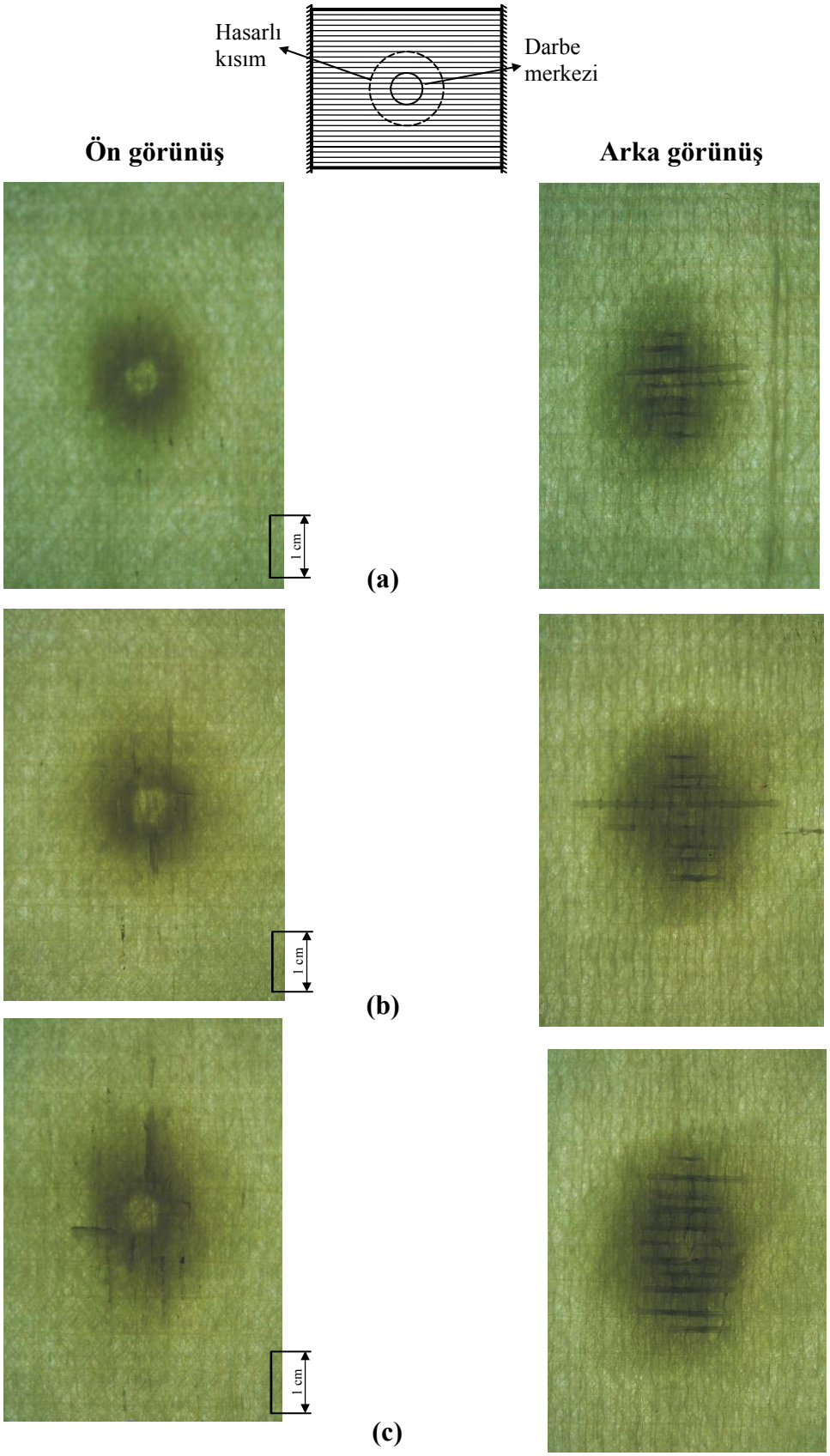
180×100 mm ve 180×150 mm boyutlarındaki numunelerde ise hasar bölgesi numune kenarına kadar ilerleyememiştir. Darbe gören yerde küçük bir bölgede kalmıştır. Daha önce numunelerin yuttuğu enerji miktarlarının eşit olduğu ifade edilmişti. Numune genişliği küçüldükçe numunenin kompliyansı artmaktadır. 180×100 mm boyutlarındaki numuneler daha fazla kompliyansa sahip oldukları için elastik şekil değiştirme kabiliyetleri daha fazladır. Bu yüzden elastik şekil değiştirmeye harcadıkları enerji miktarı 180×150 mm boyutlarındaki numunelere göre artmakta, hasarlanmaya harcadıkları enerji miktarı ise azalmaktadır. Buna bağlı olarak ta 180×150 mm boyutlarındaki numunelerde 180×100 mm boyutlarındaki numunelere göre, aynı darbe hızlarında daha fazla hasar meydana gelmiştir.



Şekil 7.18 Düşük hızlı darbe yapılmış 180×50 mm test numunelerinde (a) 2.0 m/s, (b) 2.5 m/s ve (c) 3.0 m/s çarpma hızlarında ön ve arka hasar bölgeleri

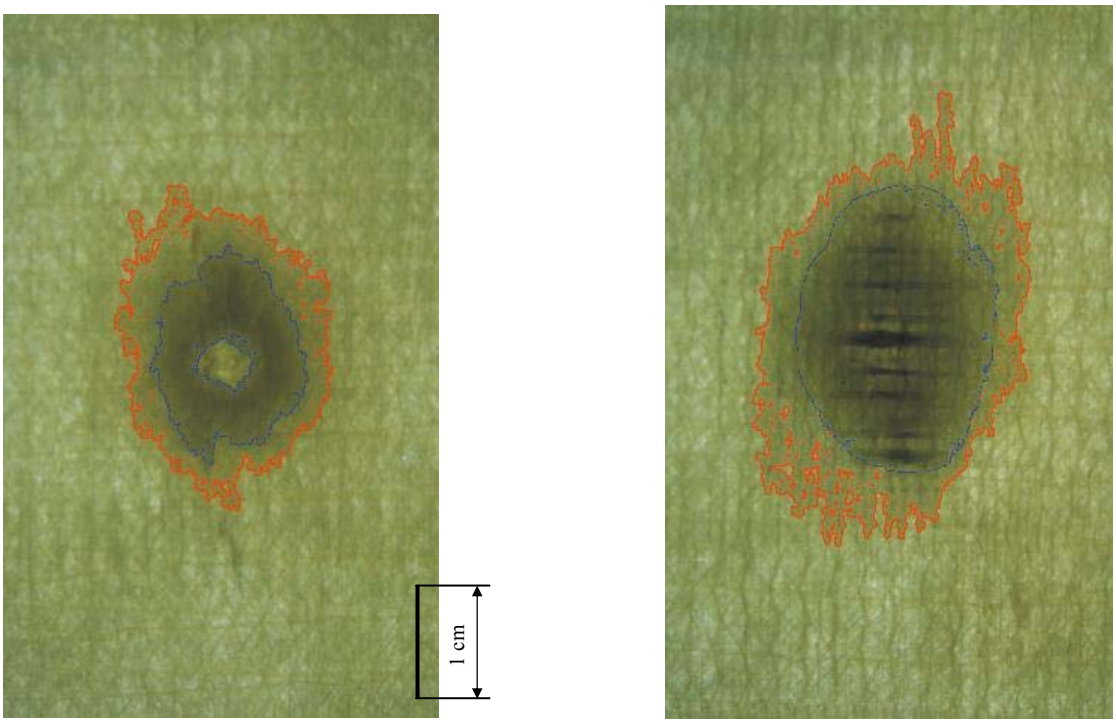


Şekil 7.19 Düşük hızlı darbe yapılmış 180×100 mm test numunelerinde (a) 2.0 m/s, (b) 2.5 m/s ve (c) 3.0 m/s çarpma hızlarında ön ve arka hasar bölgeleri



Şekil 7.20 Düşük hızlı darbe yapılmış 180×150 mm test numunelerinde (a) 2.0 m/s, (b) 2.5 m/s ve (c) 3.0 m/s çarpma hızlarında ön ve arka hasar bölgeleri

Hasar bölgelerinde oluşan hasar modlarının belirlenebilmesi amacıyla yüksek çözünürlükteki hasarlı yüzey fotoğraflarından Adobe Photoshop programı yardımı ile değişik renklerdeki bölgeler tespit edildi. Farklı bölgelerin iyice belirlenebilmesi için renk farkı olan bölgeler arasına çizgiler çizildi. Şekil 7.21' de 2.5 m/s çarpma hızında 180×100 mm boyutlarındaki numunenin ön ve arka tarafına ait görüntü-işlenmiş hasar bölgeleri görülmektedir.



(a) **(b)**

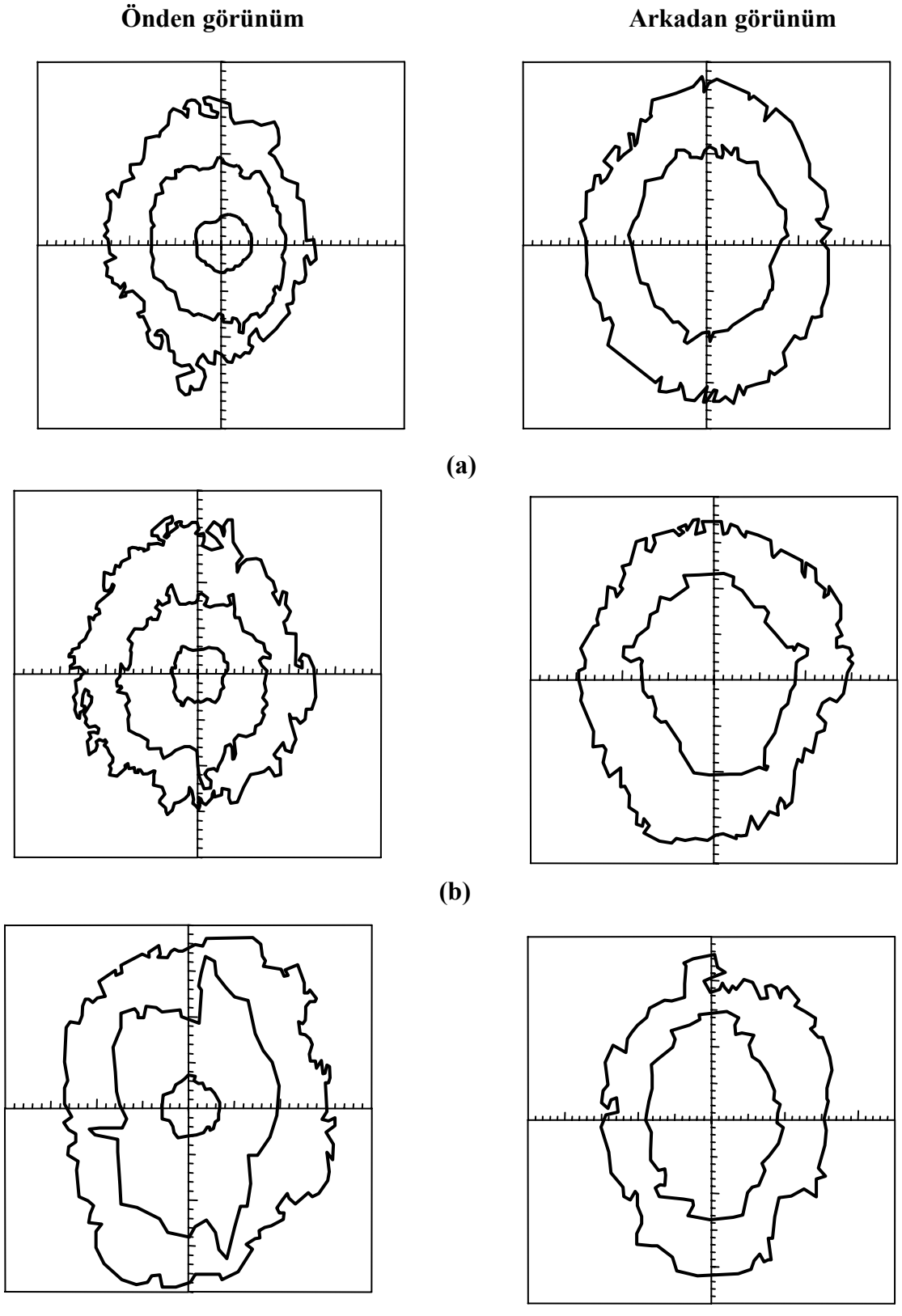
Şekil 7.21 180×100 mm boyutlarındaki deney numunesinin 2.5 m/s çarpma hızında (a)ön, (b)arka tarafına ait görüntü-işlenmiş hasar bölgeleri

Görüntü işlenmiş hasar bölgeleri resimleri ölçekli bir şekilde AutoCAD programına aktarıldı. Bu program yardımıyla hasar haritaları çıkarılarak hasar alanları tespit edildi. Şekil 7.22-23'de sırasıyla 180×150 mm, 180×100 mm ve 180×50 mm boyutlarındaki numunelerin 2.0 m/s, 2.5 m/s ve 3.0 m/s çarpma hızlarında ön ve arka tarafında gelişen hasar haritaları görülmektedir. 180×150 mm, 180×100 mm boyutlarındaki deney numunelerinin ön yüzeyinde üç ayrı hasar bölgesi görülürken arka yüzeyinde ise iki ayrı hasar bölgesi görülmektedir. 180×50

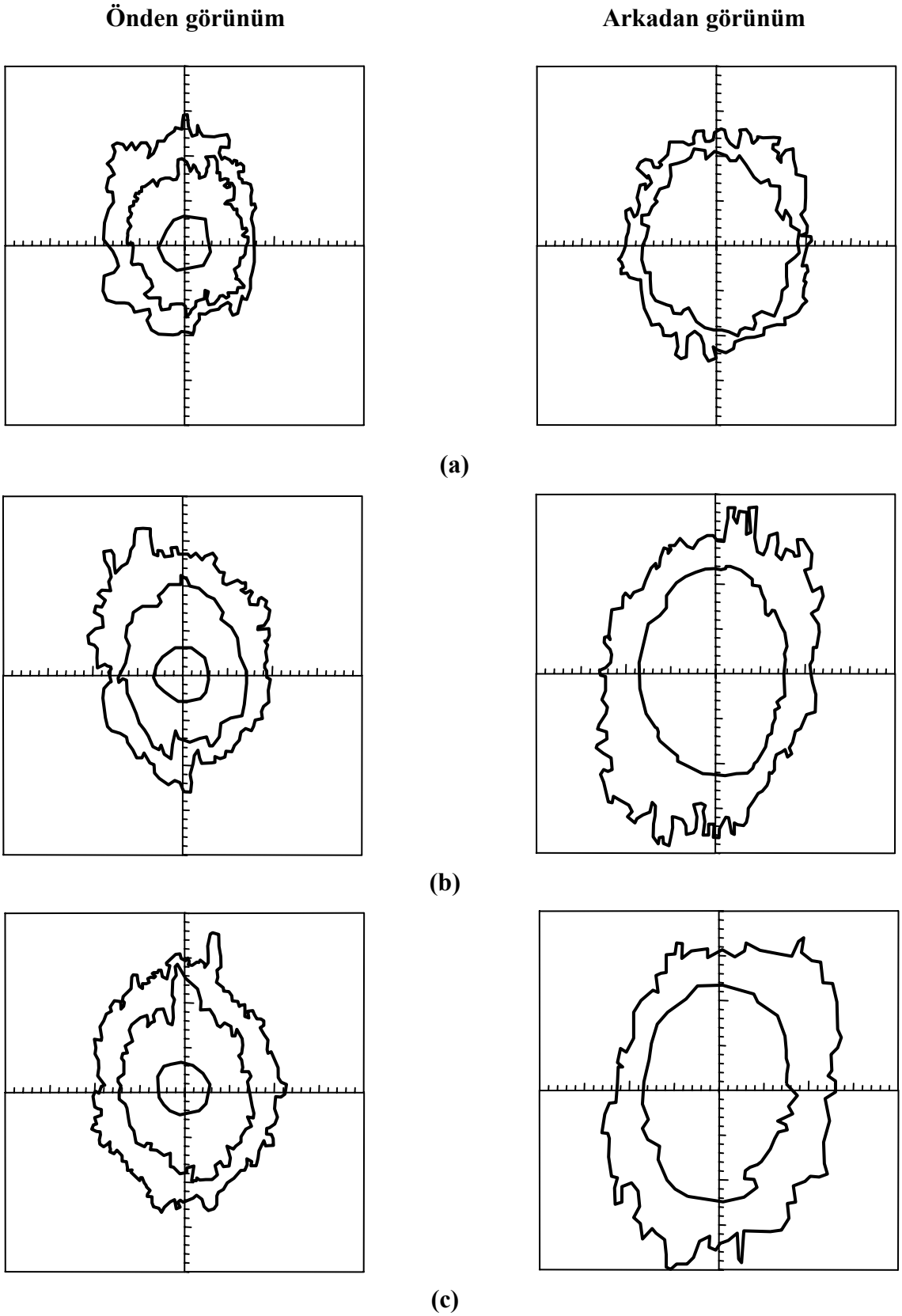
mm boyutlarındaki numunede ise darbe hasarına ilaveten eğilme hasarlanması olduğu için ön yüzeyde iki, arka yüzeyde bir hasar bölgesi meydana gelmiştir.

Deney numunelerinin ön yüzündeki ortada olan birinci bölge, vurucunun nüfuz ettiği bölgedir. Vurucunun nüfuziyeti bu bölgede matrisin ezilmesine sebep olmuştur ve elyaf sıyrılmaları gözlenmiştir. Aynı çarpma hızında her bir deney numunesi için nüfuziyet alanı yaklaşık olarak eşit çıkmıştır. Numunelerin elyaf hacim oranı V_f'nin eşit olması bunun en önemli sebebi olarak gösterilebilir. Ön yüzeydeki ikinci bölge ise tabakaların tamamında veya çoğunluğunda delaminasyonların oluştuğu bölgedir (Sugun ve Rao 2004). Bu bölgede matris çatlamaları ve elyaf matris ara yüzey ayrılmaları oluşmuştur. 180×50 mm boyutlarındaki numunede ise 3.0 m/s çarpma hızında matris çatlaması ve elyaf kopmaları gözlenmiştir. 180×150 mm, 180×100 mm boyutlarındaki deney numunelerindeki üçüncü hasar bölgesi ise en az iki veya daha fazla tabakanın delaminasyona uğradığı bölgedir (Sugun ve Rao 2004).

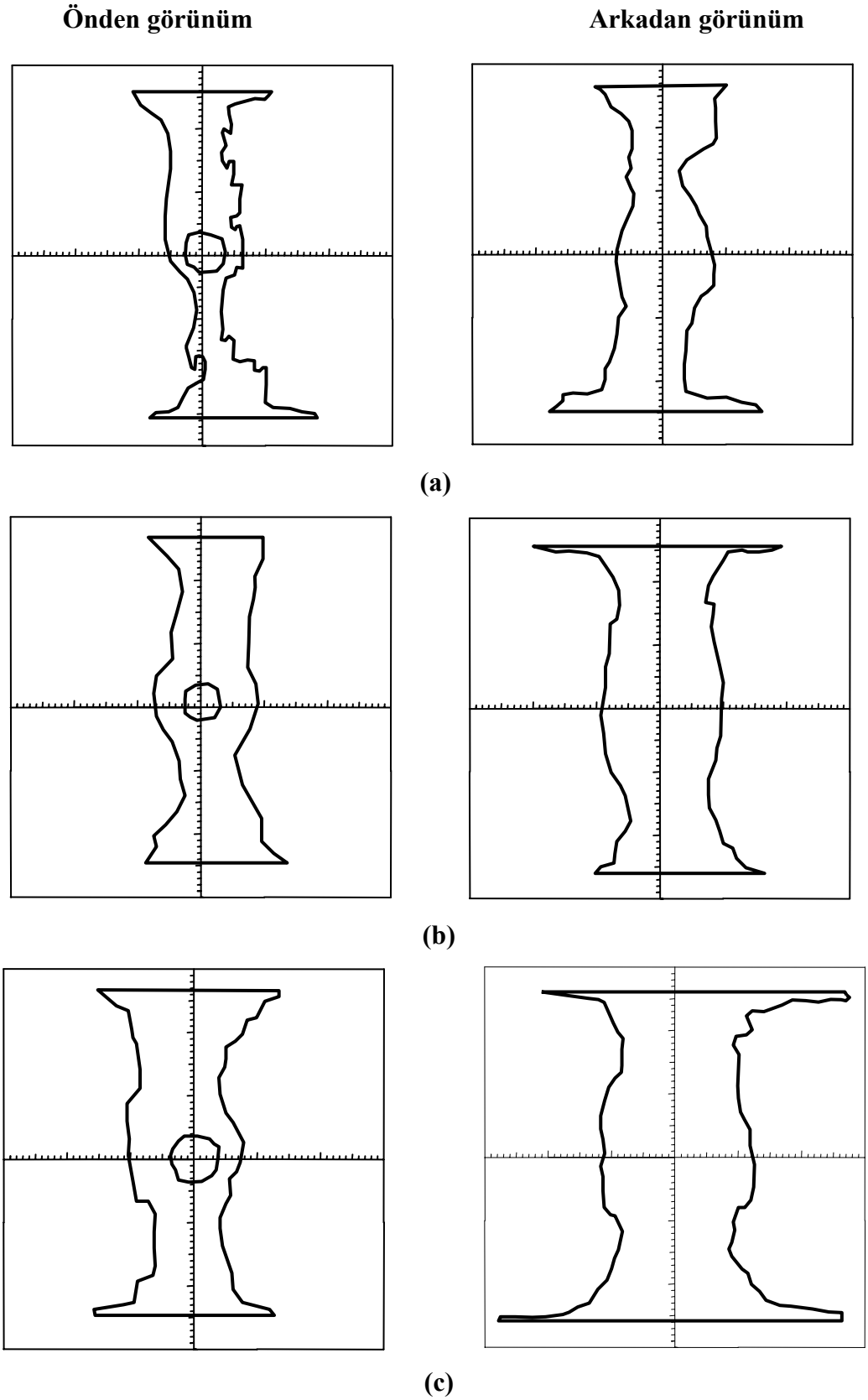
Deney numunelerinin arka yüzeyinde vurucunu nüfuziyet bölgesi görülmemektedir. Hasar alanının alt yüzeyde daha fazla olduğu hasar haritalarında da görülmektedir.



Şekil 7.22 180×150 mm boyutundaki deney numunesinin (a) 2.0 m/s, (b) 2.5 m/s, (c) 3.0 m/s çarpma hızlarında ön ve arka tarafında gelişen hasar haritaları

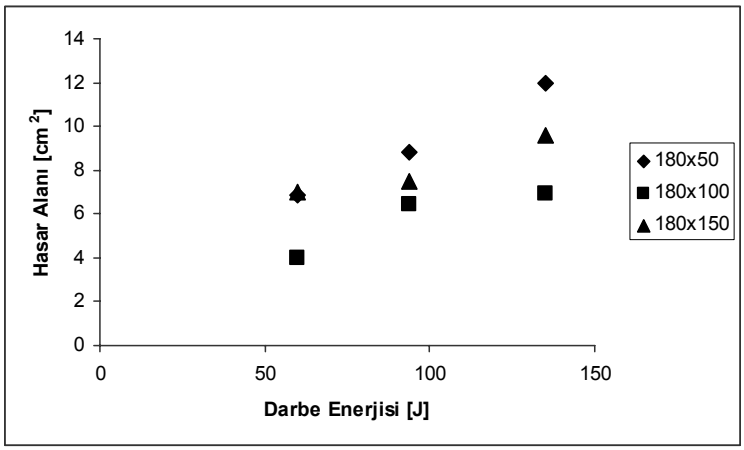


Şekil 7.23 180×100 mm boyutundaki deney numunesinin (a) 2.0 m/s, (b) 2.5 m/s, (c) 3.0 m/s çarpma hızlarında ön ve arka tarafında gelişen hasar haritaları



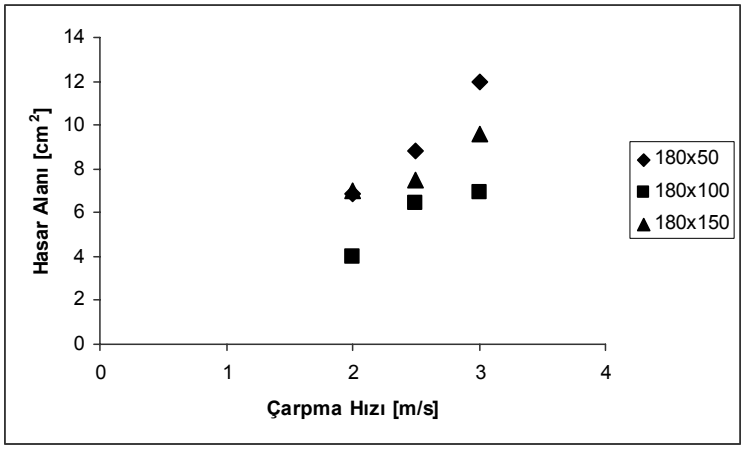
Şekil 7.24 180×50 mm boyutundaki deney numunesinin (a) 2.0 m/s, (b) 2.5 m/s, (c) 3.0 m/s çarpma hızlarında ön ve arka tarafında gelişen hasar haritaları

Değişik numunelerde darbe enerjisine bağlı olarak toplam hasar alanı Şekil 7.25'de verilmiştir. Şekildeki hasar alanı değeri tüm alanları içine alan arka yüzeydeki dış bölge hasar alanıdır. Şekilde en büyük hasar alanının 180×50mm boyutlarındaki numunede olduğu ve 180×150mm boyutlarındaki numunede meydana gelen hasarın 180×100mm boyutlarındaki numuneden daha fazla olduğu şekilde görülmektedir. Ayrıca darbe enerjisi arttıkça hasar alanının arttığı da görülmektedir.



Şekil 7.25 Değişik numunelerde darbe enerjisi-toplam hasar alanı değişimi

Şekil 7.26'de değişik numunelerde çarpma hızı-hasar alanı değişimi görülmektedir. Çarpma hızı arttıkça darbe enerjisi arttığı için hasar alanı da artmaktadır.



Şekil 7.26 Değişik numunelerde çarpma hızı-toplam hasar alanı değişimi

8. SONUÇLAR

Bu çalışmada tabakalı kompozit malzemelerin dinamik cevabını araştırmak için bir ağırlık düşürme test cihazı yapılmıştır. Bu cihaz ile; 180×50 mm, 180×100 mm, 180×150 mm boyutlarında iki tarafı serbest iki tarafı ankastre $[0°,–45°,+45°,0°,90°,0°,+45°,–45°,0°]_s$ şeklinde dizilmiş 18 tabakalı E camı/epoksi kompozit numuneler üzerine 2.0 m/s, 2.5 m/s ve 3.0 m/s çarpma hızlarında düşük hızlı darbe deneyleri yapılmıştır. Darbeler 24 mm çapında yarıküresel uçlu vurucu kullanılarak yapılmıştır. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıya çıkarılmıştır;

1. Numune boyutları (bu çalışma için özellikle numune genişliği) en büyük temas kuvvetini önemli derecede etkilemektedir. Numune genişliği arttıkça en büyük temas kuvveti de artmaktadır.

2. Aynı boyutlardaki her bir deney numunesine, farklı hızlarda yapılan darbelerde vurucunun temas süresi yaklaşık olarak eşit çıkmıştır.

3. Aynı hızlarda yapılan darbelerde deney numunesinin genişliği arttıkça temas süresi azalmış ancak en büyük temas kuvveti artmıştır.

4. Darbe enerjisi arttıkça yutulan enerjinin toplam enerjiye oranı artmaktadır.

5. 180×50 mm boyutlarındaki numunede sıçrama enerjisi 2.0 m/s çarpma hızında diğer numunelere göre daha fazla olurken 2.5 m/s ve 3.0 m/s çarpma hızlarında daha az olmuştur.

6. Darbe enerjisi arttıkça 180×50 mm boyutlarındaki numunede eğilme şekil değiştirmesi meydana gelmektedir. Buna bağlı olarak numunelerde hasar bölgesi kenara doğru ilerlemiştir. Bu numunelerde darbe hasarına ilaveten eğilmeden kaynaklanan hasarlar oluşmuştur.

7. 180×100 mm ve 180×150 mm boyutlarındaki numunelerde aynı darbe enerjisi için yutulan enerji miktarı yaklaşık olarak eşit çıkmıştır fakat 180×150 mm boyutlarındaki numunelerde 180×100 mm boyutlarındaki numunelere göre, aynı darbe hızlarında daha fazla hasar meydana gelmiştir.

8. Deney numunelerinin darbe gören yüzeyinde tespit edilen hasar alanı numunelerin arka yüzeyindekinden daha az olmaktadır.

9. 180×150 mm, 180×100 mm boyutlarındaki deney numunelerinin ön yüzeyinde üç ayrı hasar bölgesi arka yüzeyinde ise iki ayrı hasar bölgesi oluşmuştur. Ön yüzeyinde ki birinci bölge vurucunun nüfuziyet bölgesidir. İkinci bölge tabakaların tamamında veya çoğunluğunda delaminasyonların oluştuğu bölgedir. Üçüncü hasar bölgesi ise en az iki veya daha fazla tabakanın delaminasyona uğradığı bölgedir.

10. 180×50 mm boyutlarındaki numunede ise darbe hasarına ilaveten eğilme hasarlanması olduğu için ön yüzeyde iki, arka yüzeyde bir hasar bölgesi oluşmuştur.

11. Çarpma hızı arttıkça 180×50mm boyutlarındaki numunede impuls kuvveti değeri diğerlerine göre azalmıştır.

12. 180×150 mm ve 180×100 mm boyutlarındaki deney numunelerinde impuls kuvveti aynı hız değerlerinde eşit çıkmıştır.

9. KAYNAKLAR

Abatan, A., Hu, H., & Olowokere, D., (1998). Impact Resistance Modeling of Hybrid Laminated Composites. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 11, 249-260.

Abrate, S., (1998). Impact on Composite Structures. Cambridge, Cambridge University Press. 135-160.

Aslan, Z., Karakuzu, R. & Okutan, B. (2003). The Response of Laminated Composite Plates under Low-Velocity Impact Loading. Composite Structures, 59, 119-127.

Aslan, Z. & Karakuzu, R. (2002). Transient Dynamic Analysis of Laminated Composite Plate Subjected to Low-Velocity Impact. Mathematical & Computational Applications, Vol. 7, No.1, 73-82.

Baucom, J.N., & Zikry, M.A. (2005). Low Velocity Impact Damage Progression in Woven E-glass Composite Systems. Composites, 36, 658-664.

Belingardi, G., Vadori, R. (2002). Low Velocity Impact Tests of Laminate Glass-Fiber-Epoxy Matrix Composite Material Plates. International Journal of Impact Engineering, 27, 213-229.

Belingardi, G., Vadori, R. (2003). Influence of Laminate Thickness in Low Velocity Impact Behavior of Composite Material Plate. Composite Structures, 61, 27-38.

Ceyhun, V., & Turan, M. (2003). Tabakalı Kompozit Malzemelerin Darbe Davranışı. Mühendis ve Makine, 516, 35-41.

Christoforou, A.P. & Yiğit, A.S. (1996). Impact of Composite Structures-The Momentum Balance Method. Journal of Composite Materials, 30,1068-1087.

Dobyns, A.L. (1981). Analysis of Simply Supported Orthotropic Plates Subjected To Static and Dynamic Loads. AIAA Journal, 19,642-680.

Ersoy, H.Y. (2001). Kompozit Malzeme, Literatür Yayınları. İstanbul, 175-215

Gibson R.F. (1994). Principles of Composite Material Mechanics. Mc-Graw Hill. 392-393

Gong, S.W., & Lam, K.Y. (1999). Transient Response of Stiffened Composite Plates Subjected to Low Velocity Impact. Composites, Part B, 30, 473-484

Goo, N.S. & Kim, S.J. (1997). Dynamic Contact Analysis of Laminated Composite Plates under Low Velocity Impact. AIAA Journal, 35, 1518-1521.

Husseinzadeh, R., Shokrieh, M.M. & Lessard, L. (2006) Damage Behavior of Fiber Reinforced Composite Plates Subjected to Drop Weight Impacts. Composite Science and Technology, 66, 61-68.

Kayrak, M.A. (1999) Havacılık Kompozitleri ve Mukavemet-Maliyet Analizleri, Anadolu Üniversitesi Yayınları, Eskişehir, 1-10.

Kim, J.K. & Kang, K.W. (2001) An Analysis of Impact Force in Plain-weave Glass-epoxy Composite Plates Subjected to Transverse Impact. Composite Science and Technology, 61, 135-143.

Lal, K.M. (1982) . Prediction of Residual Tensile Strength of Transversely Impacted Composite Laminates. Structure Solid Mech. NASA CP-2245, pp.97-111.

Lal, K.M. (1983). Low Velocity Transverse Impact Behavior of 8-Ply Graphite-Epoxy Laminates. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2, 216-225.

Lee, L.J., Huang, K.Y., & Fann, Y.J. (1993) Dynamic Responses of Composite Sandwich Plate Impacted By Rigid Ball. Journal of Composite Materials, 27, 1238-1256

Lee, Y.S. , Kang, K.H., & Park, O. (1997). Response of Hybrid Laminated Composite Plates under Low Velocity Impact. Computers & Structures, 65, 965-974.

Lifshitz, J.M. (1976). Impact Strength of Angle Ply Fiber Reinforced Materials. Journal of Composite Materials, 10, 92-101.

Mili, F., & Necip, B. (2001). Impact Behavior of Cross-Ply Laminated Composite Plates under Low Velocities. Composite Structures. 51, 237-224

Mitrevski, T., Marshall, I.H., Thomson, R., Jones, R. Whittingham, B. (2004) The Effect of Impactor Shape on the Impact Response of Composite Laminates. Composite Structures, 67, 139-148

Prasad, C.B., Ambur, D.R., & Starnes, J.H.Jr. (1994). Response of Laminated Composite Plates to Low Speed Impact By Different Impactors. AIAA Journal, 32, 1270-1277.

Ramkumar, R.L., & Chen, P.C. (1982). Low Velocity Impact Response of Laminated Plates. AIAA Journal, 21, 1448-1452.

Rotem, A., & Lifshitz, J.M. (1971). Longitudinal Strength Of Unidirectional Fibrous Composite Under High Rate Of Loading. Proc. 26th Annual Tech. Conf. Soc. Plastics Industry Reinforced Plastics, Composites Division, Washington, DC, Section 10-G: pp. 1-10.

Sankar, B.V. (1992). Scaling Of Low Velocity Impact for Symmetric Composite Laminates. Journal of Reinforced Plastics Composites, 11, 297-305.

Sierakowski, R.L., Nevil, G.E., Ross, A., & Jones, E.R. (1971). Dynamic Compressive Strength and Failure of Steel Reinforced Epoxy Composites. Journal of Composite Materials. 5, 362-377

Sierakowski, R.L., & Chaturvedi, S.K. (1997). Dynamic Loading and Characterization of Fiber-Reinforced Composites. New York, Wiley.

Sugun, B.S., & Rao, R.M.V.G.K. (2004) Low Velocity Impact of Glass, Carbon and Kevlar Composites Using Repeated Drop Tests. . Journal of Reinforced Plastics and Composites. Vol.23,No.15, 1583-1599.

Sun, C.T., & Chattopadhyay, S. (1975). Dynamic Response of Anisotropic Laminated Plates under Initial Stress to Impact of a Mass. ASME Journal of Mechanics. 42, 693-698.

Stronge, W.J. (2000). Impact Mechanics. Cambridge, Cambridge University Press. 1-26.

Şahin, Y., Kompozit Malzemelere Giriş, Gazi Kitabevi, Ankara, (2000).

Wang, H., & Vukhanh, T.. (1994). Damage Extension in Carbon Fiber/PEEK Cross Ply Laminates under Low-Velocity Impact. Journal of Composite Materials. 28,684-704.

Whittingham, B., Marshall, I.H., Mitrevski, T., Jones, R. (2004) The Response of Composite Structures with Pre-Stress Subject to Low Velocity Impact Damage. Composite Structures, 66, 685-698

Whitney, J.M., & Pagano, N.J. (1970). Shear Deformation in Heterogeneous Anisotropic Plates. Journal of Applied Mechanics, 37, 1026-1031.