T.C
SELÇUK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

RİJİT BİR ZEMİN ÜZERİNDEKİ TABAKALI KOMPOZİT LEVHANIN DÜŞÜK HIZLI DARBE HASARI

İlhan Veli AKCEYLAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
KONYA 2009

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

RİJİT BİR ZEMİN ÜZERİNDEKİ TABAKALI KOMPOZİT LEVHANIN DÜŞÜK HIZLI DARBE HASARI

İlhan Veli AKCEYLAN

Selçuk Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Mesut UYANER
2009 90 Sayfa
Jüri: Prof. Dr. Ahmet AVCI Prof. Dr. Ahmet AKDEMİR

Bu çalışmada E-Camı/epoksi tabakalı kompozitlerin düşük hızlı darbe cevabı araştırılmıştır. Numuneler rijit bir zemin üzerinde serbestçe bulunmaktadır. Ağırlık düşürme test cihazı kullanılarak 24 mm çaplı yarı-küresel uca sahip vurucu ile numune üzerine düşük hızlı darbe yapılmıştır. Çarpma hızları 2.0, 2.5 ve 3.0 m/s olarak seçilmiştir. Vurucu kütlesi 30 kg'dır. 180×50mm, 180×100mm, 180×150mm boyutlarında 7mm kalınlığında 18 tabakalı deney numuneleri kullanılmıştır. Deneylerden elde edilen kuvvet-zaman değişimleri incelenmiştir. Ayrıca her bir vurucunun numune üzerinde oluşturduğu hasar alanları değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Düşük hızlı darbe, rijit zemin, kompozit levha

ABSTRACT

Master of Science Thesis

LOW-VELOCITY IMPACT DAMAGE OF A LAMINATED COMPOSITE PLATE RESTED ON A RIGID FOUNDATION

İlhan Veli AKCEYLAN

Selcuk University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Assist.Prof.Dr. Mesut UYANER

2009 90 Pages

Jury: Prof. Dr. Ahmet AVCI Prof. Dr. Ahmet AKDEMİR

In this work, low velocity impact response of E glass/epoxy laminated composite is studied. Samples rest on a rigid foundation freely. Semi-spherical steel nose in 24 mm diameter was impacted on the samples by using drop weight test machine. Impactor mass was 30 kg. Strike velocities were chosen as 2.0, 2.5 and 3.0 m/s. 18 plies specimens were a 180×50mm, 180×100mm, 180×150mm in dimensions and 7 mm thickness. Force-time histories obtained from experiment were investigated. Damage zones were also evaluated.

Keywords: Low velocity impact, rigid foundation, composite

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın tamamlanmasında maddi ve manevi her türlü desteği sağlayan tez danışmanım Sayın Yrd. Doç. Dr. Mesut UYANER'E minnet ve şükranlarımı sunarım.

Deneysel çalışmaların yapılmasında bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım Öğr. Gör. Memduh KARA'ya deneylerin gerçekleştirilmesi, verilerin değerlendirilmesi ve tez yazımı konularında yardımlarından dolayı teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET i
ABSTRACT ii
TEŞEKKÜR iii
İÇİNDEKİLER iv
SEMBOLLER VE KISALTMALAR vi
1. GİRİŞ 1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI 3
3. KOMPOZİT MALZEMELER 5
3.1. Kompozit Malzemelerin Genel Özellikleri 5
3.2. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması 6
3.2.1 Takviye Elemanına Göre Sınıflandırma 6
3.2.2 Matriks Malzemesine Göre Sınıflandırma 6
3.3 Tabakalı Kompozit Malzemeler 10
3.3.1. Metal tabakalı kompozit malzemeler 11
3.3.2 Polimer esaslı tabakalı kompozit malzemeler 12
3.3.3 Tabakalı lifli kompozit malzemeler 12
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 16
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 23
4.6.3. Normal Temas Kuvvetinin İşi 27
4.7. Düşük Hızlı Darbenin Kinetik Analizi 27
4.7.1. Darbe başlangıç şartları 28
4.7.2. İvme Değişiminin Elde Edilmesi 29

4.7.3. Düşük hızlı darbe neticesinde deney numunesi tarafından yutulan enerjinin bulunması 31
4.8. Serbest düşme hareketi 32
4.9. Darbe enerjisi 33
5. TABAKALI KOMPOZİT MALZEMELERİN DARBE DAVRANIŞI 34
5.1 Düşük Hızlı Darbenin Belirlenmesi 35
5.2 Enine Darbe 36
5.3 Darbe Testleri 37
5.4. Tabakalı Kompozit Malzemede Darbe Sonucu Oluşan Hasar Modları 40
5.4.1. Matris Hasarı 41
5.4.2. Delaminasyon 42
5.4.3. Elyaf Kopması 43
5.4.4. Nüfuziyet 43
6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR 44
6.1 Deney Numunesinin Hazırlanması 44
6.1.1. Ağırlık Düşürme Test Cihazı 46
6.1.2. Vurucu Durdurma Mekanizması 50
6.1.3. Vurucu Geometrisi ve Kuvvet Algılayıcı 50
6.1.4. Elektronik Kontrol Ünitesi 51
6.2. Deneyin Yapılması 53
6.3. Kalibrasyon 53
7. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME 55
7.1. Vurucu ile Deney Numunesi Arasındaki Temas Kuvvetleri 55
7.1.1. Çarpma Hızının Temas Kuvvetine Etkisi 61
7.1.2. Numune Boyutlarının Temas Kuvvetine Etkisi 63
7.2. Kinematik Analiz Neticesinde Elde Edilen Değerler 65
7.2.1. İvme – Zaman Değişimi 66
7.2.2. Hız – Zaman Değişimi 67
7.3.Düşük Hızlı Darbede Hasar Bölgeleri 68
7.4.İmpuls Kuvveti 74
8. SONUÇLAR 78
9. KAYNAKLAR 80

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

t_c : Darbe sırasında izafi hızın sıfır olduğu an

W_n : Darbe esnasında yapılan iş (numunede yutulan enerji)

Π : Potansiyel enerji (darbe enerjisi)

W_f : Elyafın ağırlığı

W_c : Kompozitin ağırlığı

ρ_f : Elyafın yoğunluğu

ρ_c : Kompozitin yoğunluğu

V_f : Elyaf–hacim oranı

1. GİRİŞ

Dünyada, artan insan ihtiyacını karşılamak amacıyla birçok yenilikler ve gelişmeler olmaktadır. Hemen hemen her alanda meydana gelen bu teknolojik gelişmeler, en temel alanlardan biri olan malzeme alanında da yeni çalışmaları beraberinde getirmiştir.

Gelişen teknolojiyle beraber tabiatta bulunan malzemelerin mevcut özellikleri yetersiz kalmış, malzeme özelliklerin geliştirilmesi gerekmiştir. Mevcut malzemelere oranla daha ekonomik, daha mukavemetli, hafif, ergonomik, imalatı kolay malzeme türleri için yapılan çalışmalar hızla artmaktadır. Böylece, değişik özelliklere sahip mevcut malzemeleri fiziksel yöntemlerle birleştirerek oluşturulan kompozit malzemeler büyük önem kazanmıştır.

Kompozit malzemeler, birçok mühendislik alanında kullanılır ve yabancı cisimler tarafından darbeye maruz kalabilirler. Darbeden kaynaklanan hasar, üretim, bakım ve servis işlemleri sırasında ortaya çıkabilir. Hareket eden bir arca çarpan taş vb. cisimler, bakım sırasında cismin üzerine anahtar vb düşmesi gibi durumlar malzemede darbe etkisi yaparak hasar oluşumuna neden olarak malzemenin mukavemetini düşürebilir.

Uygulama yerine ve kullanım amacına göre malzemenin maruz kalabileceği darbeler çok farklı şekillerde olabilir. Genel olarak darbeler, düşük hızlı ve yüksek hızlı olarak sınıflandırılırlar. Ancak bu zamana kadar ki çalışmalarda düşük hızlı darbe ile yüksek hızlı darbe arasında açık bir geçiş ortaya konulamamıştır. Ancak bazı çalışmalarda düşük hızlı darbenin hedefin rijitliğine, malzeme özelliklerine, çarpan cismin kütle ve rijitliğine bağlı olarak 1-10 m/s arasındaki hızlar arasında olabileceğini ifade etmektedir.

Darbe karşısında malzemenin davranışı da malzemeden malzemeye farklılıklar göstermektedir. Örneğin metallerde ve metal alaşımlarda hasar, darbeye maruz kalan yüzeyde meydana gelirken, kompozit malzemelerde ise çarpmanın türüne göre darbeye maruz kalmayan bölgelerde ve içyapıda da hasar meydana gelebilmektedir. Metallarde darbe cevabı, plastik şekil değiştirme sonucunda bir

kopma veya kırılma şeklinde olmasına rağmen, kompozitler çok değişik modlarda hasara uğrayabilirler.

Kompozit malzemeler matriks malzemesinin değişik şekillerde takviye edilmesi ile oluşturulurlar. Yaygın kullanılan yöntemlerden biri de malzemeyi ince tabaka olarak üretip, istenilen kalınlık ve mukavemet değerini sağlayacak şekilde tabakalandırmaktır. Malzemelerin darbe karşısında verdikleri cevaplar arasında farklılık olduğu gibi değişik yöntemlerle üretilmiş kompozit malzemelerin darbe davranışı arasında da farklılıklar olabilmektedir.

Darbe testi yapmak için birçok yöntem kullanılmaktadır. Ancak kompozit malzemelerin darbe davranışını tespit edebilmek için standart bir test yöntemi yoktur. Bu durum, farklı kaynaklardan alınan farklı yöntemlerle yapılan çalışmaların sonuçlarının karşılaştırılmasında zorluklara sebep olmaktadır. Fakat günümüzde çeşitli şekillerde geliştirilen test cihazları yaygın olarak kullanılmaktadır.

Bu çalışmada, tabakalı kompozit malzemenin dışarıdan gelecek darbeye karşı cevabının ve ne tür bir tepki vereceğinin belirlenmesi hedeflenmiştir. Çünkü mekanik uygulamalarda malzemelerin maruz kalacakları darbe kuvvetlerine karşı beklenmedik davranışların ortaya çıkmaması, malzemenin nasıl davranacağının ve oluşacak hasarın ne tür etkilerinin olacağının belirlenmesi, malzemenin kullanılacağı mühendislik uygulamalarında önceden fikir edinebilmek için gereklidir.

Bu çalışmada Selçuk Üniversitesi Kadınhanı Faik İçil Meslek Yüksek Okulu laboratuarında bulunan ağırlık düşürme test cihazı kullanılmıştır.

Darbe davranışı ile ilgili özellikleri tespit edilmek üzere İZOREEL, İzmir firması tarafından bu çalışma için özel olarak üretilen E camı /epoksi bileşimiyle üretilen ve $[0,-45,45,0,90,0,45,-45,0]_s$ şeklinde açısal elyaf dizilimine sahip 18 tabakalı kompozit malzeme kullanılmıştır.

Test cihazında darbe esnasında numune üzerine etkiyen temas kuvveti kuvars sensör tarafından ölçülerek bilgisayara aktarılmış ve elde edilen kuvvet-zaman değişiminden de hız- zaman, yer değiştirme- zaman, kuvvet- yer değiştirme grafikleri çıkarılmıştır. Bu grafiklerden numune tarafından yutulan enerji değeri tespit edilmiştir. Numunede oluşan hasar durumu incelenmiş, hasar modları ve miktarı 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:

Lee ve Soutis (2004) kompozit tabakalarda darbe hasarını incelemişlerdir. Deneysel sonuçlarla teorik sonuçlar ve sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan analizden elde ettikleri sonuçları mukayese etmişlerdir.

Elder ve ark. (2004) kendi geliştirdikleri model üzerinden düşük hızlı darbe altındaki malzemede teorik olarak sonlu elemanlar metodunu kullanarak deleminasyonları (tabakalar arası ayrışma) incelemişlerdir.

Takeda ve ark. (2005) kare kesitli numunede sadece iki farklı açı kullanarak dizilmiş olan cam elyaf takviyeli kompozit malzemenin düşük hızlı darbe sonucu hasar durumunu ve delaminasyon olayını deneysel olarak incelemişlerdir.

Kim ve Chung (2005) demiryolu araçlarının duvar kısımlarında kullanılan kompozit malzemelerin darbe sonrası durumunu incelemek amacıyla karbon elyaflı kompozit malzeme üzerine düşük hızlı darbe uygulayarak hasar alanı ve yutulan enerji ve hasar miktarını incelemişlerdir.

Alcock ve ark. (2006) geri dönüşümü yapılan polipropilen malzemede üretim esnasındaki sıcaklık ve basınç değişimlerinin, malzemenin darbe dayanımı üzerine olan etkisini araştırmış, elyaf takviyeli kompozitlerle mukayese etmişlerdir.

Baucom ve ark.(2005) cam elyafla dokunmuş kompozit numunelerde tekrarlı yapılan düşük hızlı darbede birikmiş hasar durumunu incelemişler, elyafların belli darbe tekrarı sonrası uğradığı hasar miktarı üzerinde çalışmışlardır.

Belingardi ve Vadori (2003) 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. Başka bir çalışmada ise (2001) değişik açısal

dizilimlere değişik kalınlıklara sahip cam elyaf- epoksi malzemelerin dairesel kesitli olarak düşük hızlı darbeye maruz kaldıktan sonra darbe enerjisi, hasar durumu hakkında değerlendirmeler yapmışlardır.

Hosur ve ark. (2005) cam elyaf, karbon elyaf ve bunların karışımlarıyla oluşturduğu hibrit kompozit malzemelerde düşük hızlı hasar durumunu incelemiştir. Ayrı ayrı yaptığı karbon veya cam elyaf takviyeli numunelerle bunların tabakalarda karışımlarıyla oluşturduğu numuneler üzerinde enerji dağılımı, kuvvet değişimi gibi sonuçlar üzerine çalışmışlar ve numune türleri arasında mukayese yapmışlardır.

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.

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. Ayrıca hasar durumunun sonlu elemanlar metoduyla bilgisayar ortamında teorik olarak da çözümleyerek deneysel sonuçlarla kıyaslamıştır.

Uyaner ve Kara (2007) Makalesinde E-camı / epoksi tabakalı kompozit levha üzerine düşük hızlı darbeyi incelemiştir. Bu çalışmada numuneler karşılıklı iki kenarı ankastre diğer kısımları serbest darbeye maruz bırakılmıştır.

Bu çalışmada kullanılan numuneler Uyaner ve Kara (2007)'nın kullandıkları ile aynıdır. Çalışmada numuneler rijit zemin üzerinde serbestçe durmaktadır. Numune geometrisi ve çarpma hızlarının en büyük temas kuvveti ve hasar alanına etkisi araştırılmıştır.

Deneyler için yeni bir deney düzeneği tasarlanıp imal edilmiştir.

3. KOMPOZİT MALZEMELER

3.1. Kompozit Malzemelerin Genel Özellikleri

Kompozit malzeme, tasarımda aranan özellikleri verebilecek daha uygun bir malzeme oluşturma için makro seviyede iki ya da daha fazla malzemenin birleştirilmesi sonucu elde edilen yeni malzemedir. Makro yapıdan kasıt malzemenin makroskobik olarak her tarafta eşit olmasıdır.

Kompozit malzemeler birden çok metalik, organik veya inorganik bileşenden oluşabilir. Bu bileşim neredeyse sınırsızdır. Yani elde etmek istediğimiz sonuç yapının özelliklerine göre aşağı yukarı istediğimiz her malzemeden bir kompozit elde edebiliriz. Ancak bu yapı içerisinde bulunacak olan destek malzemeler için bazı sınırlar vardır. Bir kompozit içerisinde bulunabilecek olan destekleyici yapılar elyaf, parçacık, pulcuk, lamine ya da dolgu olarak bulunabilir.

Kompozit malzemelerin bilinen klasik metal malzemelere göre üstün yanları malzeme kombinasyonunun sonsuz sayıda olmasıdır. Kompozitlerin bu avantajları onlara malzeme özelliklerini istenildiği gibi değiştirme imkânı tanır. Dolayısı ile yapıda var olması istenen düşük ağırlık, yüksek mukavemet, yorulma ve aşınma dayanımı, estetik görünüm, elektrikî iletkenlik, rijitlik gibi özellikler kompozit malzemelerle daha iyi elde edilebilir.

Bir kompozit malzeme bünyesinde, çekirdek olarak adlandırılan takviye elemanı ve bunun etrafını saran matriks malzemesini içermektedir. Takviye elemanı olarak değişik şekillere sahip kısa ve uzun elyaflar, parçaçıklı seramikler gibi malzemeler kullanılmaktadır. Bunların temel fonksiyonu gelen yükü taşımak ve matriksin rijitlik ve dayanımını arttırmaktır. Matriksin fonksiyonu ise elyaflara yük ve gerilim transferi sağlayabilmek için elyaf ve matriksi bir arada tutmak yanında, çoğu takviye elemanları gevrek ve kırılgan olduklarından onların yüzeylerini dış etkilere karşı korumaktır. Ayrıca plastiklik ve süneklik üstünlüğü ile elyaflarda kırılgan çatlakların yayılmasını önler. Plastik deformasyonlar ve çatlaklar varsa elyaflara paralel olarak yönlerini değiştirir

3.2. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozit malzemeler "matriks" adı verilen bir ana bileşenle, yüksek mukavemete ve yüksek elastiklik modülüne sahip olan "takviye edici" (fiber, tanecik, pulcuk vb.) olarak adlandırılan bileşenlerden oluşur. Kompozit malzemeler malzeme kombinasyonuna göre metal-organik, metal-inorganik, organik-organik, seramik-metal şeklinde sınıflandırılabileceği gibi yapısal bileşenler olarak da dört şekilde sınıflandırılabilir:

1- Metal- metal kompozit malzemeler
2- Metal-seramik kompozit malzemeler
3- Metal- plastik kompozit malzemeler
4- Seramik - plastik kompozit malzemeler

Kompozit malzemeleri genel olarak iki ana başlık altında toplamak mümkündür.

1- Takviye elemanına göre kompozit malzemeler
2- Matriks malzemesine göre kompozit malzemeler

3.2.1 Takviye Elemanına Göre Sınıflandırma

Takviye elemanına göre kompozit malzemeleri de kendi arasında üç gruba ayrılabiliriz. Bunlar şu şekilde sıralanabilir:

1) Elyaflı kompozitler
2) Parçacıklı kompozitler
3) Karma (hibrid) kompozitler
4) Tabakalı kompozitler

3.2.2 Matriks Malzemesine Göre Sınıflandırma

Yüksek performanslı kompozit malzeme üretimi için matriks malzemesi elyaflar arasına emdirilmeli, matriks malzemesi elyafları ıslatabilmeli, kimyasal veya belli şartlarda yapışma için bağ oluşturmalı, mümkün olan düşük basınç ve sıcaklıkta hızlı şekilde katılaşma yapabilmelidir. Bağdan ayrı olarak da üretim esnasında veya bundan sonraki işlemler sırasında matriks ve elyaflar arasında diğer etkileşimler olmamalı ve matriks zamanla kararlı kalmalıdır. Üretim sırasında matriksin kimyası

nedeniyle elyaflarda herhangi bir fiziksel hasara maruz kalmamalıdır. Kompozitin sıcaklığa, kimyasal etkileşime ve neme karşı direnci öncelikle matriks tarafından belirlenir. Ayrıca takviye elemanı da sıcaklığa karşı kararlı olmalıdır.

Yukarda belirtilenler ile birlikte bir kompozit malzemede kullanılan uygun matriks seçimi ile birçok önemli fonksiyonlar yerine getirilir. Ancak parçacık takviyeli kompozitlerde matriksin görevi sınırlı kalmaktadır. Matriks malzemesi, parçacık takviyelide parçacıkları bir arada tutarken elyaf takviyelide şu fonksiyonları yerine getirmektedir;

a) Düzenlenmiş elyafları bir arada tutarak kuvvetleri elyafa iletmektir. Bu özellikle çekme ve kayma ile birlikte basma yüklemeleri için hayati önem taşır.

b) Elyafları çevresel etkilerden ve darbelerden korumaktır. Cam elyaf takviyeli kompozitlerde kullanılan çoğu matriksler suya ve korozyona karşı çok hassastırlar. Bazı matriks malzemeler üretim sırasında elyaflarla reaksiyona girerler. Bu yüzden matriks seçimi kadar elyaf seçimi de önemlidir.

c) Çatlakları durdurmalıdır. Kullanılan elyaflar genellikle yüksek dayanım ve elastiklik modülüne sahip fakat bunun yanında çok gevrektirler. Elyaflar ayrı ayrı birim içindeymiş gibi davranırken matriks malzemesi kırılma oluncaya kadar bağımsız olarak yük taşıyıcı olarak davranır. Bu yüzden herhangi bir çatlak ani kırılmaya neden olmaz. Örnek olarak, bir elyaf kırılırsa gerilme bitişiğindeki elyafa geçmeden matrikse transfer olur. Bu nedenle matriks ve elyaf arasındaki ara yüzey bağının kompozitin tokluğu üzerinde önemli etkisi bulunmaktadır. Bu gereksinimlerin çoğunu karşılayan malzemeler ya hafif metaller ve alaşımları ya da termosetlerdir.

Matriks malzeme çeşidine göre kompozitleri 3 ana başlık altında toplayabiliriz. Bunlar;

1.Metal matriksli kompozitler.

2.Plastik matriksli kompozitler

3.Seramik kompozitler

3.2.2.2 Plastik matriksli kompozitler

Plastik doğada bulunan ve sentetik olarak üretilen tüm cinsler, ya atom gruplarından, ya da büyük moleküllerden oluşur. Bazı moleküller birbirine eklenme özellikleri gösterirler. Plastik, birbirine eklenme özelliği gösteren moleküllerin, bir düzen içerisinde sıralanarak eklenmesi ile oluşturulan organik kimyasal bir maddedir.

Sıralama düzeninde yapılacak bir değişim, bir ekleme veya çıkartma, plastiğe değişik özellikler kazandırır. Ayrıca değişik nitelikli moleküllerin bir araya gelerek sıralanması ile değişik özellikler sağlanabilir.

Günümüzde moleküller üzerinde değişiklik yapılması çok kolaylaşmış bulunmaktadır ve istenilen amaca uygun özel plastik yapılabilmektedir.

Çelik ve ahşap gibi geleneksel malzemelerin iç niteliklerini değiştirmek olanaksızdır. Bu ise ister istemez kullanımı yönlendirir, sınırlar. Bu nedenle plastik, malzeme alanında bir devrim gerçekleştirmiştir. Bilime ve endüstriye yepyeni yollar açmıştır.

Plastikleri iki ana gurupta toplayabiliriz. Termoplastikler ve termosetler.

Termoplastikler, adından da anlaşılabileceği gibi, ısı ile şekil değiştirebilen plastiklerdir. Tıpkı mumun eriyip tekrar mum haline gelebilmesinde olduğu gibi, termoplastikler de ısı ile şekil değiştirildiğinde yapısal bir değişikliğe uğramaz.

Termosetler ise bir kez ısı ile şekillendirildikten sonra ısı ile yeniden şekillendirilmeyen plastiklerdir. Tıpkı pişmiş yumurtaların tekrar çiğ yumurta haline dönüştürülememesinde olduğu gibi, termosetler de ısı ile yapısal bir değişikliğe uğrar.

Tüm plastikler bir bütün olarak ele alındığında, cam elyafı takviyeli plastik de bu bütün içinde yer almalıdır. Çünkü cam elyafı takviyeli plastik, yeni bir aşamadır. Bazı kullanımlar için amaçlanan işleve en uygun malzemeyi üretebilmek olanağı sağladığı için plastikler kompozit malzemelerde matriks olarak yaygın bir biçimde kullanılırlar.

Elyaf takviyeli kompozit malzemelerde matriks olarak kullanılan plastik reçineler termoset ve termoplastikler olarak sınıflandırılabilir.

Termosetler; küçük monomer moleküllerini uzun ve aralarında kuvvetli bağlar bulunan polimer molekülleri haline getiren kimyasal reaksiyonlar sonucunda oluşur. Bu reaksiyonların gerçekleşmesi için genellikle bir sertleştirici ve hızlandırıcı (katalizör) katılması ve bazen enerji verilmesi (ısı, mikrodalga vb.) gereklidir. Sıvı reçine önce jelleşir, daha sonra sertleşir. Kovalent üç boyutlu bağların oluşması nedeniyle termosetler oldukça rijittirler. Polimerizasyon reaksiyonu tersinir olmadığından tekrar ısıtılarak yumuşatılamazlar. Yüksek sıcaklıklarda ise kovalent bağlar kopar ve malzeme giderek kömürleşir. Polyester, epoksi reçine, fenolik reçine ve silikon gibi termoset polimerler elyaf takviyeli kompozit malzemelerde yaygın olarak kullanılan matriks malzemelerdir.

Termoplastikler ise**;** rijit bir ağ yapısına sahip değillerdir. Burada önce çizgisel molekül zincirleri oluşur, sonra bunlar birbirlerine genellikle zayıf Van Der Wals bağları ile bağlanırlar. Bir termoplastik malzeme kritik bir "camsı duruma geçiş sıcaklığının" üzerine ısıtılırsa yumuşar ve sıcaklık arttıkça plastiğin vistozitesi düşer. Bu malzemeler tekrar soğutulduklarında yeniden sertleşirler. Buharlaşma ile bileşimleri değişmediği sürece bu çevrim istenildiği kadar tekrarlanabilir. Termoplastik matriksli kompozit malzemelerin üretimi daha güçtür, çünkü termoset reçinelerin sıvı halde bulunduğu sıcaklıklarda termoplastiklerin viskozitesi hala yüksektir. Dolayısıyla matriks-elyaf bağının gerçekleştirilmesi daha zordur. Bu malzemelerin kullanım sıcaklıkları da termoset malzemelerden daha düşüktür.

Plastik matriksli kompozit malzemeler üretim masrafları düşük olduğu için yaygın olarak kullanılırlar. Düşük yoğunlukları, düşük elektrik ve ısı iletkenlikleri ile yüksek korozyon dayanımları bu malzemelerin başlıca üstünlükleridir. Plastik matriksli kompozit malzemelerde genellikle termosetler tercih edilir; ancak şekillendirme kabiliyetlerinin çok iyi olması nedeniyle elyaf takviyeli termoplastikler de giderek yaygınlaşmaktadır.

Termoplastik reçinelerin uygulamaları için yakın gelecekte çok büyük bir potansiyel vardır. Bu ilginin iki önemli sebebi vardır;

a) Epoksilere kıyasla iyileştirilmiş işlenme kabiliyeti, epoksilere karşı, temel olarak artırılmış sağlamlık ve daha düşük hassaslıktan doğan özellik iyileşmeleri.

b) Malzemelerin daha kolay depolanıp taşınması, soğutma olmaksızın belirsiz olan raf ömrü, daha kolay girdi kalite kontrolü (örn. Kalıplama bileşikleri).

Termoplastikler için tüm üretim süreci masrafları, birçok sebep yüzünden, yerini koruyan epoksininkinden daha düşük olmalıdır. Genellikle daha fazla sünek olan termoplastiklerin daha fazla sağlamlık ve darbe direncine sahip olmalarından dolayı daha az tamirat gerektirirler.

Termoplastiklerin en önemli avantajları sertleştirme işlemi gerektirmemeleri ve uzun ömürlü olmalarıdır. Bununla birlikte filaman sarım işlemi için termoplastiklerle ilgili bir metod da mevcut değildir. Termoplastik sarım için önce elyafın termoplastikle kaplanması daha sonra sarım esnasında elyaflar arasında hava boşluğu kalmayacak şekilde sıkıştırılması gerekir.

3.3 Tabakalı Kompozit Malzemeler

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 iyileşirken çekiciliği de artar.

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.

Bunun yanı sıra tabakalı kompozit malzemeleri;

1.Metal Tabakalı Kompozit Malzemeler

2.Cam Tabakalı Kompozit Malzemeler

3.Polimer Esaslı Tabakalı Kompozit Malzemeler

4.Ahşap Tabakalı Kompozit Malzemeler

5.Tabakalı Lifli Kompozit Malzemeler

olarak da beş şekilde sınıflandırılabilir.

3.3.1. Metal tabakalı kompozit malzemeler

Bimetaller farklı ısı genleşme özelliğine sahip iki metal şeritten oluşmaktadır. Ortam sıcaklığının değişmesi sonucunda, bi metali oluşturan metal tabakalar farklı oranlarda boyutsal değişiklik gösterirler. Belirli bir referans sıcaklığındaki şekli ve konumu bilinen bu kompozit malzemenin şekil değiştirme özelliğinden farklı alanlarda yararlanılmaktadır. Örneğin; termometre, termostat, termik şalter ve benzeri elemanlar bimetal malzeme kullanılarak ta üretilmektedir. Bimetaller sıcaklığın etkisiyle birbirine birleşik olan bu metallerden daha az genleşme gösteren şeridin yönüne bükülmektedir. Sıcaklığın başlangıç sıcaklığına göre artması ve azalmasıyla deformasyonun yönü değişmektedir.

Metal ve metal olmayan katmanlardan oluşan kompozitler de üretilmektedir. Bu malzemeye örnek olarak, genelde her iki yüzeyi de boyalı veya faklı bir yüzey işlemiyle korunmuş alüminyum levhaların bir polimer malzemeyle birlikte

oluşturdukları kompozit elemanlar gösterilebilir. Bunlar, yüzey kaplamada ve cephe boyası olarak da kullanılmaktadır. Ayrıca su yalıtımında kullanılan metal tabakalı bitüm kompozitleri de yine böyle bir yapıya sahiptir.

3.3.2 Polimer esaslı tabakalı kompozit malzemeler

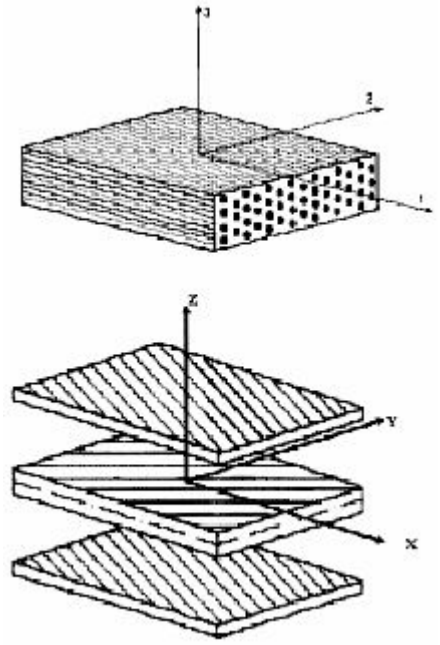
Çeşitli polimer malzeme katmanlarının bir arada kullanılmasıyla çeşitli kompozit malzemeler üretilmektedir. Cam lifi veya asbest lifi dokumalara silikon emdirilmesiyle yüksek sıcaklığa dayanıklı tabakalı kompozitler de elde edilmektedir. Ayrıca cam ve naylon elyaf dokumalar çeşitli reçinelerle tabakalar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

3.3.3 Tabakalı lifli kompozit malzemeler

Tabakalı lifli kompozit malzemelerde, liflerle donatılı kompozit malzeme tabakaları, farklı yönlerde yer alan ve böylelikle çeşitli yönlerde, kompozite farklı dayanım özellikleri kazandıran lif donatıyı da içermektedir.(Şekil 3.1) Bu tabakalar genelde, lifli kompozit malzeme tabakasının matriks malzemesi olan reçineyle veya daha farklı maddeler ve yöntemlerle özel şekillerde bir araya getirilmektedir. Tabakalı liflerle donatılı kompozit malzemeye örnek olarak, deniz tekneleri, çeşitli taşıtların kaporta bölümleri, su tankları, uçakların kanat panelleri ve gövde kısımları gösterilebilir.

Tablo 3.1 Çeşitli elyafların mekanik özellikleri

ELYAF	Yoğunluk	Çekme dayanımı	Elastisite	Isıl gen.	Kopma uzaması
TÜRÜ	g/cm^3	MPa	Modülü	Katsayısı	%
			GPa	$^oC^{-1}x10^8$	
E-camı	2,54	3448	72,2	5	2,75
S-camı	2,49	4585	85,5	2,9	-
Kuvars	2,2	3100	413,7	2,9	-
Bor	2,68	3448	413,7	3	0,7
Karbon	1,85	2000-2900	220-520	-1	0,5-1,3
Kevlar-49	1,44	2708	131	-2	2,5



Şekil 3.1 Elyaf takviyeli kompozit malzemede tabakaların farklı açılarda dizilimi

4. DARBE MEKANİĞİ

4.1. Giriş

Darbe mekaniği, 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 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.

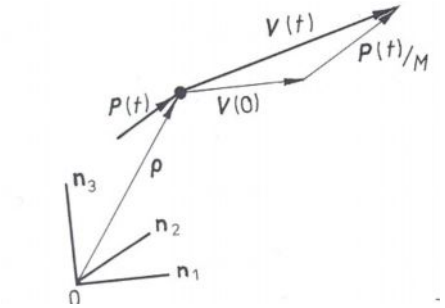
Temas süresince önemli etkin kuvvetler sadece cisimlerin temas noktalarındaki tepki kuvvetleridir. Bu tepkiler yer değiştirmenin kısıtlanmasından kaynaklanmaktadır.

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.

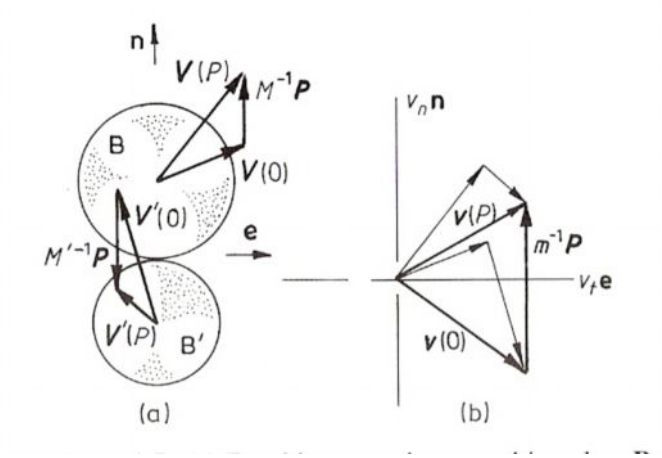
Çarpışan B ve B' parçacıklarının *t=0* zamanındaki etkileşimi karşılıklı olarak birbirlerine etki eden **F***(t)* ve **F'***(t)* etkin kuvvetlerini doğurur. Etkileşim süreci $0<t<t_f$ esnasında bu etkileşim kuvvetleri parçacıkların birbirine girmelerini önler. Etkileşim kuvvetlerinin bu özel tabiatı 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.



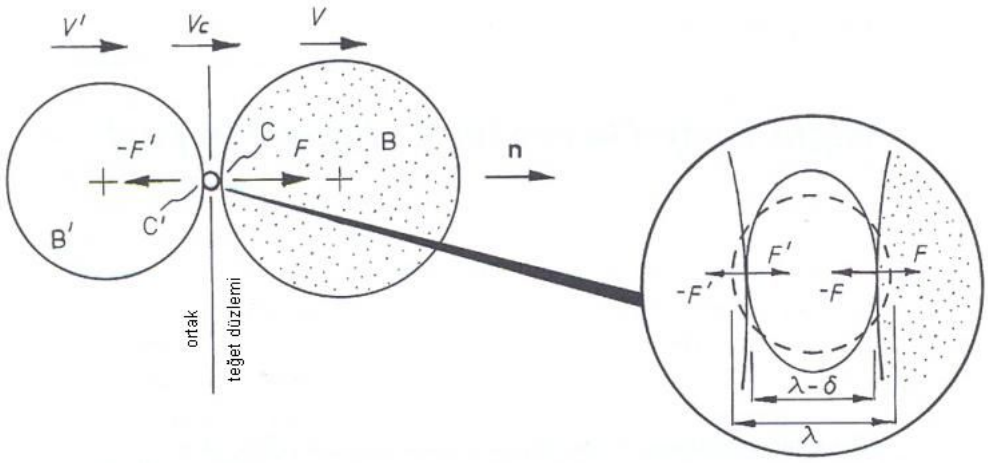
Şekil 4.2 (a) Eşit fakat zıt olan normal **P** impulsları çarpışan M ve M' kütleli iki cisimde sırasıyla M^{-1}.**P** ve M'^{-1}.**P** kadar hız değişimine sebep olur. **(b)** Kalın çizgiler başlangıç izafi hız **v**(0), son izafi hız **v**(P) ve izafi hızdaki değişim m^{-1}**P** yi gösteriyorken ince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

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

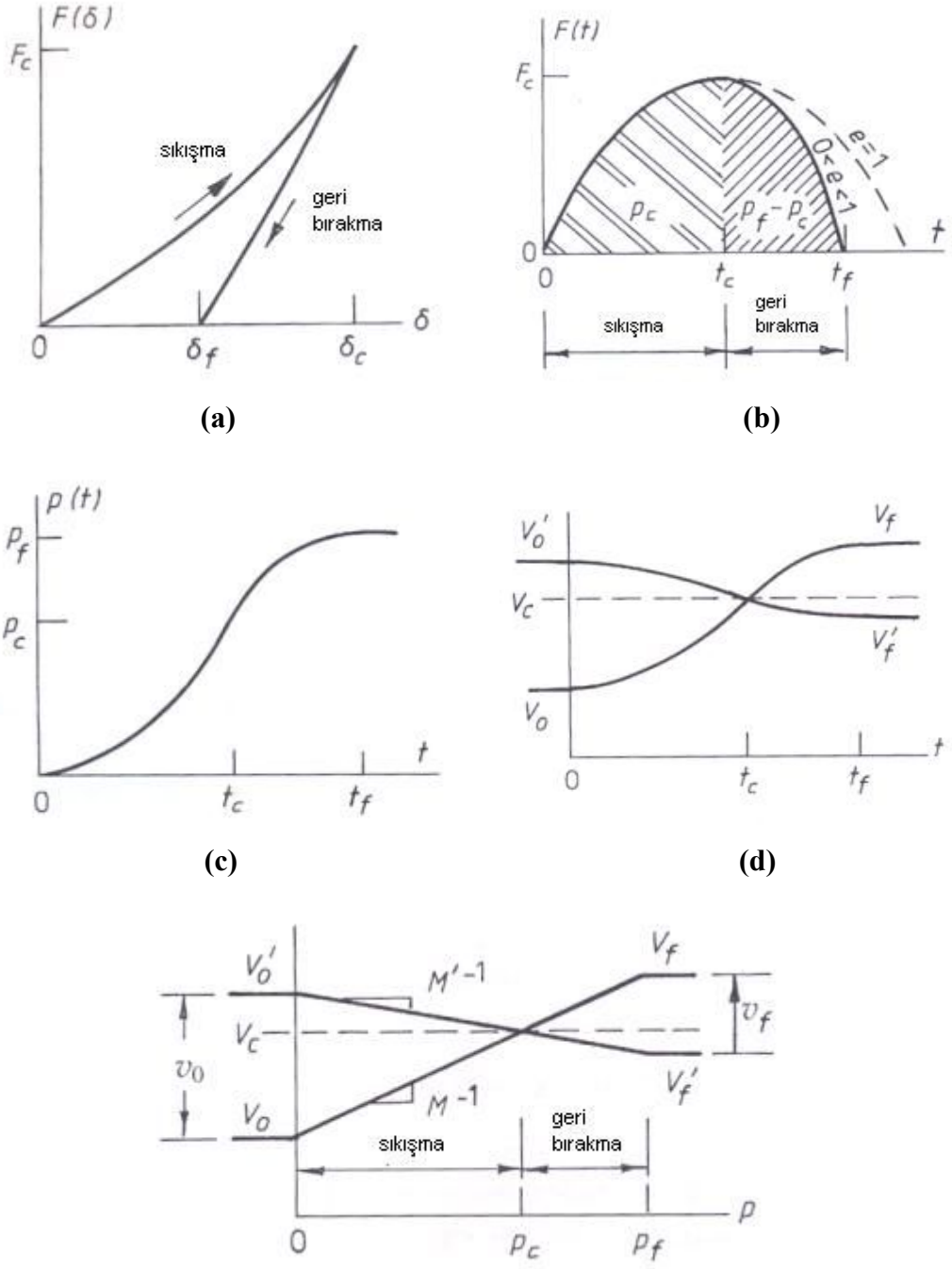
Böylece çarpışma süresince izafi hızın normal bileşeni, normal impulsun doğrusal bir fonksiyonudur.

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.



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 $\left[v(p_c) = 0\right]$ 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:

$$W_d = \int_0^t Fvdt' = \int_0^p vdp' \qquad \text{(kuvvet-hız-zaman)} \qquad (4.8)a$$

$$W_d = \frac{1}{2} m\left(v_i^2 - v_f^2\right) \qquad \text{(Kinetik enerjideki değişim ile yutulan enerji)} \qquad (4.8)b$$

$$W_d = \int_0^{s_f} F\, ds \qquad \text{(yer değiştirme-kuvvet)} \qquad (4.8)c$$

4.7. Düşük Hızlı Darbenin Kinetik Analizi

Kuvvet sensöründen alınan örnekleme verileri zamana karşılık kuvvet değerleridir. Vurucunun kütlesini bilerek Newton' un 2. kanunu yardımıyla düşen cismin ivmesi hesaplanır. İvmenin zamana göre birinci entegrali hızı ikinci entegrali ise yolu verir.

Başlangıç şartlarını yerine koyarak hareket denklemi kolaylıkla entegre edilebilir. *h* deforme olmamış numune yüzeyinden bilinen bir sabit mesafe iken zaman ekseninin orjini temasın başlangıcı olarak alınır. Yani t=0 da vurucunun koordinatı y(0)=0 dır. Vurucuyu serbest düşme yapan bir rijit cisim olarak düşündüğümüzde çarpma hızı $v_0 = \sqrt{2g\Delta h}$ ile verilir. Burada Δh referans yüzeyinden darbe verici kütlenin ağırlık merkezinden olan mesafe olarak alınır. Her an için vurucunun hızı ve sonra da koordinatı, ivme (buda kuvvet sinyalinin vurucu kütlesine bölümüne eşittir) üzerinde basitçe entegrali alınarak elde edilebilir. Kuvvetin deplasmana göre entegralini alarak sonunda test süresince enerjiler hesaplanabilir. Kinetik analiz formülleri aşağıda türetilmiştir.

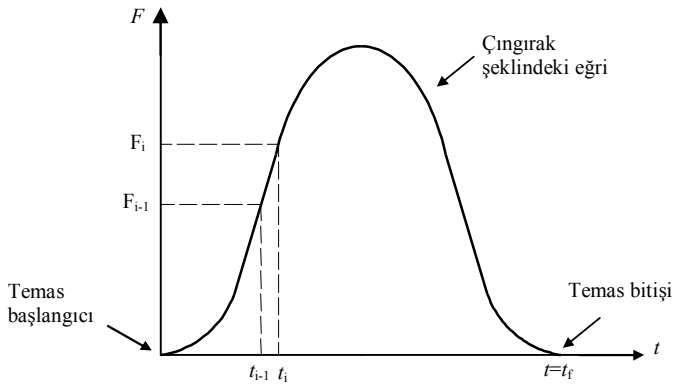
4.7.1. Darbe başlangıç şartları

F_0=0 N, a_0=0 m/s^2

m: etkin kütle=30 kg t_0=0 s

v_0= Vurucunun numuneye ilk temastaki hızı m/s

Düşük hızlı darbede zamana bağlı olarak elde edilen kuvvetin değişimi Şekil 4.5 de görüldüğü gibidir.



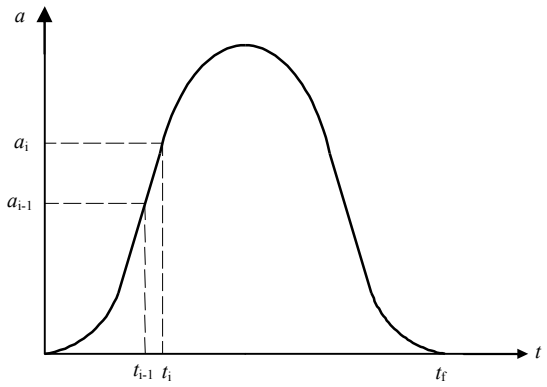
Şekil 4.5 Kuvvetin zamana göre değişimi

4.7.2. İvme Değişiminin Elde Edilmesi

Merkezi çarpışma için $t=t_i$ anındaki ivme Newton'un 2. kanunu yardımıyla hesaplanır.

$$a_i = \frac{F_i}{m} \tag{4.9}$$

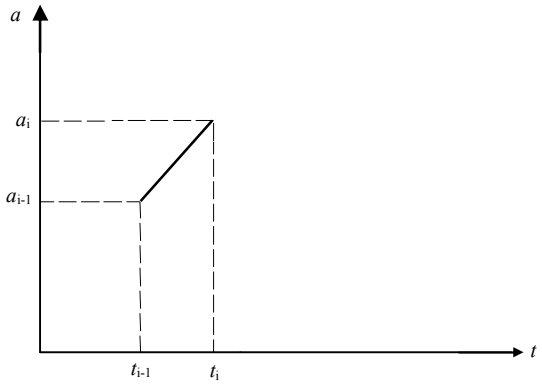
Burada F_i, t_i anında kuvvet algılayıcıdan elde edilen kuvvet değeridir. İvmenin zamana göre değişimi, kuvvet-zaman grafiğine benzer.



Şekil 4.6 İvmenin zamana göre değişimi

Şekil 4.6 dan görüleceği üzere ivme zamana en az 2. dereceden bağlıdır. Δt zaman aralığı çok küçük ($1x10^{-5}$ s).olduğundan bu değişim 1. dereceden kabul edilebilir. Deney sonuçları 1. dereceden ve 2 dereceden yaklaşımla değerlendirildiğinde elde edilen sonuçlar arasında ihmal edilecek kadar küçük farklar elde edilmiştir. Bu nedenle ifadelerin basitliği ve hesap kolaylığı açısından 1. dereceden yaklaşım ile denklemler türetilecektir.

İvmenin Δt aralığında doğrusal değişimi (1. dereceden yaklaşım)



Şekil 4.7 dereceden yaklaşımla ivme-zaman değişimi

İki noktadan bir doğru geçer. (a_{i-1} , t_{i-1}) ile (a_i , t_i) noktalarından geçen doğrunun denklemi,

$$a(t) = kt + c \tag{4.10}$$

Burada k doğrunun eğimi olup,

$$k = \frac{a_i - a_{i-1}}{t_i - t_{i-1}} \tag{4.11}$$

ve c,

$$c = \frac{t_i a_{i-1} - t_{i-1} a_i}{t_i - t_{i-1}} \tag{4.12}$$

$$a(t) = \frac{dv}{dt},\ dv = a(t)dt \tag{4.13}$$

(4.13) yardımıyla hız,

$$v = v_0 + \frac{1}{2}k(t^2 - {t_0}^2) + c(t - t_0) \tag{4.14}$$

t_{i-1} ve t_i zaman aralığı için (4.14)denklemini düzenlersek,

$$v_i = v_{i-1} + \frac{1}{2} k_i (t_i{}^2 - t_{i-1}{}^2) + c_i (t_i - t_{i-1}) \tag{4.15}$$

Şimdi de yer değiştirmeleri bulalım,

$$v = \frac{ds}{dt} \; ds = vdt \tag{4.16}$$

(4.16) denkleminde (4.14) deki *v* ifadesini yerine koyarsak

$$s = s_0 + \frac{1}{6} k(t^3 - t_0{}^3) + \frac{1}{2} c(t^2 - t_0{}^2) - (v_0 + ct_0 + \frac{1}{2} kt_0{}^2)(t - t_0) \tag{4.17}$$

t_{i-1} ve t_i zaman aralığında yer değiştirme,

$$s_i = s_{i-1} + \frac{1}{6} k_i (t_i{}^3 - t_{i-1}{}^3) + \frac{1}{2} c_i (t_i{}^2 - t_{i-1}{}^2) - (v_{i-1} + c_i t_{i-1} + \frac{1}{2} k_i t_{i-1}{}^2)(t_i - t_{i-1}) \tag{4.18}$$

Böylece N çift (F_i, t_i) kuvvet-zaman verilerinden N çift (F_i , s_i) kuvvet-yer değiştirme değerleri elde edilir.

4.7.3. Düşük hızlı darbe neticesinde deney numunesi tarafından yutulan enerjinin bulunması

Kütlenin hareket süresince değişmesi halinde Newton'un ikinci kanunu

$$F = \frac{d(mv)}{dt} \tag{4.19}$$

Burada *m.v* terimi lineer momentum *p* dir. Kütlenin sabit olması halinde (4.19) denklemi;

$$Fdt = d(mv) = mdv \tag{4.20}$$

halini alır.

$$\int_{t_1}^{t_2} Fdt = \int_{v_1}^{v_2} mdv \tag{4.21}$$

Eşitliğindeki sol tarafta bulunan entegral, kuvvet-zaman eğrisi altındaki alanı verir ve impuls kuvveti olarak isimlendirilir. İmpuls kuvveti *J* ile gösterilir.

$$J = \int_{t_1}^{t_2} \left(\frac{dp}{dt} \right) dt = p_{t_2} - p_{t_1} = p_{final} - p_{initial} = \Delta p = m\,v \tag{4.22}$$

(4.22) den impuls kuvveti *J*'nin lineer momentumdaki değişime eşit olduğu görülür.

$$\int_{t_{01}}^{t} Fvdt = \int_{s_{01}}^{s} Fds = \int_{v}^{v} vdp = \frac{1}{2} m(v_2{}^2 - v_1{}^2) \tag{4.23}$$

(4.23) eşitliğinin sağ tarafının kinetik enerjideki değişime eşit olduğu görülmektedir. Bu da numune tarafından yutulan enerjiyi vermektedir. Eşitliğin sol tarafında ayrıca kuvvetin deplasmana göre integrali de yutulan enerjiyi verdiği görülmektedir.

4.8. 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;

$$v = v_0 - gt \tag{4.24}$$

$$v_{ort} = \frac{v_0 + v}{2} \tag{4.25}$$

$$y = -\frac{1}{2} gt^2 + v_0 t + y_0 \tag{4.26}$$

$$v^2 = v_0{}^2 - 2g(y - y_0) \tag{4.27}$$

Serbest düşmede ilk hız sıfır olduğu için;

$$v = \sqrt{2gh} \tag{4.28}$$

4.9. Darbe enerjisi

h yüksekliğinde vurucu kütlesinin sahip olduğu potansiyel enerji ise;

$$\Pi = m.g.h \tag{4.29}$$

Çizelge 4.1' de her bir çarpma hızı için Denklem (4.28) ve Denklem (4.29) 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 absorbe edebilirler. 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 matriksli kompozit malzemelerin hemen tamamı kırılgandır, bu nedenle enerjiyi sadece elastik deformasyon ve bazı hasar mekanizmaları (matriks kırılması, delaminasyon, fiber kopması v.b) sayesinde absorbe edebilirler, diğer bir değişle enerjiyi soğurmada plastik deformasyonun katkısı hemen hemen hiç yoktur. Bu anlamda hasar direnç ifadesi, bir kompozit sistemde meydana gelen darbe hasarının miktarını ifade eder.

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 nisbeten 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 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 ki bunlar statikmiş gibi düşünülebilir, hedefin rijitliğine, malzeme özelliklerine ve çarpan cismin kütle ve rijitliğine bağlı olarak 1 ila 10 m/s arasında değişen hızlar olarak değerlendirilmesi gerektiğini savunmaktadır [1,2]. 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 ve sonuç olarak daha fazla enerji elastik olarak soğurulur. Bu nedenle hedefin dinamik yapısal cevabı çok büyük bir öneme sahiptir. Yüksek hızlı darbe cevabı malzeme boyunca yayılan gerilme dalgası tarafından hâkim olunur ki bu durumda malzeme darbeye karşı cevap verebilme zamanına sahip olamaz ve çok küçük bir bölgede hasar oluşur.

Cantwell ve Morton, kompozit malzemenin darbe davranışını belirlemek için Charpy ve Izod gibi bilinen darbe deneylerini kullanmışlar ve düşük hızı 10 m/s 'ye kadar olan hızlar olarak sınıflandırmışlardır. Bununla birlikte Abrate, tabakalı kompozit malzemelerde darbe ile ilgili yapmış olduğu çalışmalarda düşük hızlı darbeleri 100 m/s den düşük hızlarda oluşan darbeler olarak belirlemiştir. Darbe

türünün, darbe hız sınırını belirleyerek tespit edilmeye çaba gösterildiği bu çalışmaların yanı sıra sınıflandırmanın darbe sonucunda meydana gelen hasara göre yapılması gerektiği görüşü de savunulmaktadır. Bu nedenle yüksek hız, delinme şeklinde meydana gelmiş fiber kopması, düşük hız ise tabakalar arası ayrılma (delaminasyon) ve matriks kırılması ile belirlenir. Davies ve Robinson düşük hızlı darbeyi kalınlık boyunca gerilme dalgasının gerilme dağılımında önemli bir rolü olmadığı bir darbe türü olduğunu belirtmekte ve yüksek hıza geçişi veren bir model önermektedir. Çarpan cismin altında dairesel bir bölge, gerilme dalgası tabaka boyunca yayılırken düzgün bir şekil değişikliğine uğrar. Sıkıştırma şekil değiştirmesi olarak aşağıdaki eşitlik kullanılır:

$$\varepsilon_c = \frac{\text{Çarpma hız}}{\text{malzeme içindeki ses hzı}}$$

Bu değer %0.5 ila 1 arasındaki kopma uzamaları için, epoksi kompozitler durumunda 10–20 m/s hızda gerilme dalgasının baskın olduğu duruma geçişi verir.

5.2 Enine Darbe

Kompozit malzemelerin en hassas oldukları yükleme durumu düzlem dışına doğru (tabaka veya fibere dik yükleme) olandır. Çünkü; malzeme 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 yapısal konfigürasyona da bağlıdır. Ayrıca, darbeye verilen cevap çarpan cismin geometrisine, hızına ve kütlesine de bağlıdır. Her biri enine darbenin toplam etkisini karakterize etmede 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, matriks kırılması, delaminasyon ve/veya fiber kırılması şeklinde hasarlara sebep olabilirler. Bu, mukavemette önemli derecede bir düşüşe

sebep olur. Rijitlikte azalma da mümkündür. Yüksek hızlı çarpmada malzeme üzerinde oluşan hasar, çarpışma temas bölgesindeki küçük bir bölgede yoğunlaşır.

5.3 Darbe Testleri

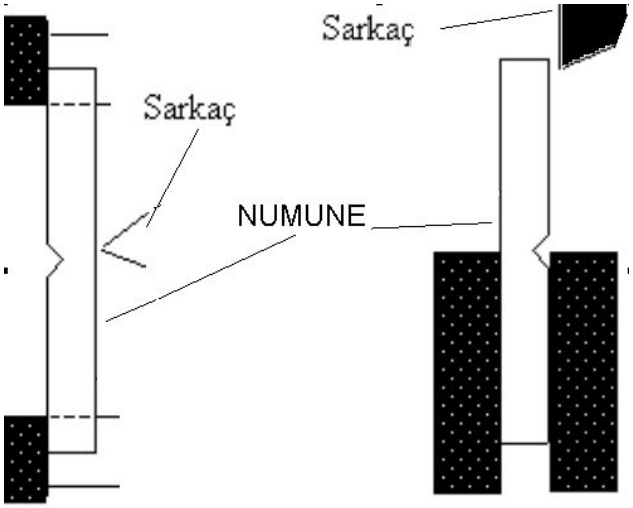
Tabakalı kompozit malzemelerin darbe direncinin, bir cismin kompozit malzemenin enine doğrultusundaki darbesini simule eden testlerle karakterize edilebileceği açıktır. Birçok test tekniği darbe üretmek için kullanılırlar. Bununla birlikte kompozit malzemelerin darbe davranışını karakterize etmek için 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 sonuçların karşılaştırılacağı zaman, kompozit malzemelerin darbe cevabı için uygun bir model geliştirme girişimleri için problem oluşturmaktadır. Bu olumsuzluklara rağmen kompozit malzemelerin darbe dirençlerinin belirlenmesi amacıyla günümüzde aşağıdaki test yöntem ve cihazları yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunlar genellikle üç kategoride sınıflandırılabilirler;

1. Sarkaç testleri (Izod ve Charpy),

2. Hava veya gaz silah testleri (düşük hız veya balistik testler).

3. Ağırlık düşürme testleri,

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

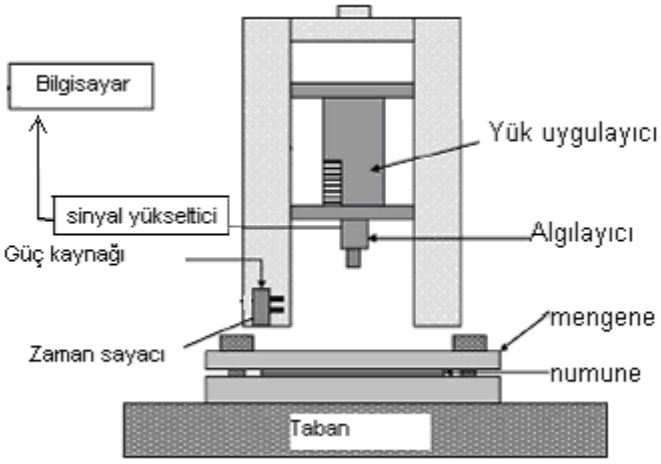


a) Charpy b) Izod

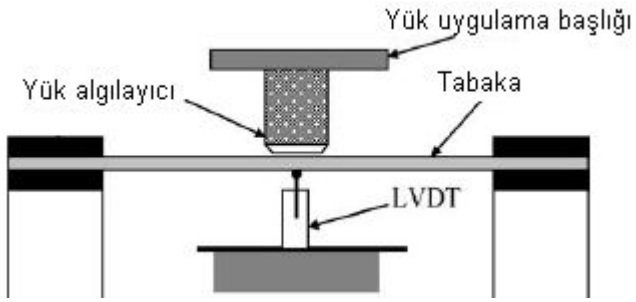
Şekil 5.1 Charpy ve Izod Darbe Test Düzenekleri

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 ivmelenmeyi ölçmektedirler. Bu sayede yük, yer değiştirme ve ivmelenmenin 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 donanımlar: platformları destekleyen numuneye veya 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. Balistik testler için yüksek hızlar gerektiğinden, kompozit malzemeye bu hızla bir cismi çarptırmak için tabanca veya silah sistemlerinden faydalanılır. Bu testlere ilişkin basit bir deney düzeneği Şekil5.4'de görülmektedir.



Şekil 5.2 Ağırlık Düşürme Test Düzeneği



Şekil 5.3 Ağırlık Düşürme Test Düzeneğinde ağırlığın numuneye temas ettiği kısmın ayrıntılı görünümü

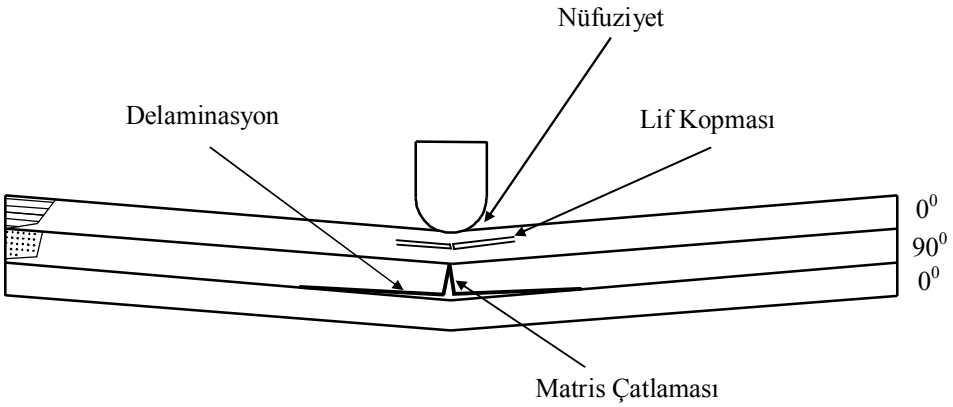
Kompozit malzemelerin darbe özelliklerini darbe test cihazı (serbest ağırlık düşürme, sarkaç, silah v.b), çarpan cismin karakteristiği (içi dolu veya boş, uç şekli ve boyutu v.b), çarpan cismin hızı ve kütlesi (veya enerjisi), numunenin konfigürasyonu (boyutu, geometrisi, numune ve destek noktalarındaki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

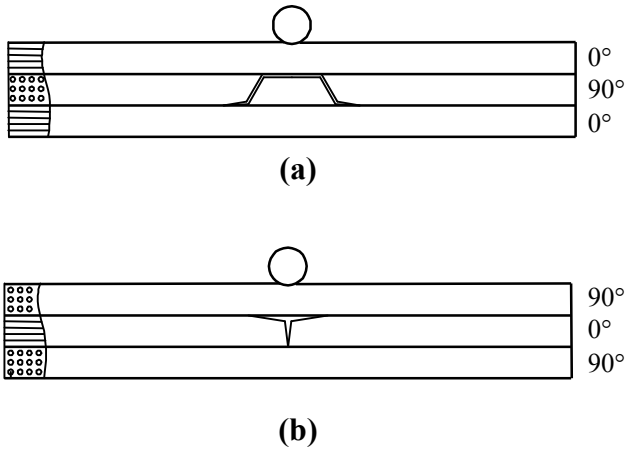
Malzemedeki hasar modlarının belirlenmesi sadece darbe olayı hakkında bilgi edinmek için değil, ayrıca yapının kalıcı mukavemeti hakkında fikir edinmeyi sağlaması açısından da çok önemlidir. Hasar modları arasındaki etkileşmeyi anlamak, hasar modunun başlaması ve ilerlemesini anlamak açısından da çok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



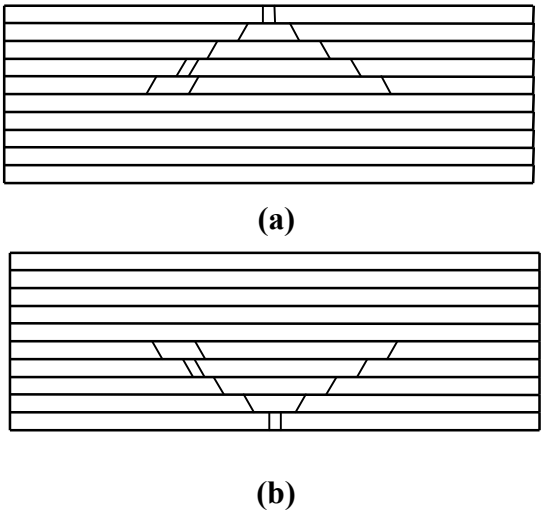
Şekil 5.3 Darbe sonucu kompozit malzemede oluşan hasar çeşitleri

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 içi 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).



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

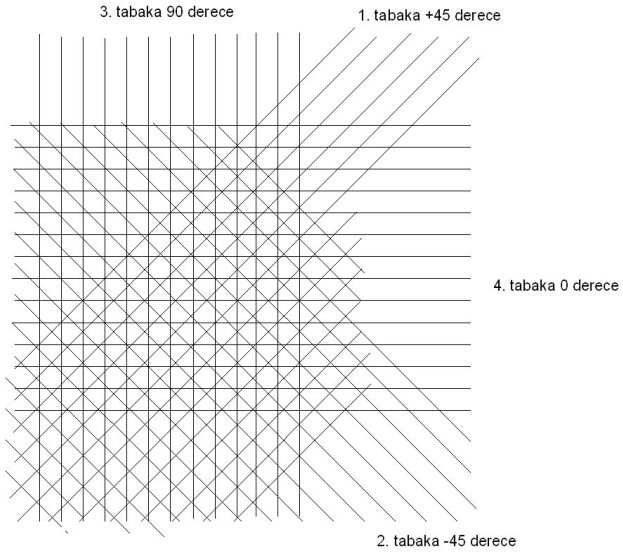
Nüfuziyet, hasarın makroskobik bir modudur ve çarpan cismin malzeme üzerindeki dalma miktarını veya delme miktarını ifade eder. Elyaf hacim oranlarının aynı olduğu farklı boyutlardaki malzemelerde çarpan cismin nüfuziyet alanı yaklaşık olarak aynıdır.

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 $[0°,–45°,+45°,0°,90°,0°,+45°,–45°,0°]_s$ şeklinde dizilime sahip 18 tabakadan oluşan 7mm kalınlığında E–camı/epoksi tabakalı kompozit malzeme, 180×50 mm, 180×100 mm, 180×150 mm boyutlarında kesilerek deneylerde kullanılmıştır. Numuneler rijit bir zemin üzerinde serbest bırakılmış ve darbe her bir levhanın merkezine yapılmıştır.



Şekil 6.1 [+45/-45/90/0] şeklinde açısal dizilime sahip numunenin 4 tabakalık kesitinin şematik çizilmiş hali

Deney numuneleri İZOREEL Kompozit İzole Malzemeler San. ve Tic. Ltd. Şirketi tarafından üretilmiş ve istenilen ölçülerde kesilerek hazırlanmıştır. Numunenin açısal dizilimine ait şematik gösterim şekli ilk dört tabaka için şekil 6.1 de gösterilmektedir.

Epoksi/Cam Kumaş bazlı levhaların kalite sınıflarının belirgin özellikleri Çizelge 6.1' de verilmiştir.

Çizelge 6.1 Epoksi/Cam kumaş bazlı levhaların kalite sınıflarının belirgin özellikleri

Özellikler	**Test Metodu**	**Birim**	**Hgw 2372 Grade G10 Ep GC 201**	**Hgw 2372.1 Grade FR-4 Ep GC 202**	**Hgw 2372.4 Grade G11 Ep GC 203**
Mekanik Özellikler					
Çekme Mukavemeti	ISO 527	MPa	320	280	320
E Modülü	ISO 178	GPa	20	20	20
Eğilme Mukavemeti	ISO 178	MPa	400	350	450
Bası Mukavemeti	ISO 609	MPa	500	500	550
Fiziksel Özellikler					
Özgül ağırlık	ISO 1183-A	g/cm^3	1,8 - 2,0	1,8 – 2,0	1,8 – 2,0
Su emme	ISO 62/1	Mg	15	10	15
Sıcaklık dayanımı	IEC 216	T.I	150	180	180
Alevlenebilirlik	UL 94	-	-	FVO	-

Bu çalışmada cam elyaf takviyeli epoksi levha olarak Hgw 2372 seçilmiştir.

Birçok test tekniği darbe üretmek için kullanılmakla beraber 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.

Selçuk Üniversitesi Kadınhanı Faik İçil Meslek Yüksekokulu laboratuarında özel bir ağırlık düşürme test cihazı geliştirilmiştir. Darbe testleri bu test cihazı ile gerçekleştirilmiştir.

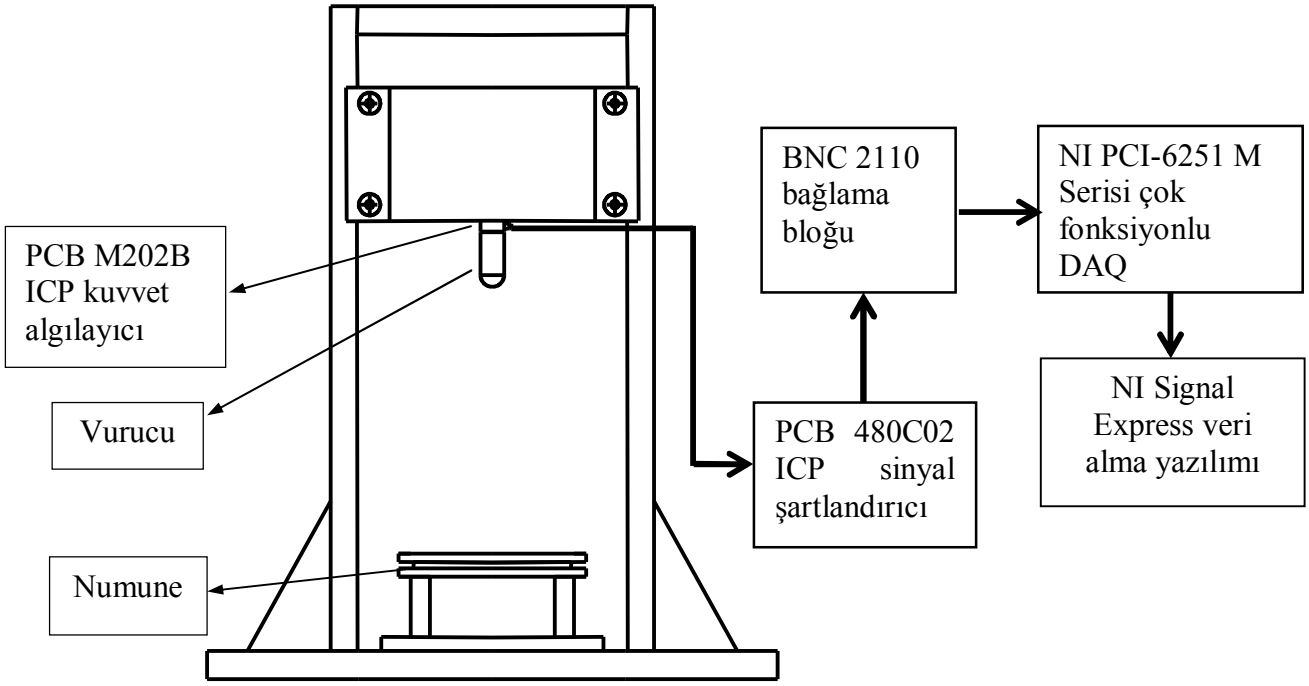
Farklı boyutlardaki deney numunelerine 2.0, 2.5 ve 3.0 m/s hızlarında düşük hızlı darbeler yapılmıştır. Darbe sonucu kuvvetin zamana göre değişimi elde edilmiştir. En büyük temas kuvveti ve temas süreleri bulunmuştur. Kinematik analiz ile impuls kuvveti, yutulan enerji ve kuvvet-deplasman değişimi hesaplanmıştır. Ayrıca hasar alanları hesaplanarak hasar haritaları çıkarılmıştır.

6.1.1. Ağırlık Düşürme Test Cihazı

Dinamik darbe testleri numunelerin düşük hızlı darbe davranışlarını elde etmek için özel olarak imal edilmiş test cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Cihaz farklı darbe enerjilerinde, darbenin başlangıcından sonuna kadar, darbeyi kaydedebilen özel bir kabiliyete sahiptir (Şekil 6.2).

Cihaz 1.5 m yüksekliğindedir. Vurucu 13.5 kg kütleli olup 1 m den serbestçe düşebilmektedir. Bu çalışmada vurucuya ağırlık ilave edilmiş ve deneyler 30 kg ağırlık ile yapılmıştır. Ağırlığın istenilen mesafeden bırakılabilmesi için kilit mekanizması vardır. Böylece değişik darbe hızlarında deney yapılabilmektedir. Serbest düşme ile öngörülen en büyük teorik hız 4.4 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 grubumuz ise elektronik kontrol ünitesidir. Ağırlık düşürme test cihazımız Şekil 6.2'de görülmektedir.



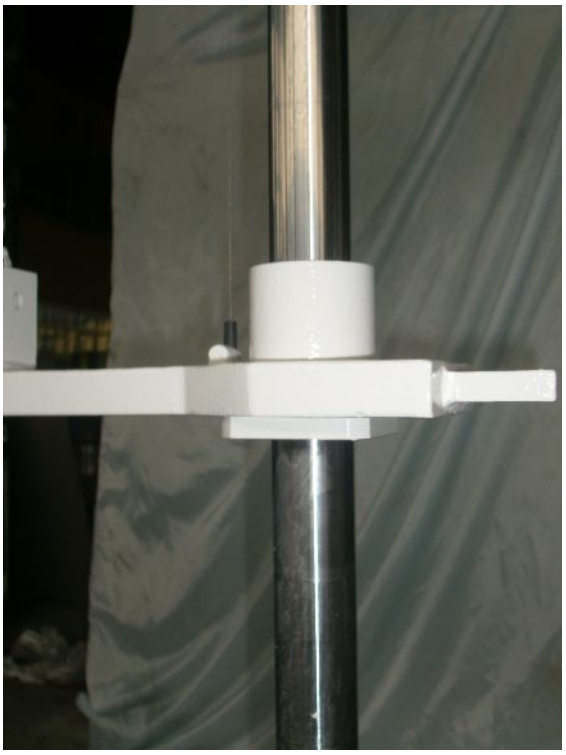
Şekil 6.2 Darbe deneyi cihazının şematik gösterimi

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 pnömatik silindir hareket ettiği anda vurucu kütlesi serbest düşme ile ring yataklamalar indüksiyonlu miller üzerinde düşey harekete geçer.

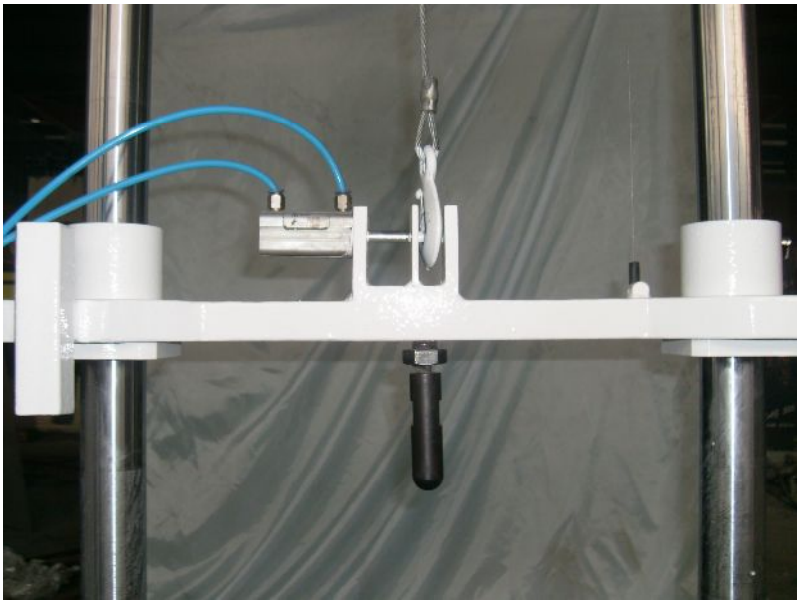


Şekil 6.3 Ağırlık düşürme test cihazı

Şekil 6.4'de vurucu kütlesinin en az sürtünmeyle serbest düşmesini sağlayan özel ring yatak sistemi görülmektedir. İndüksiyonlu miller üzerinde hareket eden karşılıklı iki adet ring yataklama vardır. Şekilde 6.5'te görüldüğü gibi vurucu kütlesinin her iki kenarına da bağlanarak monte edilmiştir. Vurucunun kütlesi, bağlı olduğu ring yatak, vurucu gövde, ucu ve bağlama elemanları ile beraber toplam 13.5 kg dır.



Şekil 6.4 Ring yatak sistemi



Şekil 6.5 Vurucu

6.1.2. Vurucu Durdurma Mekanizması

Şekil 6.5'te kuvvet uygulandıktan hemen sonra vurucuyu durduran pnömatik durdurma sistemi görülmektedir. Vurucu kütlesinin her iki kenarına da pnömatik durdurma silindiri yerleştirilmiştir. Vurucu numune üzerine ilk darbeyi yaptıktan sonra vurucu kütleyi algılayan bir sensör durdurucu silindirleri harekete geçirmekte vurucu kütlesinin hareketini durdurmaktadır. Böylece tekrarlı darbeler engellenmiştir.



Şekil 6.6 Vurucu durdurma mekanizması

6.1.3. Vurucu Geometrisi ve Kuvvet Algılayıcı

Şekil 6.7'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. Vurucu kütlesi ile vurucu arasına monte edilmiştir. Kuvvet algılayıcıya bağlı teflon kablo yardımı ile sinyal elektronik kontrol ünitesine iletilmektedir.



Şekil 6.7 Vurucu-Kuvvet algılayıcı bağlantısı

6.1.4. 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.

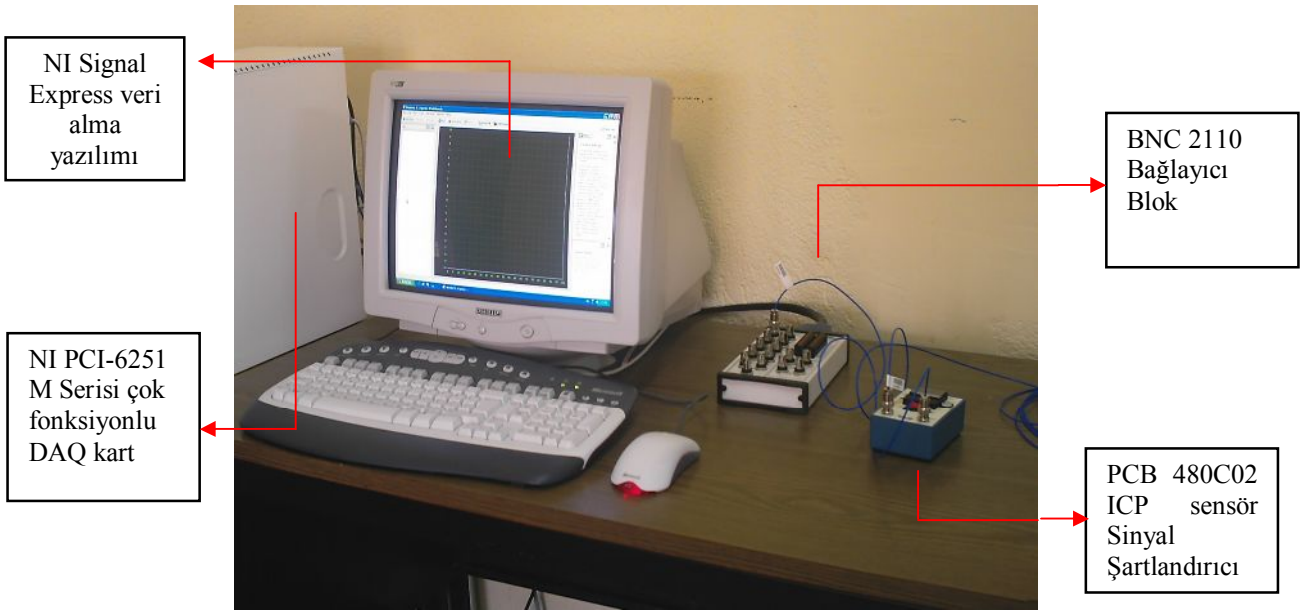
Sinyal şartlandırıcı' da yükseltilen sinyali DAQ karta iletilebilmesi için BNC bağlayıcı blok kullanılmıştır. Sinyalin doğrudan DAQ karta verilmesi risk taşımaktadır. Kartın yanmasına veya işlevini yitirmesine sebep olabilir. Bu yüzden yükseltilen sinyal bir bağlayıcı blok üzerinden iletilmektedir. Sistemle 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 imkân 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 6.8'de elektronik kontrol ünitesi görülmektedir.



Şekil 6.8 Elektronik kontrol ünitesi

6.2. Deneyin Yapılması

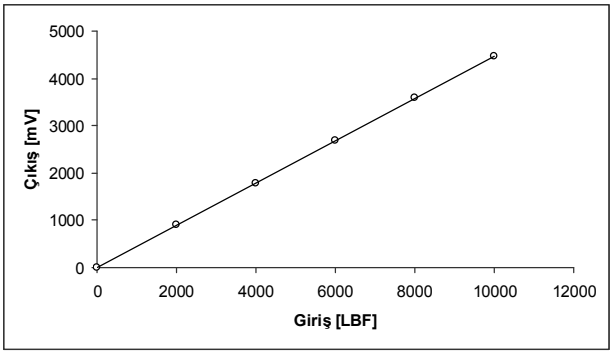
Deneyde kullanılan numuneler serbest olarak rijit bir yüzeye bırakılmıştır. Numune boyutları sırasıyla 180×50 mm, 180×100 mm ve 180×150 mm dir. Numune kalınlığı ise 7 mm dir. Merkezi çarpmanın temini için önce her bir deney numunesinin merkezi markalama ile tespit edilmiştir. Bağlama aparatına yerleştirilirken darbe belirlenen bu merkeze olacak şekilde numunenin monte edilmesi sağlanmıştır.

Uyaner ve Kara (2007) deki çalışma ile karşılaştırma yapabilmek için vurucu kütlesi 30 kg olacak şekilde artırılmıştır.

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.

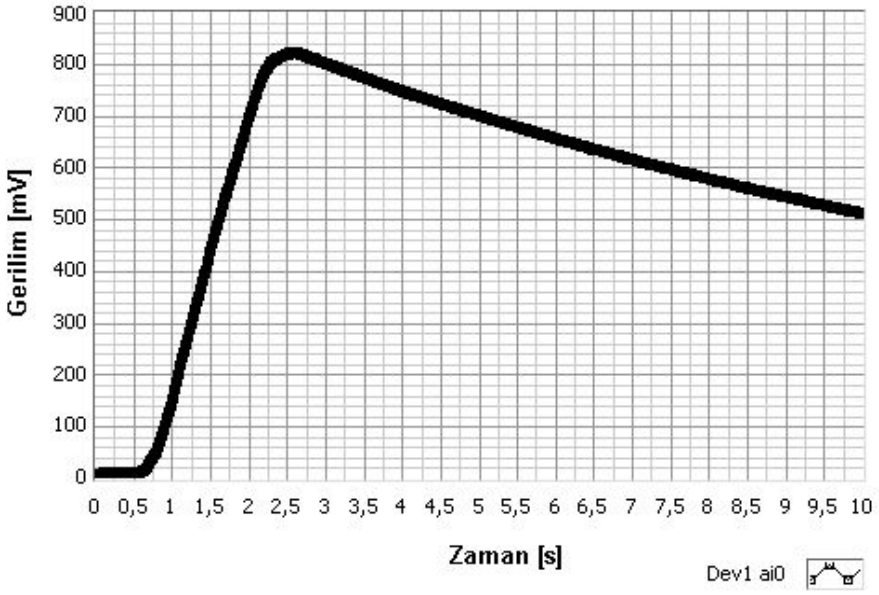
6.3. Kalibrasyon

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

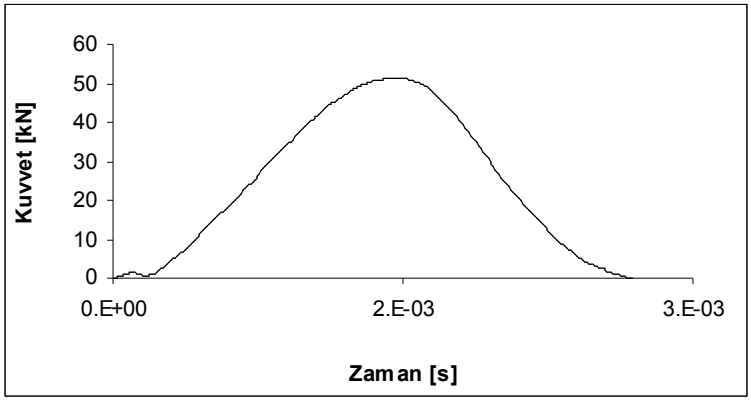
7.1. Vurucu ile Deney Numunesi Arasındaki Temas Kuvvetleri

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. Bu tez çalışmasında sadece ilk darbenin etkileri araştırılmıştır. Bunu amaçla ilk darbeden sonra vurucu tutulmuştur.

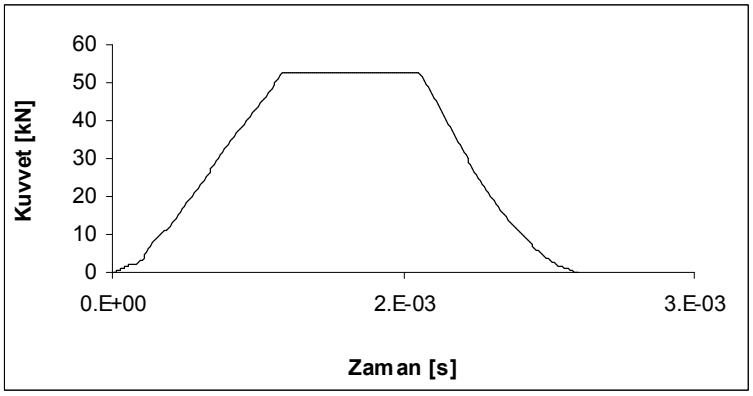
Şekil 7.1a-c de 180×50 mm, Şekil 7.2a-c de 180×100 mm ve Şekil 7.3a-c de, 180×150 mm deney numunelerinde 2.0 m/s, 2.5m/s ve 3.0 m/s çarpma hızlarında elde edilen kuvvet-zaman değişimleri görülmektedir.

Elde edilen kuvvet-zaman değişimlerinin 2.0 m/s çarpma hızlarında çıngırak eğrisi şeklinde olduğu diğer hızlarda ise çıngırak eğrisinde plato oluştuğu görülmektedir. Bütün şekillerde kuvvet hızla artarak bir azami kuvvet değerine ulaşmaktadır ve daha sonra sıfıra düşmektedir. Bu durum numunenin merkezi üzerinde hasar mekanizması oluştuğunu göstermektedir (Wang & Vukhanh, 1994).. Kuvvet en yüksek değerine ulaşıncaya kadar hasar oluşumunun hızla devam ettiği düşünülmektedir.

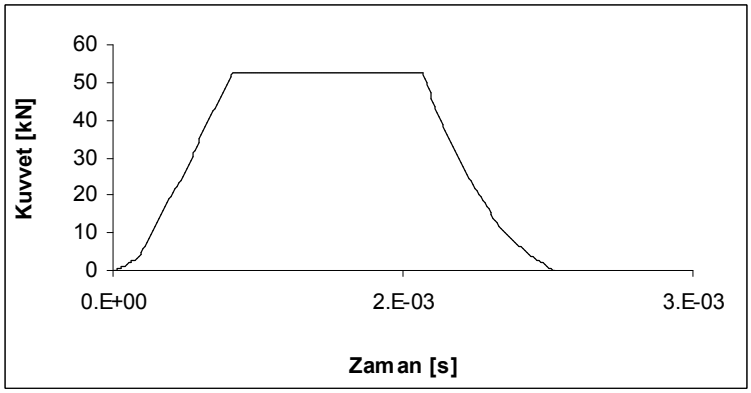
Bu çalışmada sadece ilk darbenin etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla ilk darbeden sonra vurucu tutulmuştur. Şekil 7.1, Şekil 7.2 ve Şekil 7.3'de sırasıyla 180×50 mm, 180×100 mm, 180×150 mm boyutlarındaki numunelerde farklı hızlarda elde edilen kuvvet zaman diyagramları verilmiştir.



(a)

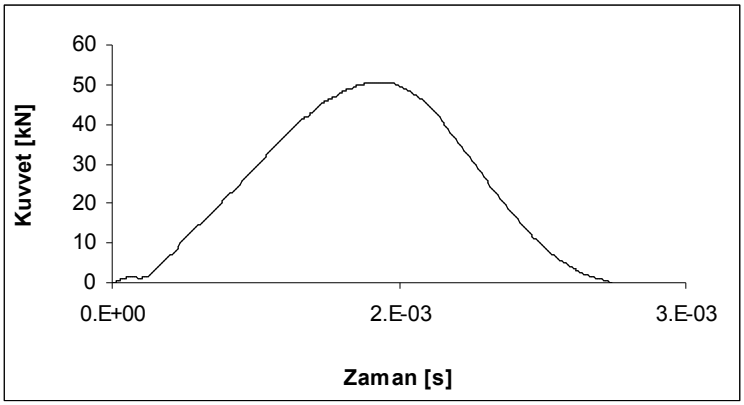


(b)

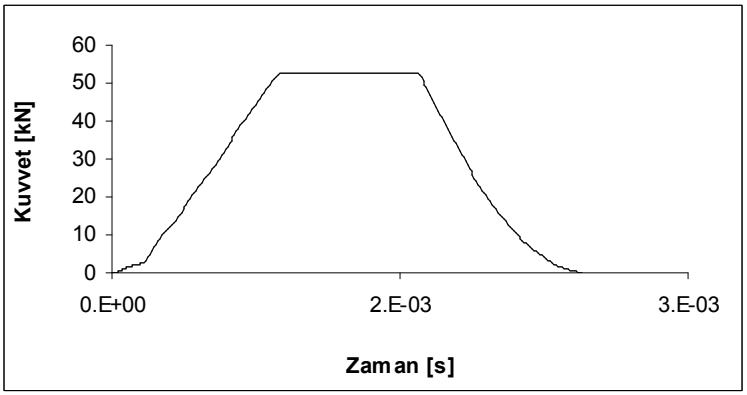


(c)

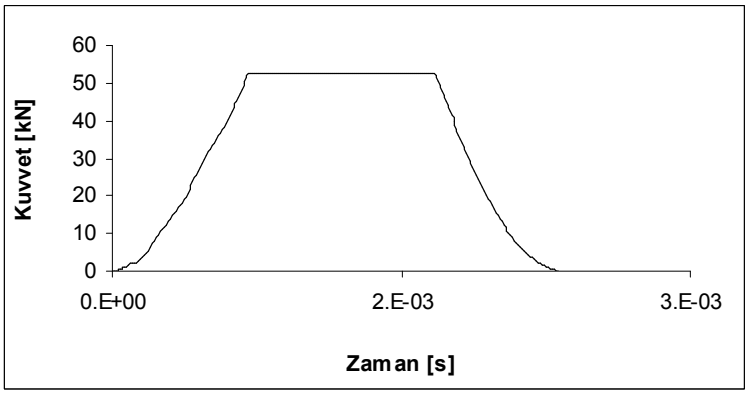
Şekil 7.1. 180x50 mm boyutlarındaki numunelerde (a) 2.0 m/s çarpma hızında (b) 2.5 m/s çarpma hızında (c) 3.0 m/s çarpma hızında elde edilen kuvvet-zaman diyagramları



(a)

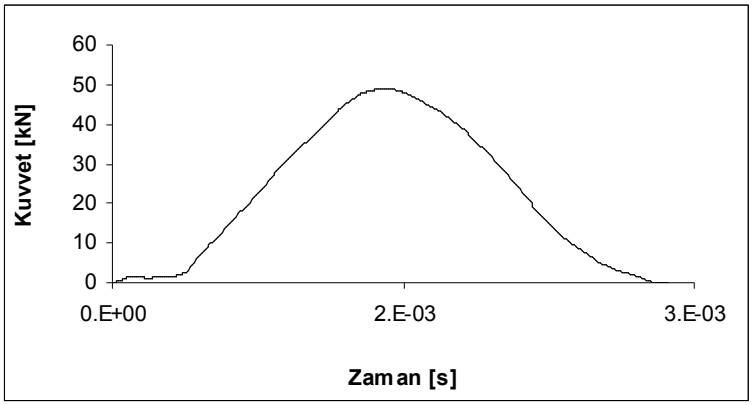


(b)

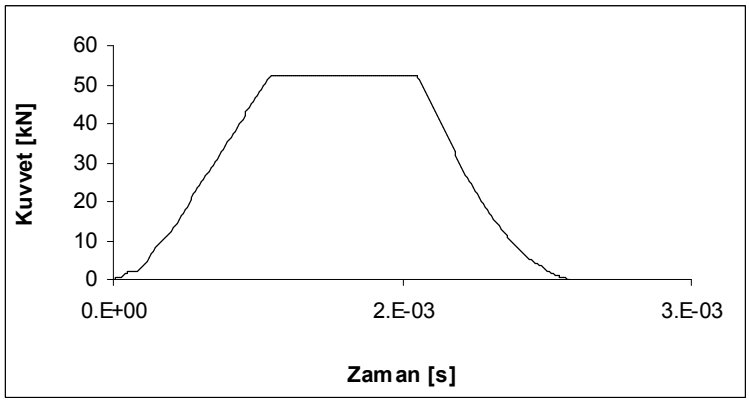


(c)

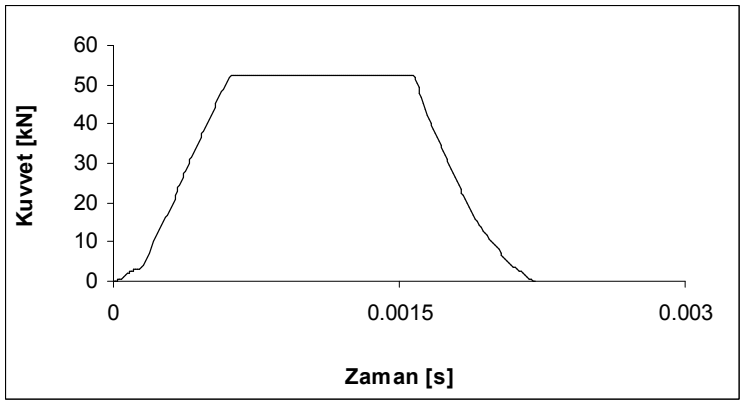
Şekil 7.2. 180x100 mm boyutlarındaki numunelerde (a) 2.0 m/s çarpma hızında (b) 2.5 m/s çarpma hızında (c) 3.0 m/s çarpma hızında elde edilen kuvvet-zaman diyagramları



(a)



(b)



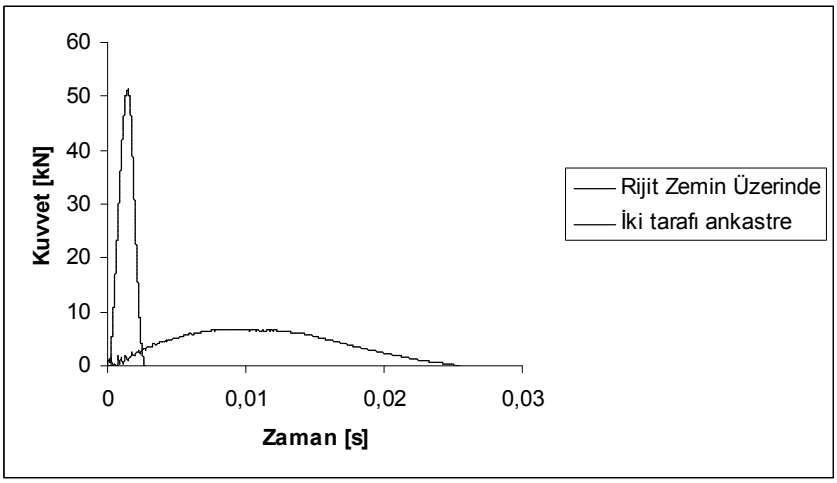
(c)

Şekil 7.3. 180x150 mm boyutlarındaki numunelerde (a) 2.0 m/s çarpma hızında (b) 2.5 m/s çarpma hızında (c) 3.0 m/s çarpma hızında elde edilen kuvvet-zaman diyagramları

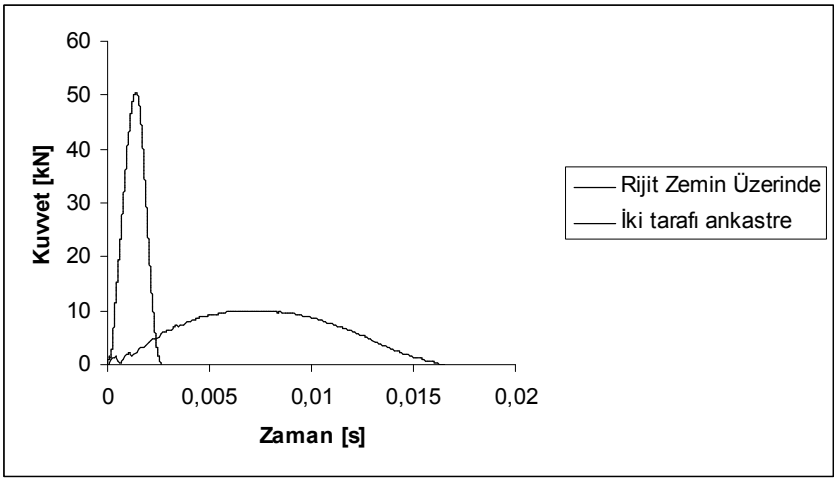
Şekil 7.1, 2 ve 3 te 2.0 m/s hız için elde edilen grafikler incelendiğinde 2.0 m/s için elde edilenler tipik bir çan eğrisi verdiği görülmektedir. En büyük kuvvetler sırasıyla 51234.52 N, 50573.35 N ve 4902531 N olarak ölçülmüştür. Numune genişliği arttıkça en büyük (peak) kuvvette azalma görülmüştür. Buna sebep olarak daha geniş numunede çok az da olsa bir miktar fazla enerji yutması gösterilebilir.

2.5 m/s ve 3.0 m/s hızlarında elde edilen kuvvet-zaman eğrilerinde bir düzlük oluştuğu görülmüştür. Bu düzlük 3.0 m/s de daha geniş olarak tespit edilmiştir. Bu düzlükler her hız ve numune için 52467.2 N da oluşmuştur. Düzlüklerin oluşmasına sebep olarak kompozit malzemenin darbeye kuvvet olarak daha öte direnmediği, vurucu ile malzeme arasında bir tam yapışma olduğu düşünülmektedir. Vurucu ve zemin rijit olduğundan ötürü malzeme deformasyon olamamakta sadece vurucunun temas ettiği bölgede bir ezilme gerçekleşmektedir.

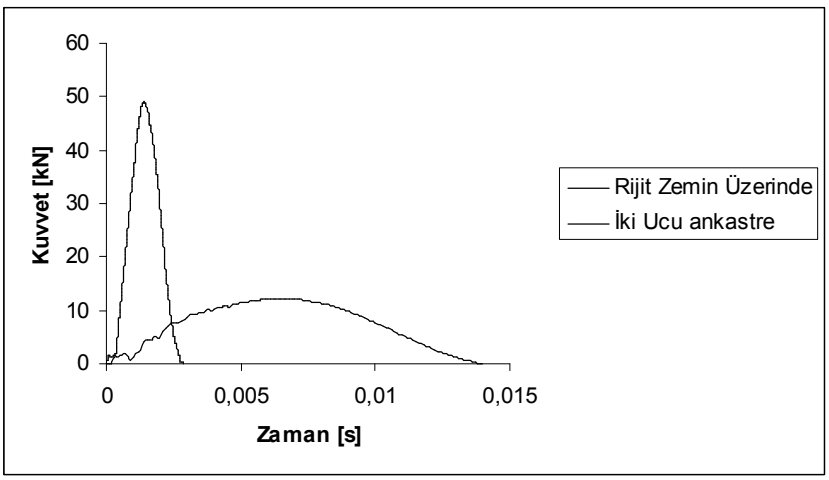
Şekil 7.4. te Uyaner&Kara (2007) de elde edilen kuvvet zaman diyagramları ile karşılaştırma yapılmıştır. Uyaner&Kara (2007) çalışmalarında aynı özelliklere sahip numuneleri iki ucu serbest ve iki ucu ankastre olacak şekilde bağlayarak 2.0 m/s, 2.5 m/s ve 3.0 m/s çarpma hızlarında düşük hızlı darbe deneyine tabi tutmuşlardır. Şekil 7.4 te 2.0 m/s hızlarında elde edilen sonuçlar aynı grafik üzerinde verilerek karşılaştırma yapılmıştır. Şekilde görüldüğü gibi rijit zemin üzerinde malzeme düşük hızlı darbeye maruz kaldığı zaman vurucunun numuneye temas süresi çok daha kısa olmaktadır. Ayrıca rijit zemin üzerinde darbeye maruz kalan numunede elde edilen en büyük kuvvet değeri iki tarafı ankastre olarak düşük hızlı darbeye maruz kalan numunede elde edilen en büyük kuvvet değerinden çok daha fazla olmaktadır.



(a)



(a)



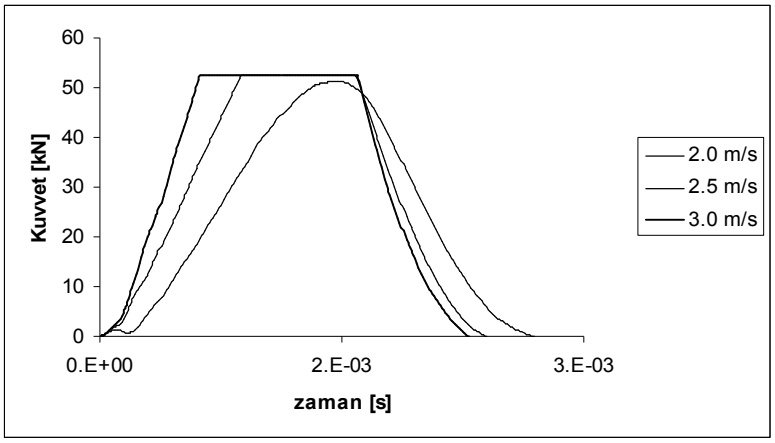
(a)

Şekil 7.4. 2.0 m/s çarpma hızında (a)180x50 mm boyutlarındaki (b)180x100 mm boyutlarındaki (c)180x150 mm boyutlarındaki numuneler için Rijit zemin üzerinde ve iki tarafı ankastre durumunda elde edilen kuvvet zaman diyagramları

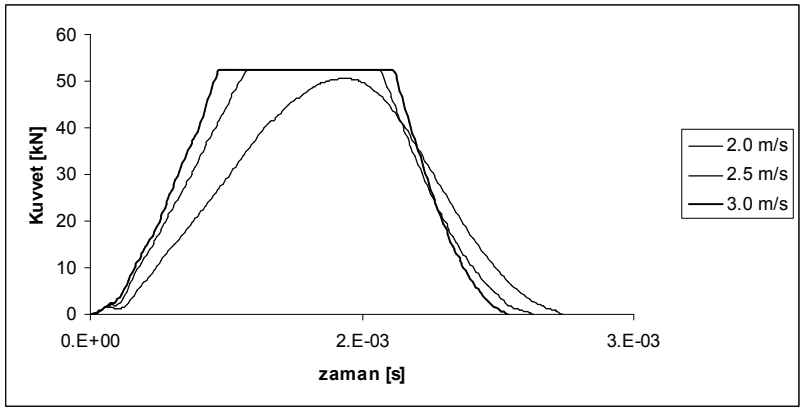
7.1.1. Çarpma Hızının Temas Kuvvetine Etkisi

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 7.5a-c de çizilerek gösterilmiştir.

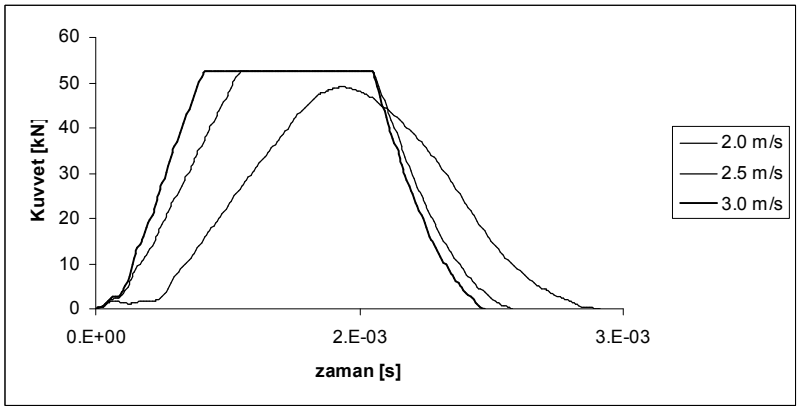
Şekil 7.5a-c deki grafiklerde sırasıyla 180×50 mm, 180×100 mm ve 180×150 mm boyutlarındaki kompozit numuneler için temas kuvvetinin zamana bağlı değişimi verilmiştir. Her bir grafikte farklı çarpma hızları (2.0 m/s, 2.5 m/s ve 3.0 m/s) birer ayrı seri olarak görülmektedir. Her bir grafikte, bir numunedeki tüm darbeler yaklaşık olarak aynı sürede gerçekleşmiştir. Bunun sebebi, aynı boyutlardaki numunelerin aynı kompliyansa sahip olmalarıdır.



(a)



(b)



(c)

Şekil 7.5 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.

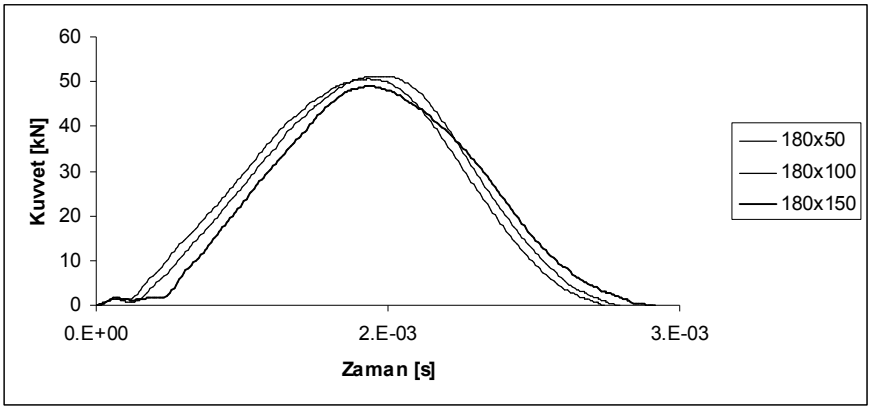
Çizelge 7.1 Düşük hızlı darbe deneylerinde elde edilen en büyük temas kuvveti ve vurucu temas süresi değerleri

Numune Boyutları [mm]	Çarpma Hızı [m/s]	Darbe enerjisi [J]	En Büyük Temas Kuvveti [kN]	Temas Süresi [s]
180×50	2	60	51,23	0.00269
	2.5	93.75	50,57	0.0024
	3	135	49,02	0.00229
180×100	2	60	52,46	0.00261
	2.5	93.75	52,46	0.00245
	3	135	52,46	0.00231
180×150	2	60	52,462	0.00287
	2.5	93.75	52,46	0.00237
	3	135	52,46	0.00221

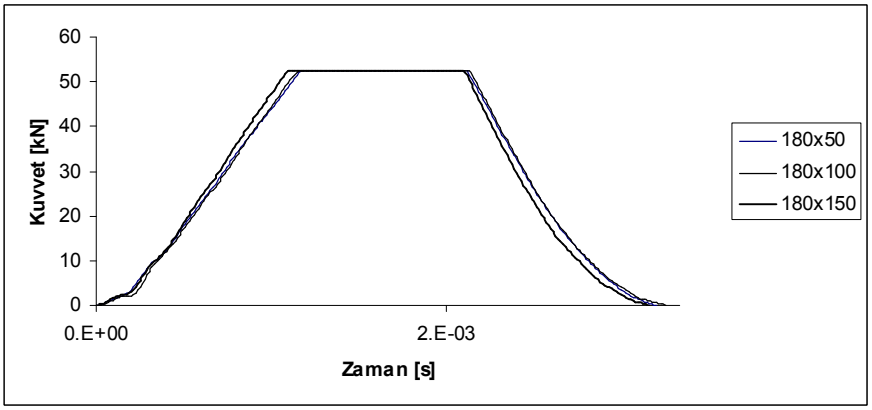
7.1.2. Numune Boyutlarının Temas Kuvvetine Etkisi

Sabit bir çarpma hızında (sabit bir darbe enerjisi) numune boyutlarının temas kuvvetine etkisini görebilmek için deney değerleri uygun bir şekilde gruplanmış ve değişimler Şekil 7.6a-c' de grafik halinde gösterilmiştir.

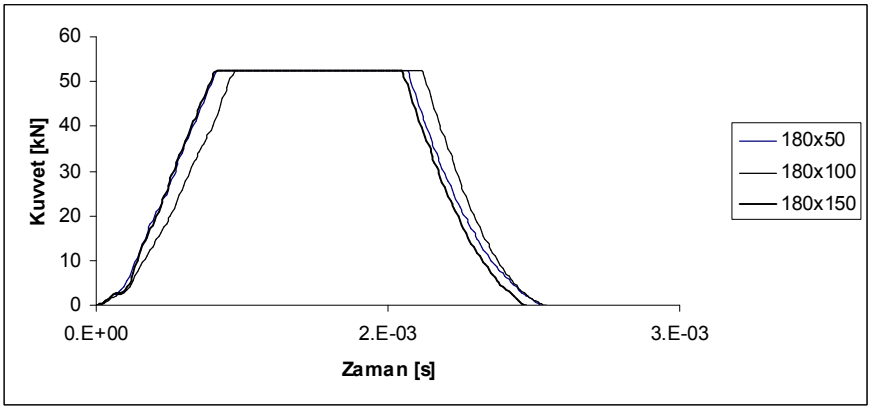
Şekil 7.6a-c' deki grafiklerde sırasıyla 2.0 m/s, 2.5 m/s ve 3.0 m/s çarpma hızlarında kuvvetin zamana göre değişimi görülmektedir. Her bir grafikte farklı numuneler ayrı birer seri olarak verilmiştir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 7.6 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 aynı hızlarda değişik numunelerde numune boyutunun en büyük temas kuvvetinin numune büyüdükçe küçüldüğü ama temas süresi değerlerini etkilemediği görülmektedir.

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

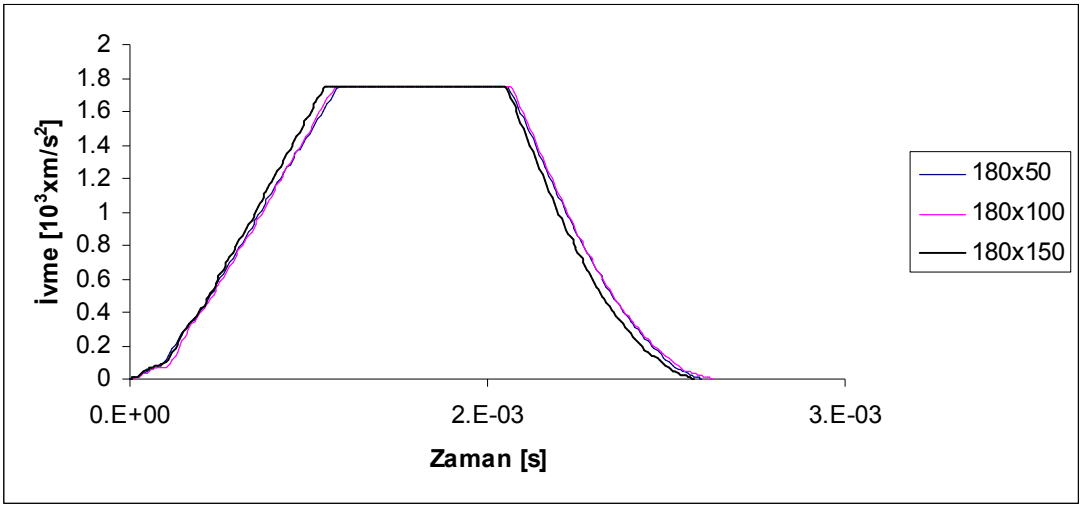
Çarpma Hızı [m/s]	Darbe enerjisi [J]	Numune Boyutları [mm]	En Büyük Temas Kuvveti [N]	Temas Süresi [s]
2.0	60	180×50	51234.52	0.00269
	60	180×100	50573.35	0.00261
	60	180×150	49025.31	0.00287
2.5	93.75	180×50	52467.2	0.0024
	93.75	180×100	52467.2	0.00245
	93.75	180×150	52467.2	0.00237
3.0	135	180×50	52467.2	0.00229
	135	180×100	52467.2	0.00231
	135	180×150	52467.2	0.00221

7.2. Kinematik Analiz Neticesinde Elde Edilen Değerler

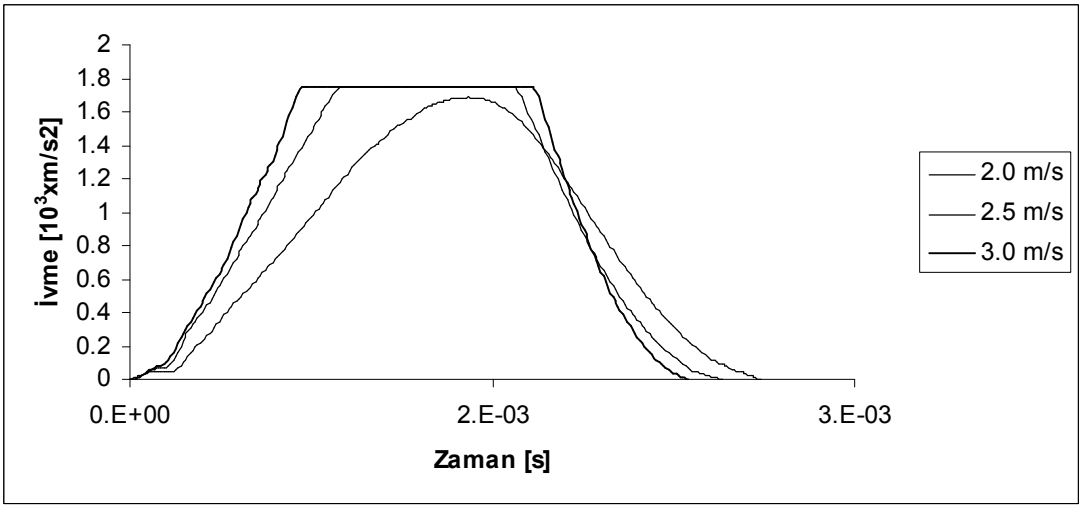
Tüm deney değerleri üzerinde yapılan hesaplamalar neticesinde ivme-zaman, hız-zaman, yer değiştirme-zaman, kuvvet-yer değiştirme değişimleri elde edilmiştir. Her bir deney numunesi için elde edilen grafikler, karakteristik olarak diğer numuneler için elde edilene benzemektedirler. Bu nedenle değişimleri 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 7.7'de değişik çarpma hızlarında 180×100 mm boyutundaki numunede ivme-zaman değişimi, Şekil 7.8'de ise değişik numunelerde 2.5 m/s çarpma hızında ivme-zaman değişimi verilmiştir.



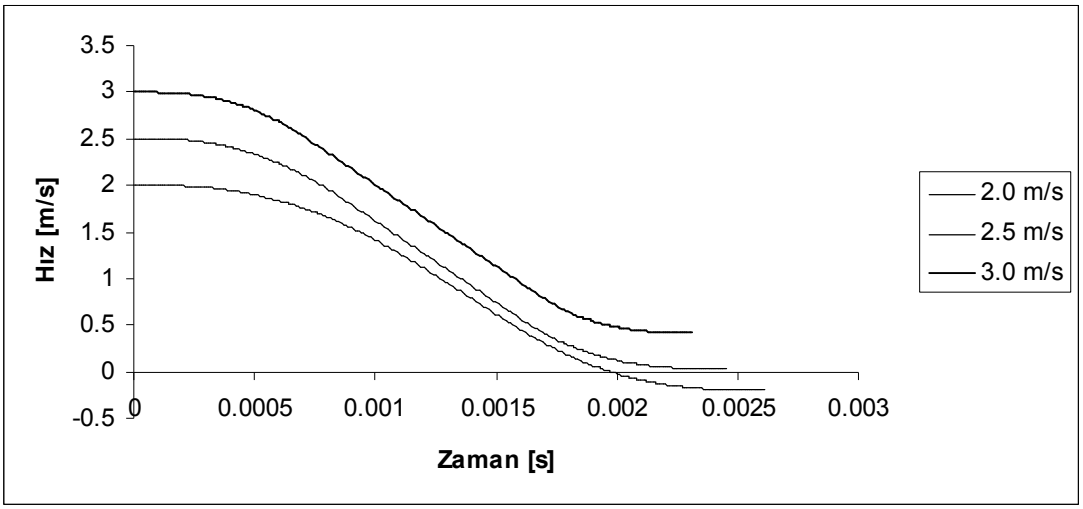
Şekil 7.7 Değişik çarpma hızlarında 180×100 mm numunede ivme–zaman değişimi



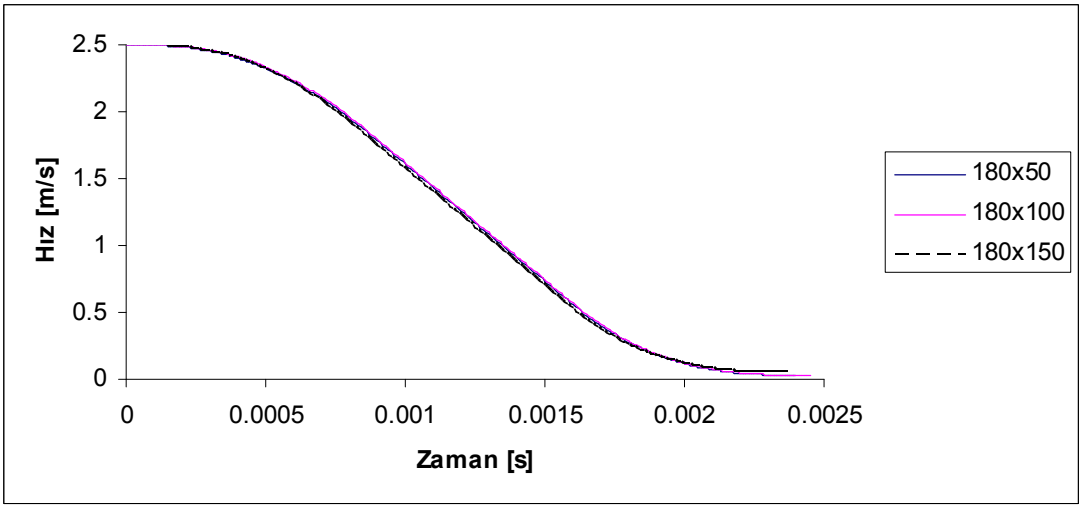
Şekil 7.8 Değişik numunelerde 2.5 m/s çarpma hızındaki ivme–zaman değişimi

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 7.9'da değişik çarpma hızlarında 180×100 mm numunede hız-zaman değişimi, Şekil 7.10'de ise değişik numunelerde 2.5 m/s çarpma hızındaki hız-zaman değişimi örnek olarak sunulmuştur.



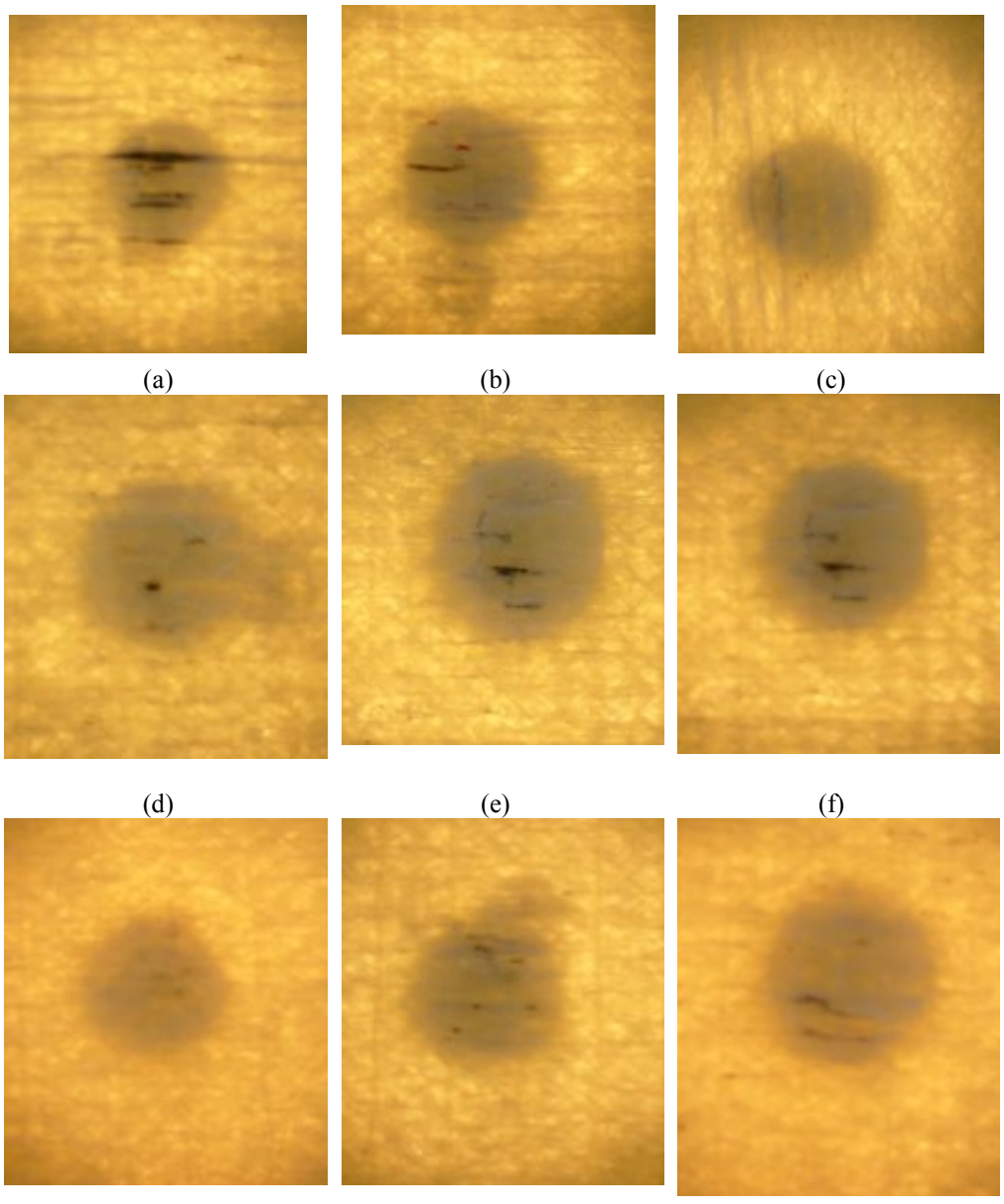
Şekil 7.9 Değişik çarpma hızlarında 180×100 mm numunedeki hız–zaman değişimi



Şekil 7.10 Değişik numunelerde 2.5 m/s çarpma hızındaki hız–zaman değişimi

7.3.Düşük Hızlı Darbede Hasar Bölgeleri

Deney numunelerine darbe yapıldıktan sonra ön ve arka bölgelerinin ışık altında yüksek çözünürlükte fotoğrafları çekilmiştir. Şekil 7.11'te numunelerin arka bölgelerinden ışık tutulmasıyla elde edilen hasar bölgeleri görülmektedir.

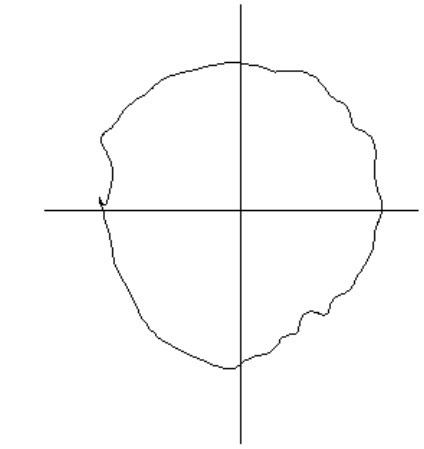


Şekil 7.11 Değişik numune boyutlarında ve farklı çarpma hızlarındaki hasar bölgeleri a) 180x50 mm 2 m/s çarpma hızı b) 180x50 mm 2.5 m/s çarpma hızı c) 180x50 mm 3 m/s çarpma hızı d) 180x100 mm 2 m/s çarpma hızı e) 180x100 mm 2.5 m/s çarpma hızı f) 180x100 mm 3 m/s çarpma hızı g) 180x150 mm 2 m/s çarpma hızı h) 180x50 mm 2.5 m/s çarpma hızı i) 180x50 mm3 m/s çarpma hızı

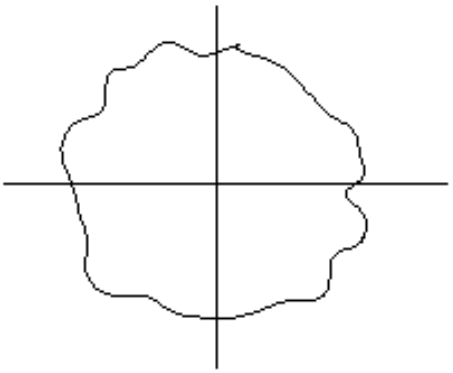
Fotoğraflar incelendiğinde hasarların ağırlıklı olarak tabaka ayrılması (delaminasyon) şeklinde gerçekleştiği görülmektedir. En düşük hasar alanı 2.0 m/s hız için 180x150 mm numunede, en büyük alanın da 3.0 m/s hız için 180x50 mm numunede oluştuğu gözlenmiştir.

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 bölgelerinin arkadan kuvvetli ışık altında yüksek çözünürlükte fotoğrafları çekilmiştir. Şekil 7.11a-c'de düşük hızlı darbe yapılmış 180×50 mm boyutlarındaki numunelerde, Şekil 7.11 d-f'de 180×100 mm boyutlarındaki numunelerde, Şekil 7.11 g-ı'de ise 180×150 mm boyutlarındaki numunelerde sırasıyla 2.0 m/s, 2.5 m/s ve 3.0 m/s çarpma hızlarında ön hasar bölgeleri görülmektedir.

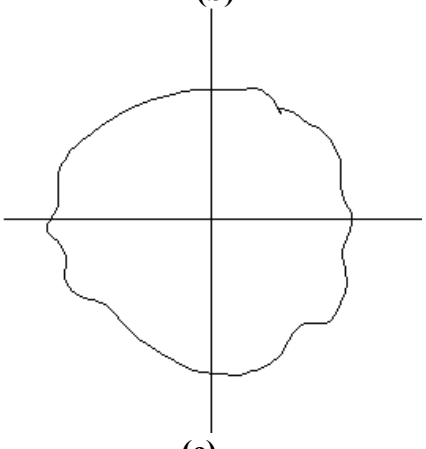
Görüntü işlenmiş hasar bölgeleri resimleri ölçekli bir şekilde AutoCAD programına aktarılarak bu program yardımıyla hasar haritaları çıkarılarak hasar alanları tespit edilmiştir. Şekil 7.-12,7-13,7-14'de sırasıyla 180×50 mm, 180×100 mm ve 180×150 mm boyutlarındaki numunelerin 2.0 m/s, 2.5 m/s ve 3.0 m/s çarpma hızlarında ön tarafında gelişen hasar haritaları görülmektedir. 180×150 mm, 180×100 mm ve 180×50 mm boyutlarındaki deney numunelerinin ön yüzeyinde bir tane hasar bölgesi görülmektedir.



(a)

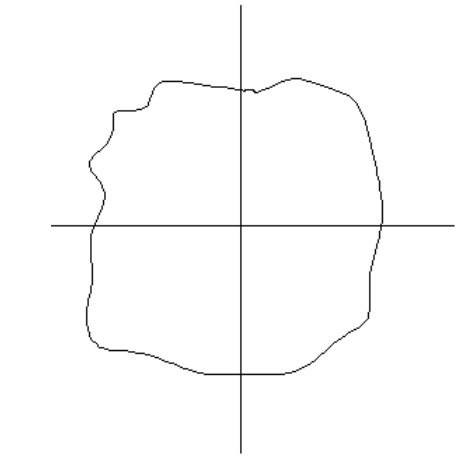


(b)

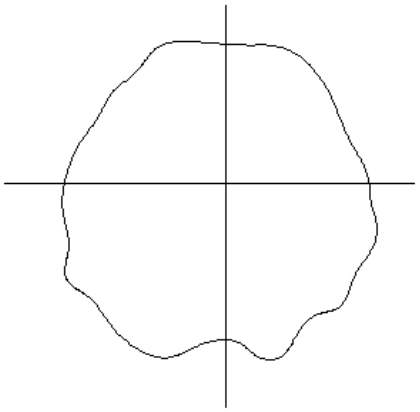


(c)

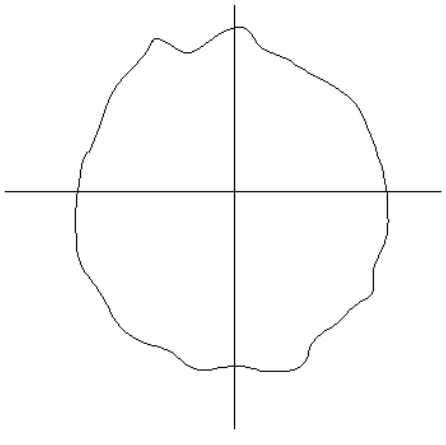
Şekil 7.12 180×50 mm boyutundaki deney numunesinin (a) 2.0 m/s, (b) 2.5 m/s, (c) 3.0 m/s çarpma hızlarında ön tarafında gelişen hasar haritaları



(a)

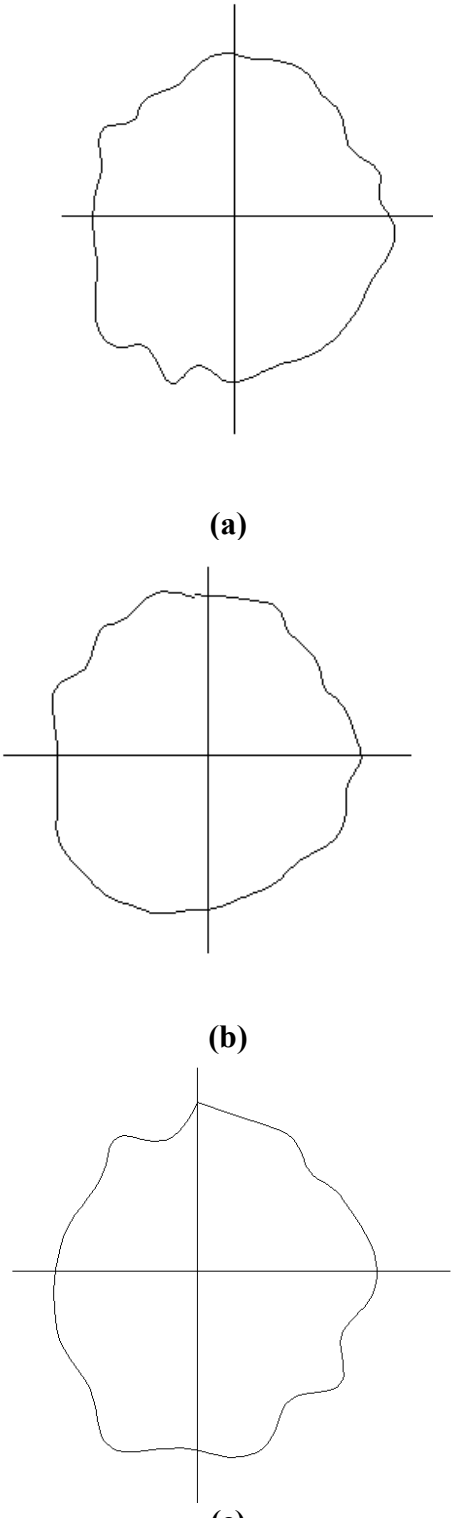


(b)



(c)

Şekil 7.13 180×100 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



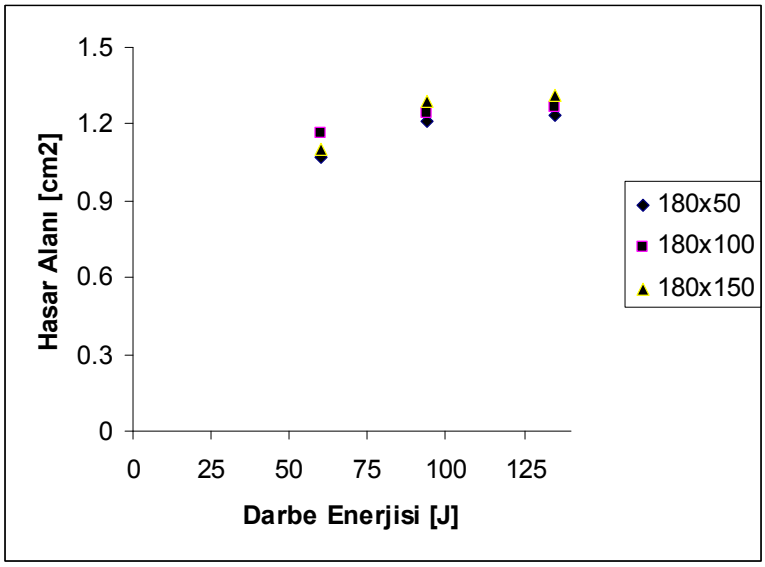
(a)

(b)

(c)

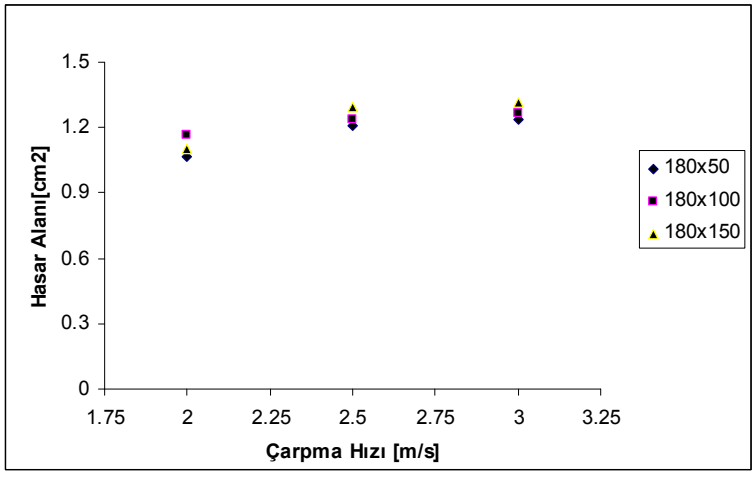
Şekil 7.14 180×150 mm boyutundaki deney numunesinin (a) 2.0 m/s, (b) 2.5 m/s, (c) 3.0 m/s çarpma hızlarında ön tarafında gelişen hasar haritaları

Değişik numunelerde darbe enerjisine bağlı olarak toplam hasar alanı Şekil 7.15'de verilmiştir. Darbe enerjisi arttıkça hasar alanının arttığı görülmektedir. Elde edilen hasar alanlarında aynı darbe enerjisinde değişik numuneler için ±%3 sapmalar görülmektedir. Bunun nedeni hasar alanlarının hesaplanmasındaki hatalardan kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 7.15 Değişik numunelerde darbe enerjisi-toplam hasar alanı değişimi

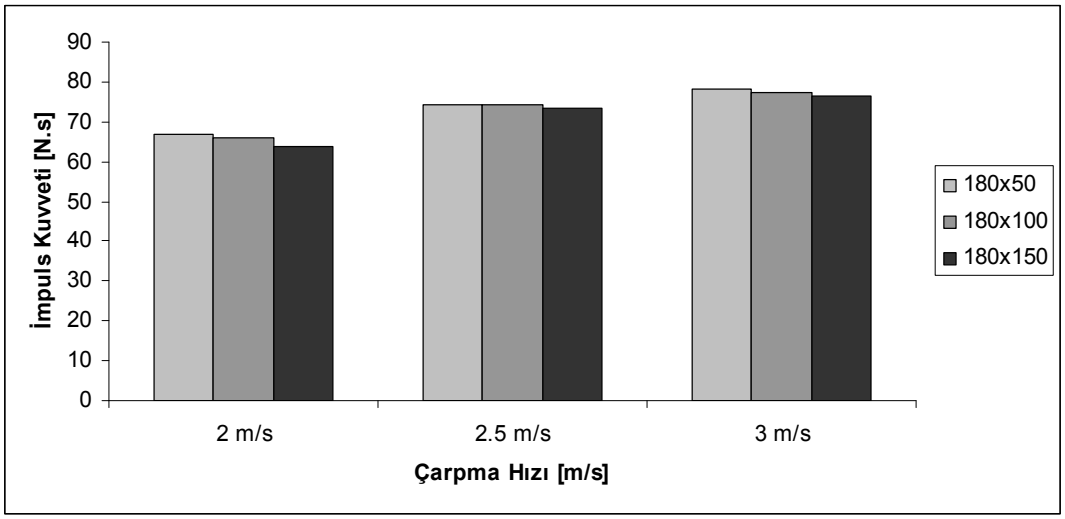
Şekil 7.16'de değişik numunelerde çarpma hızı-hasar alanı değişimi görülmektedir.



Şekil 7.16 Değişik numunelerde çarpma hızı-toplam hasar alanı değişimi

7.4.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.



Şekil-7.17 Değişik numunelerde 2.0 m/s, 2.5 m/s ve 3.0 m/s çarpma hızları için elde edilen impuls kuvvetleri

Farklı boyutlardaki deney numuneleri için impuls kuvveti aynı çarpma hız değerlerinde(darbe enerjilerinde) %0.2 farklar çıkmıştır. Bu bize numune ebatlarının impuls kuvvetini etkilemediğini göstermektedir.

Çarpma hızı arttıkça darbe enerjisi artacağından dolayı impuls kuvveti değerinin arttığı görülmüştür

7.5. 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
- 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 (Kısım 4.6.1-2-3). Bu durumdan yararlanarak sıçrama enerjisi ve numuneye aktarılan enerji tespit edilmiştir.

Vurucunun serbest düşmeye başlamadan önce sahip olduğu potansiyel enerji (darbe enerjisi) Bölüm 4.9'de verilmiştir. Bu enerji değerinden numunede yutulan enerji değeri çıkarıldığı zaman sıçrama enerjisi tespit edilmektedir. Deneylere ait tüm enerji bilançosu Çizelge 7.3 de verilmiştir.

180×50 mm ,180×100 mm ve 180×150 mm boyutlarındaki numunede sıçrama enerjisi 2.0 m/s ,2.5 m/s ve 3.0 m/s çarpma hızlarında yaklaşık olarak eşit olduğu görülmektedir. Darbe enerjisi arttıkça yutulan enerji oranının artması numunelerde oluşan hasarında arttığını göstermektedir.

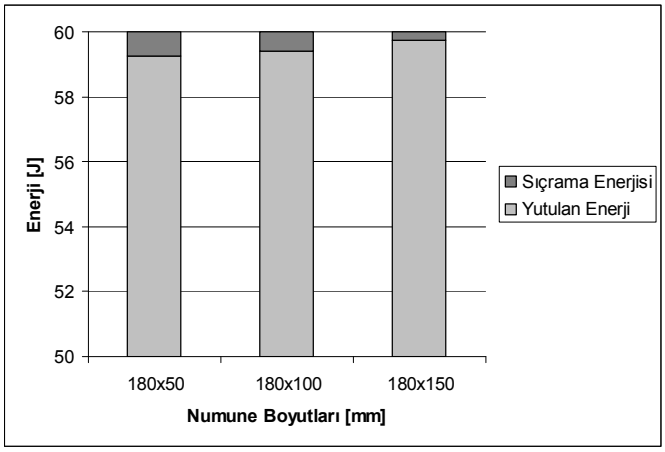
60 J darbe enerjisi için 180×50 mm ,180×100 mm ve180×150 mm boyutlarındaki numunelerde yutulan enerji ve sıçrama enerjisi değerleri arasında % 0.4 fark oluşmaktadır. **Şekil 7.18-a**

93.75 J darbe enerjisi için 180×50 mm ,180×100 mm ve180×150 mm boyutlarındaki numunelerde yutulan enerji ve sıçrama enerjisi değerleri arasında % 0.1 fark oluşmaktadır. **Şekil 7.18-b**

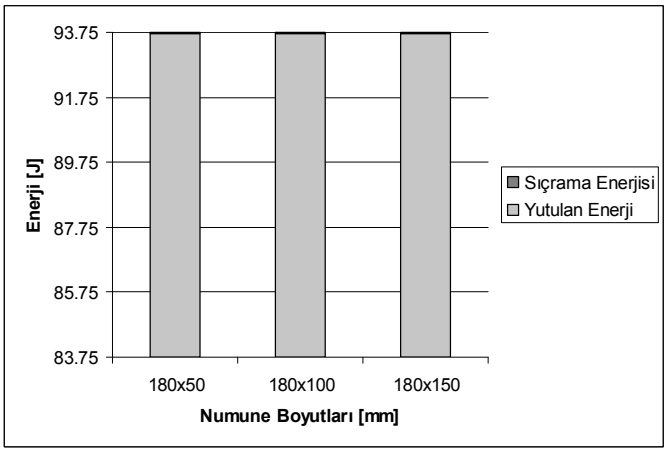
135 J darbe enerjisi için 180×50 mm ,180×100 mm ve180×150 mm boyutlarındaki numunelerde yutulan enerji ve sıçrama enerjisi değerleri arasında % 0.42 fark oluşmaktadır. **Şekil 7.18-c**

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

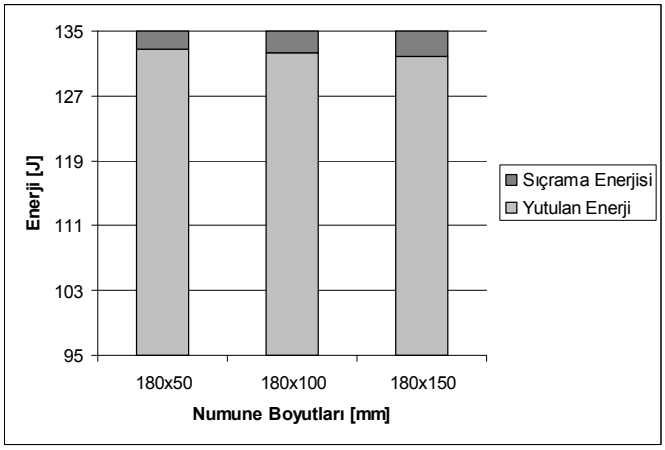
Darbe enerjisi [J]	**Numune Boyutları [mm]**	**Sıçrama enerjisi [J]**	**Yutulan enerji [J]**
60	180×50	0.74	59.25
	180×100	0.60	59.39
	180×150	0.24	59.75
93.75	180×50	0.01	93.73
	180×100	0.01	93.73
	180×150	0.04	93.70
135	180×50	2.24	132.75
	180×100	2.62	132.37
	180×150	3.05	131.94



(a)



(b)



(c)

Şekil 7.18 Değişik numunelerde (a) 2.0 m/s, (b) 2.5 m/s ve (c) 3.0 m/s çarpma hızlarında enerji dağılımı

8. SONUÇLAR

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

1. 2 m/s hızda 60 J enerji ile darbe yapıldığında 180x50mm,180x100mm ve 180x150mm numunelerin en büyük temas kuvveti değeri azalmaktadır.

2. 2.5 m/s ve 3 m/s hızlarda 93.75 J ve 135 J enerji ile darbe yapıldığında 180x50mm,180x100mm ve 180x150mm numunelerin en büyük temas kuvveti değeri aynı kalmaktadır. 2.5 m/s ve 3.0 m/s hızlarında elde edilen kuvvet-zaman eğrilerinde bir düzlük oluştuğu görülmüştür. Bu düzlük 3.0 m/s de daha geniş olarak tespit edilmiştir. Bu düzlükler her hız ve numune için 52467.2 N da oluşmuştur. Düzlüklerin oluşmasına sebep olarak kompozit malzemenin darbeye kuvvet olarak daha öte direnmediği, vurucu ile malzeme arasında bir tam yapışma olduğu düşünülmektedir. Vurucu ve zemin rijit olduğundan ötürü malzeme deformasyon olamamakta sadece vurucunun temas ettiği bölgede bir ezilme gerçekleşmektedir.

3. 60 J ,93.75 j ve 135 j enerji ile180x50mm,,180x100mm ve 180x150mm numunelere darbe yapıldığında en büyük temas süreleri ortalama değerden ±%1 sapma yapmaktadır.

4. Darbe enerjisi arttıkça hasar alanının arttığı görülmektedir. Elde edilen hasar alanlarında aynı darbe enerjisinde değişik numuneler için ortalama değerden ±%3 sapmalar görülmektedir. Bunun nedeni hasar alanlarının hesaplanmasındaki hatalardan kaynaklandığı düşünülmektedir. Numune boyutunun hasar alanına bir etkisi olmadığı görülmüştür.

5. İmpuls kuvveti yamuklar kuralı yardımıyla eğri altında kalan alanın tespit edilmesiyle bulunmuştur.(kuvvet-zaman eğrisinin altında kalan alan)

Farklı boyutlardaki deney numuneleri için impuls kuvveti aynı çarpma hız değerlerinde(darbe enerjilerinde) %0.2 farklar çıkmıştır. Bu bize numune ebatlarının impuls kuvvetini etkilemediğini göstermektedir.

6. Çarpma hızı arttıkça darbe enerjisi artacağından dolayı impuls kuvveti değerinin arttığı görülmüştür.

7. 180×50 mm ,180×100 mm ve 180×150 mm boyutlarındaki numunede sıçrama enerjisi 2.0 m/s ,2.5 m/s ve 3.0 m/s çarpma hızında yaklaşık olarak eşit olduğu görülmektedir. Darbe enerjisi arttıkça yutulan enerji oranının artması numunelerde oluşan hasarında arttığını göstermektedir.

60 J darbe enerjisi için 180×50 mm ,180×100 mm ve180×150 mm boyutlarındaki numunelerde yutulan enerji ve sıçrama enerjisi değerleri arasında % 0.4 fark oluşmaktadır.

93.75 J darbe enerjisi için 180×50 mm ,180×100 mm ve180×150 mm boyutlarındaki numunelerde yutulan enerji ve sıçrama enerjisi değerleri arasında % 0.1 fark oluşmaktadır.

135 J darbe enerjisi için 180×50 mm ,180×100 mm ve180×150 mm boyutlarındaki numunelerde yutulan enerji ve sıçrama enerjisi değerleri arasında % 0.42 fark oluşmaktadır.

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 Pres. 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.

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

Hsseinzadeh, 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.

Kara M. (2004) Yüksek Lisans Tezi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya

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.

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

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

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

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.

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

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

Uyaner, M., & Kara, M. (2007). Dynamic Response of Laminated Composites Subjected to Low-velocity Impact. Journal of Composite Materials. 41, 2877-2896.

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