

T.C

SELÇUK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**E-CAMI/EPOKSİ TABAKALI KOMPOZİTLERDE DÜŞÜK HIZLI
DARBE HASARININ BURKULMA ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**

MEHMET METİN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

KONYA 2008

T. C.
SELÇUK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**E-CAMI/EPOKSİ TABAKALI KOMPOZİTLERDE DÜŞÜK HIZLI DARBE
HASARININ BURKULMA ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**

Mehmet METİN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Bu tez 07.01.2008 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği / oyçokluğu ile kabul edilmiştir

Prof. Dr. Ahmet AKDEMİR
(Üye)

Yrd. Doç. Dr. Ahmet YAPICI
(Danışman)

Yrd. Doç. Dr. Mesut UYANER
(Üye)

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

E-CAMI/EPOKSİ TABAKALI KOMPOZİTLERDE DÜŞÜK HIZLI DARBE HASARININ BURKULMA ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

Mehmet METİN
Selçuk Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Yrd.Doç. Dr. Ahmet YAPICI
2008- 97 Sayfa

Juri: Prof.Dr. Ahmet AKDEMİR
Yrd. Doç.Dr. Ahmet YAPICI
Yrd. Doç.Dr. Mesut UYANER

Bu tezin amacı, düşük hızlı darbeye hasarlı E-camı/epoksi tabakalı kompozitlerin burkulma davranışının araştırılmasıdır. Kompozit malzemelerde bir darbe sonucunda oluşan hasar, çarpmanın türüne göre darbeye maruz kalmayan yüzeyde meydana gelebilir veya içyapıda tabakalar arası ayrılma şeklinde oluşabilir. Bu çalışmada değişik hızlarda düşük hızlı darbe hasarı meydana gelmiş cam epoksi tabakalı kompozitlerin burkulma yüklerindeki değişim deneysel olarak gözlenmiştir. Tek yönlü takviyelendirilmiş tabakacıklar $[0^\circ, -45^\circ, +45^\circ, 0^\circ, 90^\circ, +45^\circ, -45^\circ, 0^\circ]_s$ şeklinde düzenlenerek E-camı/epoksi tabakalı kompozit malzeme üretilmiştir. Darbe testleri özel olarak imal edilen düşey ağırlık düşürme test cihazı ile yapılmıştır. Darbe testlerinde kullanılan darbe ucu 24 mm çapında, yarı küresel uçlu bir geometriye sahiptir. Darbe ucu kütlesi 17 kg'dır. 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0m/s'lik çarpma hızlarında testler yapılmıştır. Çalışmalarda 140×140 mm boyutlarında dört tarafı ankastre kompozit levhalar kullanılmıştır. Darbe her bir levhanın merkezine yapılmıştır. Farklı deney numuneleri için kuvvet-zaman değerleri deneylerden elde edilmiş, kuvvet-deformasyon, enerji-hasar alanı gibi değişimler hesaplanarak grafikler elde edilmiştir. Hasarlı numuneler burkulma yüküne maruz bırakılarak hasar alanının burkulma yükü üzerindeki etkisi belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Epoksi matrisli kompozitler, düşük hızlı darbe, burkulma

ABSTRACT
Master of Science Thesis

**THE EFFECT OF LOW-VELOCITY IMPACT DAMAGE ON BUCKLING
BEHAVIOUR OF E-GLASS EPOXY LAMINATED COMPOSITES**

Mehmet METİN
Selcuk University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Ahmet YAPICI
2008- 97 Pages

Jury: Prof.Dr. Ahmet AKDEMİR
Assist. Prof. Dr. Ahmet YAPICI
Assist. Prof. Dr. Mesut UYANER

The aim of this study is investigation of buckling behavior of low velocity impact damaged E-glass/epoxy laminated composites. The damage in composite materials results of an impact can be taken place on a surface that is not subjected to any impact according to the type of the strike, and it can be started in a manner of delaminations. Buckling loads variation of damaged glass-epoxy laminated composites were observed experimentally. $[0^\circ, -45^\circ, +45^\circ, 0^\circ, 90^\circ, +45^\circ, -45^\circ, 0^\circ]_s$ oriented uni-directionally reinforced E-glass/epoxy laminates were used for the study. The impact tests were conducted with a specially developed vertical drop weight testing machine. Impact tests were performed at impactor mass of 17 kg and impact velocities of 2.0, 2.5, 3.0, 3.5 and 4.0 m/s. Hemispherical impactor, 24 mm in diameter was used in all tests. The tests were carried out on plate dimensions of 140×140 mm with four opposite ends were clamped and impact load were applied at the center of each plate. Force-time data obtained from experiments and such as force-deformation, absorbed energy-damage area variation calculated and those were given in forms of graphs. Damaged laminates were subjected to buckling loads. Effects of the damage area on the buckling load were determined.

Keywords: Epoxy matrix composites, low-velocity impact, dynamic response

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın tamamlanmasında her türlü desteği esirgemeyen tez danışmanım Sayın Yrd. Doç. Dr. Ahmet YAPICI'ya minnet ve şükranlarımı sunarım.

Çalışmaların gerçekleşmesi için deney tesisatını kullandıkları ve bilgi ve tecrübelerini bizimle paylaştıkları için Yrd. Doç. Dr. Mesut UYANER ve Öğr. Gör. Memduh KARA hocama, numunelerin hazırlanmasında bilgilerinden ve tecrübelerinden faydalandığım Prof.Dr. Ahmet AKDEMİR ve Prof.Dr. Ahmet AVCI hocama, BAP desteği için yardımlarını esirgemeyen Prof Dr. Şefik BİLİR hocama ve BAP Müdürü Gürol ÖNAL hocama, yüksek lisans arkadaşım İbrahim YÜCE' ye, BAP desteğinin alınmasında gerekli resmi işlemleri gerçekleştiren babam Mustafa METİN'e, cihazın mekanik aksamının tasarlanmasında yardımcı olan Mak. Müh. Recep GÖRK'e, Mak. Müh. Sami ŞAHİN'e, elektrik ve elektronik aksamın tasarlanmasında Samur elektronik çalışanlarına yardımlarından dolayı teşekkür ederim.

Ayrıca, bu çalışmalarım süresince büyük bir sabırla bana destek olan eşim Elif'e, ablam ve anneme sonsuz teşekkür ederim.

1.	GİRİŞ.....	1
2.	KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	4
3.	KOMPOZİT MALZEMELER.....	8
3.1.	Kompozit Malzemelerin Tanıtımı.....	8
3.2.	Matris Malzemeleri.....	9
3.2.1.	Plastik Matrisler.....	10
3.3.	Takviye Malzemeleri.....	11
3.4.	Tabakalı Kompozitler.....	14
3.4.1.	Polimer Esaslı Tabakalı Kompozit Malzemeler.....	14
4.	DARBE MEKANİĞİ.....	16
4.1.	Giriş.....	16
4.2.	Düşük Hızlı Darbenin Mekanikliği.....	16
4.3.	Katı Cisim Darbesinin Tanımı.....	17
4.4.	Katı Cisim Darbe Mekanikliğinin Dayandığı Esaslar.....	18
4.5.	Dinamiğin İlkeleri.....	20
4.5.1.	Parçacık Kinetiği.....	20
4.6.	Merkezi Çarpışma İçin Katı Cisim Teorisi.....	22
4.6.1.	Doğrudan Darbenin İzafi Hareket Denklemi.....	22
4.6.2.	Çarpışmanın Sıkışma Ve Geri Bırakma Aşamaları.....	25
4.6.3.	Normal Temas Kuvvetinin İşii.....	28
4.7.	Serbest Düşme Hareketi.....	28
4.8.	Darbe Enerjisi.....	29
5.	TABAKALI KOMPOZİT MALZEMELERİN DARBE DAVRANIŞI.....	30
5.1.	Düşük Hızlı Darbenin Belirlenmesi.....	31
5.2.	Enine Darbe.....	31
5.3.	Darbe Testleri.....	32
5.4.	Tabakalı Kompozit Malzemelerde Darbe Sonucu Oluşan Hasar Modları... ..	35
5.4.1.	Matris Hasarı.....	36
5.4.2.	Delaminasyon.....	38
5.4.3.	Elyaf Kopması.....	39
5.4.4.	Nüfuziyet.....	39
6.	HASAR TAHMİNİ.....	40
6.1.	Giriş.....	40
6.2.	Kalın Tabakalarda Hasar.....	41
6.3.	İnce Tabakalarda Hasar.....	43
6.4.	Hasar Başlangıcı.....	45
6.5.	Darbe Esnasında Delaminasyonların İlerlemesi.....	48
6.6.	Hasar Tahmini Sonuçları.....	52
7.	BURKULMA.....	53
7.1.	İnce Film Tabakası Ayrılması.....	55
7.2.	Delaminasyona Uğramış Plakaların Burkulması.....	58
8.	DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	64
8.1.	Deney Numunesinin Hazırlanması.....	64
8.2.	Yakma Deneyi.....	66
8.3.	Düşük hızlı darbe deneyi.....	67
8.3.1.	Ağırlık Düşürme Test Cihazı.....	67
8.3.2.	Düşük Hızlı Darbe Deneyinin Yapılması.....	72
8.3.3.	Kalibrasyon.....	73

8.4.	Burkulma deneyi	74
8.4.1.	Burkulma deney tesisatı.....	74
8.4.2.	Burkulma deneyinin yapılması	75
9.	DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME	76
9.1.	Darbe ucu ile Deney Numunesi Arasındaki Temas Kuvvetleri.....	76
9.1.1.	Çarpma Hızının Temas Kuvvetine Etkisi.....	78
9.2.	Kinetik Analiz Neticesinde Elde Edilen Değerler	79
9.2.1.	İvme – Zaman Değişimi	80
9.2.2.	Hız – Zaman Değişimi.....	80
9.2.3.	Yer Değiştirme – Zaman Değişimi	81
9.2.4.	Kuvvet–Yer Değiştirme Değişimi.....	82
9.3.	İmpuls Kuvveti.....	82
9.4.	Düşük Hızlı Darbede Enerji Dağılımı ve Hasar Bölgeleri	83
9.5.	Darbe hasarlı numunelerin burkulma davranışları.....	86
10.	SONUÇLAR.....	92
11.	KAYNAKLAR	94

1. GİRİŞ

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

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

Tabakalı kompozitler birçok mühendislik alanında kullanılır ve yabancı cisimler tarafından darbeye maruz kalabilirler. Darbeden kaynaklanan hasar, üretim, bakım ve servis işlemleri sırasında ortaya çıkabilir. Kullanım sırasındaki darbeye örnek olarak uçağın kalkış ve iniş sırasında lastiklerin yüksek hız kazanmasından sonra pistten fırlayan taş ve küçük parçacıkların yaptığı darbe verilebilir. Üretim ve bakım sırasında kullanılan takımlar yapı üzerine düşürülebilir. Bu durumda darbe hızları küçük fakat

etkisi büyüktür. Tabakalı kompozit yapılar benzer metalik yapılara nazaran darbe hasarına daha duyarlıdır. Kompozit yapılarda darbe gözle muayenede belirlenemeyen iç hasarlar oluşturur. Bu iç hasar mukavemette azalmaya sebep olur ve yük altında büyür. Bu nedenle kompozit yapılar üzerine yabancı cisim darbelerinin etkileri anlaşılmalıdır ve tasarım aşamasında uygun önlemler dikkate alınmalıdır. Darbelerin kompozit yapıların performansına etkileri kompozit malzemelerin kullanımında kısıtlayıcı bir etkendir. Bu nedenlerle kompozit malzemelerin düşük hızlardaki darbe problemi önemli pratik ve teorik uygulamaları temsil eder.

Darbe üretmek için birçok test tekniği kullanılmaktadır. Bununla birlikte kompozit malzemelerin darbe davranışını karakterize etmek için standart bir test tekniği veya farklı ülkeler, kuruluşlar ve araştırmacılar arasında yaygın bir şekilde kabul edilen herhangi bir teknik mevcut değildir. Bu durum, farklı kaynaklardan alınan sonuçların karşılaştırılacağı zaman problem oluşturmaktadır. Çünkü kompozit malzemelerin darbe cevabı için uygun bir model geliştirme girişimleri zorlaşmaktadır. Bu olumsuzluklara rağmen kompozit malzemelerin darbe dirençlerinin belirlenmesi amacıyla günümüzde çeşitli şekillerde geliştirilen test cihazları yaygın olarak kullanılmaktadır.

Burada kullanılan tamir dizaynlarının farklı tipleri tartışılacaktır. Avantajları ve sakıncaları karşılaştırılacaktır. Ek yeri dizaynı, malzeme seçimi ve tamir prosesi prosedürleri de gözden geçirilecektir.

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

Bu çalışmada kullanılmak üzere İzoreel firmasında 16 tabakalı E camı/epoksi kompozit malzeme üretilmiştir. 16 tabakalı malzeme

$[0^\circ, -45^\circ, +45^\circ, 0^\circ, 90^\circ, +45^\circ, -45^\circ, 0^\circ]_s$ şeklinde tek yönlü güçlendirilmiş kompozit malzeme olarak bu çalışmada kullanılmıştır.

Aynı boyuttaki deney numunelerine farklı hızlarda düşük hızlı darbeler yapılmıştır. Darbe sonucu kuvvetin zamana göre değişimini veren grafikler elde edilmiştir. Ayrıca ivme-zaman, hız zaman, yer değiştirme-zaman ve kuvvet-yer değiştirme grafikleri çıkarılmıştır. Darbe enerjisinin ne kadarlık bir kısmının malzeme tarafından yutulduğu tespit edilmiştir. Malzemedeki hasar bölgeleri incelenmiş ve oluşan hasar modları tespit edilmiştir. Daha sonra hasara uğramış bu numuneler burkulma testlerine tabi tutulmuşlardır. Sonuç olarak hasarlı numunelerinin burkulma yüklerinde ne kadarlık bir değişme olduğu analiz edildi. Hasarın burkulma yüküne etkisi yorumlandı.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

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

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

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

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

enine darbeye maruz kompozit plakaların dinamik şekil değiştirmesinden yeni bir analitik metot geliştirmişlerdir.

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

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

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

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

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

Hosseinzadeh ve ark. (2005) fiberle güçlendirilmiş kompozit levhaların düşen ağırlık darbelerindeki hasar cevabını incelemişlerdir. Dört farklı fiberle güçlendirilmiş tabakalı kompozit plakalara düşük hızlı darbeler yapmışlardır. Numunelerdeki hasar bölgelerinin haritalarını çıkararak darbe enerjisi-hasar çapı değişimi elde etmişlerdir. Farklı numunelerdeki değişimleri rapor etmişlerdir. Sugun ve Rao (2004) cam, karbon ve kevlar takviyeli kompozitlere tekrarlı düşürme testleri yaparak düşük hızlı darbe karakteristiklerini çalışmışlardır. Kompozit plakalar üzerine delinme oluncaya kadar tekrarlı darbeler yapmışlardır. En büyük kuvvet-darbe sayısı değişimi ve darbe enerjisi-darbe sayısı değişimlerini deneysel olarak tespit etmişlerdir. Son darbeden sonra numunelerdeki hasar bölgelerinin haritaları çıkarılarak incelenmiştir.

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

Uyaner ve Kara düşük hızlı darbeye maruz E-camı/epoksi tabakalı kompozitlerin dinamik davranışını incelediler. Tek yönlü takviyelendirilmiş tabakacıklar $[0^\circ, -45^\circ, +45^\circ, 0^\circ, 90^\circ, 0^\circ, +45^\circ, -45^\circ, 0^\circ]_s$ şeklinde düzenlenerek

E-camı/epoksi tabakalı kompozit malzeme ürettiler. Darbe testleri özel olarak imal edilen düşey ağırlık düşürme test cihazı ile yaptılar. 24 mm çapında, yarı küresel uçlu bir geometriye sahip vurucu uc kullandılar. Vurucu kütlesi 30 kg'dı. 2.0, 2.5 ve 3.0 m/s'lik çarpma hızlarında testler yaptılar. Çalışmalarda 180×50 mm, 180×100 mm, 180×150 mm boyutlarında iki tarafı serbest iki tarafı ankastre kompozit levhalar kullandılar ve darbe her bir levhanın merkezine yaptılar. Farklı deney numuneleri için zamana göre kuvvet değişimini veren grafikler elde ettiler.

3. KOMPOZİT MALZEMELER

3.1. Kompozit Malzemelerin Tanıtımı

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

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

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

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

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

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

3.2. Matris Malzemeleri

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

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

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

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

3.2.1. Plastik Matrisler

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

3.2.1.1. Termoset matrisler

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

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

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

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

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

3.3. Takviye Malzemeleri

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

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

Cam elyafla kuvvetlendirilmiş plastiklerin rijitlik/yoğunluk oranları, metallerin rijitlik/yoğunluk oranına göre daha düşüktür. Cam elyaflar çok yüksek kimyasal dirence sahiptirler. Su absorbe etmezler. Fakat çekme dayanımları nemli ortamda azalır.

Cam elyafların sürünmeye karşı direnci ve rijitliği sıcaklık arttıkça azalır. Bununla birlikte faydalı kullanım sıcaklık aralığı oldukça büyüktür. Cam 500 °C'ye kadar yumuşamaz.

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

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

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

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

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

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

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

3.4. Tabakalı Kompozitler

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

Tabakalı kompozit malzemeler en az iki tabakadan oluşurlar. Ancak, dayanım ve mekanik özelliklerin özellikle önem taşıdığı hallerde, malzemenin bu özelliklere sahip olabilmesi için en az üç veya daha fazla tabaka kullanılmaktadır. Bu tabakaları oluşturan malzemeler farklı olabileceği gibi, aynı tür malzemedenden de yapılabilmektedir.

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

Tabakalı kompozitlerin üretiminde farklı türden veya tek bir türden malzeme kullanılabilir. Tabakalı kompozitleri, üretimde kullanılan malzemelerin türlerinden hareketle,

- Farklı malzemelerden oluşan tabakalı kompozit malzemeler
 - Tek tür malzemelerden oluşan tabakalı kompozit malzemeler,
- şeklinde iki grupta toplamak mümkündür.

3.4.1. Polimer Esaslı Tabakalı Kompozit Malzemeler

Çeşitli polimer malzeme katmanlarının bir arada kullanılmasıyla çeşitli kompozit malzemeler üretilmektedir. Cam lifi veya asbest lifi dokumaların silikonlara

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

4. DARBE MEKANİĞİ

4.1. Giriş

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

4.2. Düşük Hızlı Darbenin Mekaniği

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

Darbe sırasında her bir anda, arayüz veya temas basıncı çarpışan iki cisimde zıt doğrultularda etki eden bir etki veya tepki bileşke kuvvetine sahiptir, böylece cisimlerin birbirine geçmesine karşı direnme oluşur. Başlangıçta nüfuziyetin artmasıyla kuvvet de artar ve bu kuvvet birbirine yaklaşan cisimlerin süratini azaltır. Darbe olayında belli bir anda temas kuvvetlerinin yaptığı iş her iki cismin süratini 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 azalır. 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 yay benzer. Bu yay büyük bir yay sabitine sahip olup çok küçük bir temas süresine izin verir. Mesela sopa ile hızlı bir şekilde vurulmuş beyzbol topunda temas süresi 2.0 ms iken, çelik bir çekiç ile vurulan bir çivideki temas süresi 0.2 ms'dir. Çekiç ile çivi arasındaki temas süresi azdır çünkü çarpışan cisimler, top ve sopaya nazaran daha sert malzemelerden yapılmıştır. Her iki çarpışma 10 kN (kabaca 1 ton) civarında bir en büyük kuvvet doğurur.

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

4.4. Katı Cisim Darbe Mekaniğinin Dayandığı Esaslar

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

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

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

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

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

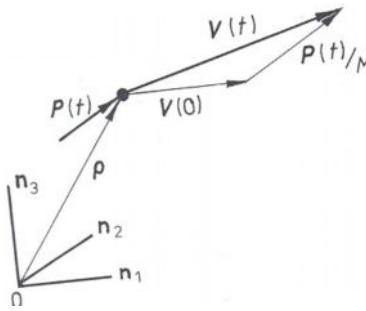
Temas süresince önemli etkin kuvvetler sadece cisimlerin temas noktalarındaki tepki kuvvetleridir. Bu tepkiler yer değiştirmenin kısıtlanmasından kaynaklanmaktadır.

Katı cisim teorisini kurarak çarpışan iki cisimi 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 yüzeyle 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 \mathbf{V} hızıyla hareket ediyorsa $M\mathbf{V}$ momentumuna sahiptir. Eğer bir parçacığa \mathbf{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 $\mathbf{P}(t)$ impulsundan kaynaklanan değişim

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

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

Genellikle parçacığın kütlesi sabit olduğundan hızdaki değişimi $\mathbf{P}(t)$ impulsunun sürekli bir fonksiyonu olarak elde etmek için (1.1) denkleminin entegrali alınabilir.

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

Bu vektör ifadesi Şekil 4.1' de gösterilmiştir.

Çarpışan B ve B' parçacıklarının $t=0$ zamanındaki etkileşimi karşılıklı olarak birbirlerine etki eden $\mathbf{F}(t)$ ve $\mathbf{F}'(t)$ 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 halükarda 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.

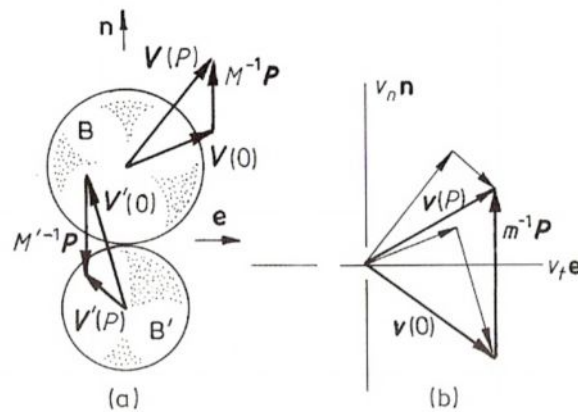
$$\mathbf{F}' = -\mathbf{F} \quad (4.3)$$

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.

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

burada m , etkin küttedir. Durağan bir referans sistemindeki $\mathbf{V}(t)$ hız değişkeninin izafi hız $\mathbf{v}(t)$ 'ye dönüşmesi Şekil 4.2'de gösterilmiştir. (4.4) denklemi izafi hareketin denklemi olup temas sürecinin limitte sifira 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 \mathbf{P} impulsları çarpışan M ve M' kütleli iki cisimde sırasıyla $M^{-1} \cdot \mathbf{P}$ ve $M'^{-1} \cdot \mathbf{P}$ kadar hız değişimine sebep olur. **(b)** Kalın çizgiler başlangıç izafi hız $\mathbf{v}(0)$, son izafi hız $\mathbf{v}(P)$ ve izafi hızdaki değişim $m^{-1} \mathbf{P}$ yi gösteriyorken ince çizgiler her bir cismin başlangıç ve son hızlarını göstermektedir.

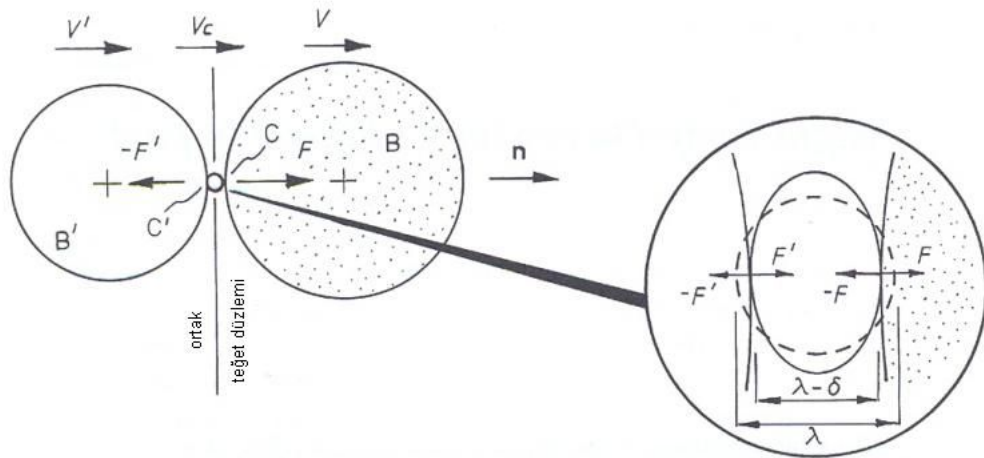
4.6. Merkezi Çarpışma İçin Katı Cisim Teorisi

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 \mathbf{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 \mathbf{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 $\mathbf{F}(t)$ ve $\mathbf{F}'(t)$ temas kuvvetlerine maruzdur. Bu kuvvetlerin normal bileşenleri sırasıyla $F(t) \equiv \mathbf{F}\mathbf{n}$ ve $F'(t) \equiv \mathbf{F}'\mathbf{n}$ 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 \mathbf{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

$$v = V - V' \text{ olsun.}$$

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 impulsların 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,

$$dv = m^{-1} dp \quad (4.5)$$

Buradaki etkin kütle m şu şekilde tanımlanır,

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

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

$$v = v_0 + m^{-1} p \quad \text{burada} \quad v_0 < 0 \quad (4.7)$$

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 kütleinin 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 yi 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.

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

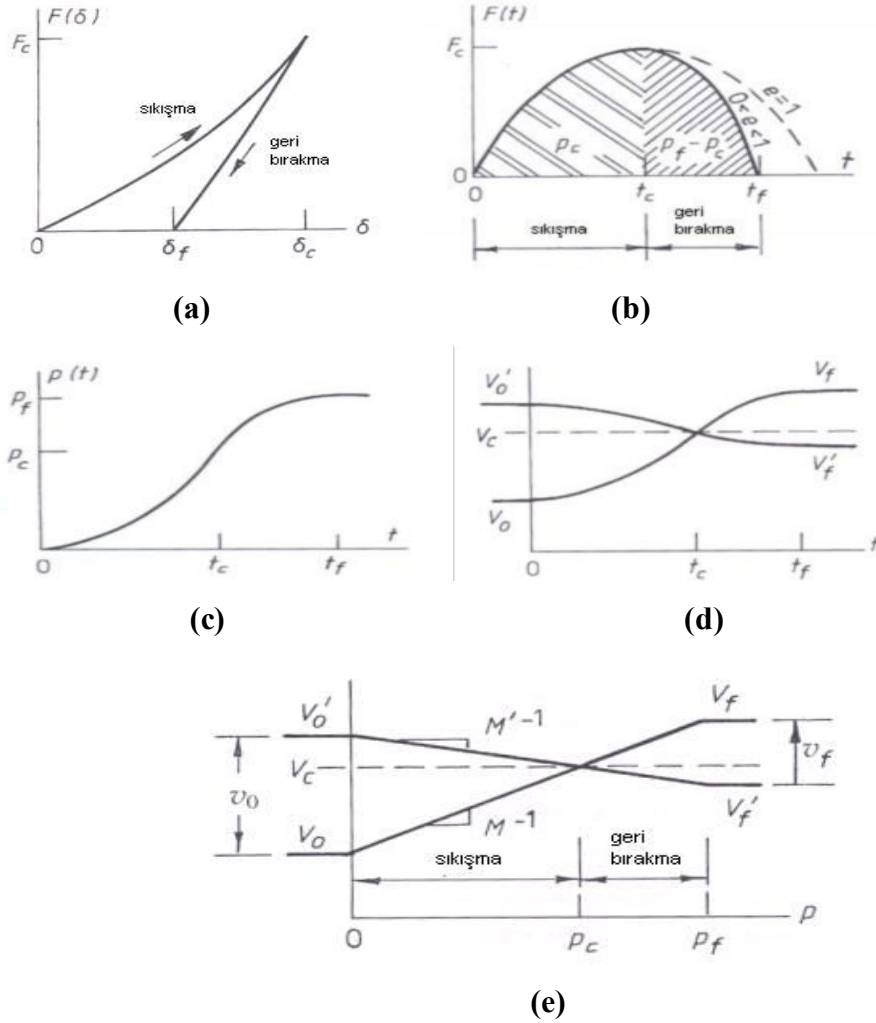
Çarpmadan sonra herhangi bir t zamanında temas kuvveti F nin normal bileşenin Şekil 4.4b deki eğrinin altında kalan alana eşit olan bir impulsu vardır (Kuvvetin impulsu, impuls kuvveti olarak ta anılır). Normal kuvvet her zaman basma olduğundan, impulsun normal bileşeni Şekil 4.4c'de gösterildiği gibi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

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

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

sıkışmanın normal impulsu, etkin kütle ile C deki başlangıç izafi hızının çarpımına eşit olur,

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



Şekil 4.4 (a) izafi yer değiştirme δ nin (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

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_n hesaplanabilir:

$$W_n = \int_0^t Fv dt' = \int_0^p v dp' \quad (4.8)$$

4.7. Serbest Düşme Hareketi

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

$$v = v_0 - gt \quad (4.9)$$

$$v_{ort} = \frac{v_0 + v}{2} \quad (4.10)$$

$$y = -\frac{1}{2}gt^2 + v_0t + y_0 \quad (4.11)$$

$$v^2 = v_0^2 - 2g(y - y_0) \quad (4.12)$$

Serbest düşmede ilk hız sıfır olduğu için;

$$v = \sqrt{2gh} \quad (4.13)$$

4.8. Darbe Enerjisi

h yüksekliğinde darbe ucu kütesinin sahip olduğu potansiyel enerji ise;

$$\Pi = m.g.h \quad (4.14)$$

Tablo 7 de her bir çarpma hızı için Denklem (4.13) ve Denklem (4.14) kullanılarak hesaplanan darbe ucu kütesinin 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	36,00
2,5	31,8	56,13
3	45,3	79,95
3,5	62,5	110,31
4	81,6	144

5. TABAKALI KOMPOZİT MALZEMELERİN DARBE DAVRANIŞI

Mühendislik uygulamalarında, özellikle de mekanik uygulamalarda, dışarıdan gelecek herhangi bir darbeye karşı beklenmedik sonuçların ortaya çıkmaması için, malzemenin gerekli en uygun cevabı veya davranışı verebilmesi istenir. Uygulama yerine ve kullanım amacına göre malzemenin maruz kalabileceği darbeler çok farklı şekillerde olabilir. Buna karşın darbeye karşı olan cevap da malzemenin kendisi tarafından belirlenir. Şöyle ki, metal ve metal alaşımları durumunda darbeye karşı malzemenin cevabı; elastik uzama ve plastik şekil değiştirme şeklinde meydana gelir ve darbe hasarı, çoğunlukla, çarpma yüzeyinde başladığı anda kolay bir şekilde tespit edilebilir. Darbe hasarı, metal malzemelerde genellikle bir tehlike işareti olarak kabul edilmez, çünkü metaller plastik şekil değiştirebilme kabiliyetlerinden dolayı, büyük miktarda enerjiyi soğurabilir. Metaller sabit bir gerilme durumunda yapı sertleşmeden önce çok büyük uzamalarda akabilirler, bu nedenle oluşacak kopmalar ani ve beklenmedik olmaz.

Kompozit malzemelerde bir darbe sonucunda oluşan hasar, çarpmanın türüne göre darbeye maruz kalmayan yüzeyde meydana gelebilir, içyapıda oluşan delaminasyonlar (tabakalar arasında ayrılma) şeklinde başlayabilir. Yukarıda da bahsedildiği gibi metallerde darbe cevabı, plastik şekil değiştirme sonucunda bir kopma şeklinde olmasına rağmen, kompozitler çok değişik modlarda hasara uğrayabilirler ve bu hasar modlarında parçanın yapısal bütünlüğünde ciddi bir değişiklik meydana gelmez. Genellikle gözle görülmeyen veya çok zayıf bir şekilde görülebilen hasarlar meydana gelir. Plastik matrisli kompozit malzemeler enerjiyi elastik deformasyon ve bazı hasar mekanizmaları (matris çatlaması, delaminasyon, fiber kopması v.b) sayesinde soğurabilirler. Tabakalı kompozit malzemedeki, eğer kalınlık boyunca bir takviye söz konusu değil ise, en büyük darbe hasarı enine doğrultuda olacaktır. Bunun en önemli

nedenlerinden birisi, enine doğrultudaki malzeme elastik özelliğinin düşük olmasıdır. Bu nedenle bir kompozit malzemenin enine hasar direnci nispeten zayıftır. Tabakalar arası gerilmeler (kesme ve normal) tabakalar arası mukavemetin düşük olmasından dolayı ilk kopmalara sebep olan gerilmelerdir. Darbe esnasında kompozit malzemeye aktarılacak enerjinin miktarı, malzemenin bu enerjiyi sönmüleyebilmesi için oluşacak hasar modlarını belirleyecektir. Bu nedenle tabakalı bir kompozit malzemede darbenin oluşturacağı hasarı tahmin etmek için darbe hızının belirlenmesi çok büyük bir öneme sahiptir.

5.1. Düşük Hızlı Darbenin Belirlenmesi

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

5.2. Enine Darbe

Kompozit malzemelerin en hassas oldukları yükleme durumu düzlem dışına doğru (tabaka veya fibere dik yükleme) olandır çünkü kalınlık doğrultusunda tabaka düzleminde olduğundan daha zayıftırlar.

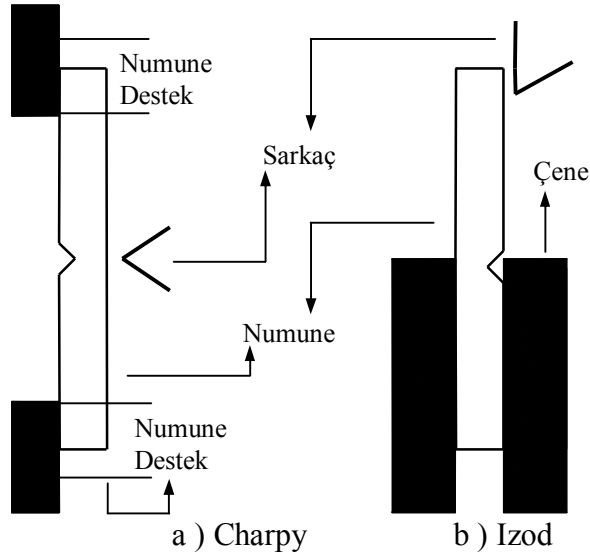
Sonuç olarak, enine darbeye maruz kalan kompozit malzemeler, toplam yük taşıma kapasitelerinde önemli düşüŖlere sebep olan hasarlara uğrarlar. Kompozit malzemelerin bu darbe yüklerine karşı göstermiş oldukları cevap çok karmaşıktır. Bu, kompozit malzemeyi meydana getiren her bir bileşenin kendi özellikleri kadar yapılandırılmasına da bağlıdır. Ayrıca, darbeye verilen cevap çarpan cismin geometrisine, hızına ve kütlesine de bağlıdır. Her biri enine darbenin toplam etkisini nitelendirme de önemli bir rol oynar. Darbe yüklemesi altında çarpan cismin gözle görülemeyen veya zayıf şekilde seçilebilen nüfuziyetine kadar değişebilen farklı şekillerde hasar modları mevcuttur. Düşük hızlı darbeler tabakalar üzerinde gözle görülen hasarlar oluşturmayabilirler. Fakat tabaka içerisinde, matris çatlaması, delaminasyon, fiber kopması şeklinde hasarlara sebep olabilirler. Bu da mukavemette önemli derecede bir düşüŖe sebep olur. Rijitlikte azalma da mümkündür fakat genellikle ihmal edilebilir seviyededir. (Ceyhun ve Turan, 2003).

5.3. Darbe Testleri

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

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

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



Şekil 5.1 Charpy ve Izod darbe test düzenekleri

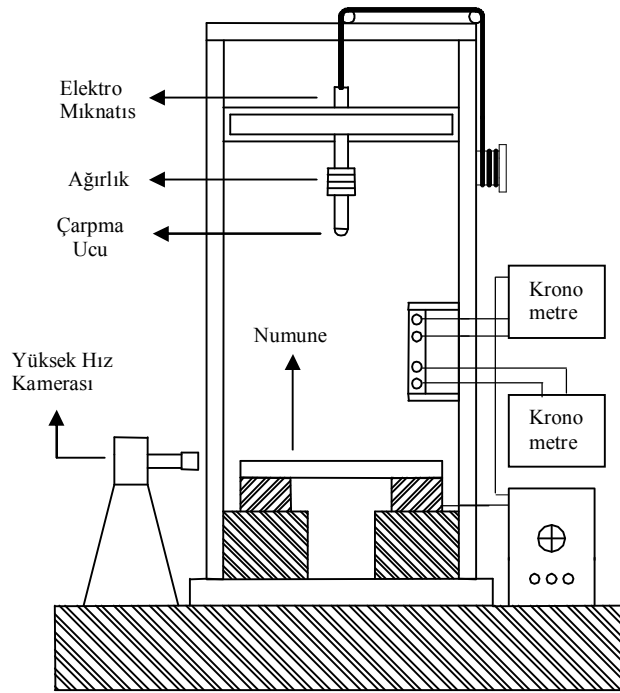
Charpy ve Izod darbe test yöntemlerinde çentik açılmış bir test numunesi, standart bir yükseklikten bırakılan bir sarkaç ile darbeye maruz bırakılır. Darbeden sonra sarkacın çıktığı yükseklik tespit edilerek sarkacın ilk ve son konumdaki enerji farkı numune tarafından soğurulan darbe enerjisi olarak ölçülür. Darbeden sonraki sarkacın yüksekliği ne kadar az ise, 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). Bu test yöntemleri ile elde edilmiş bazı sonuçlar Çizelge 5.1’de görülmektedir. (Ceyhun ve Turan, 2003).

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

Malzeme	Darbe Enerjisi (kJ/m ²)	
	Charpy	Izod
S-Cam/Epoksi(%55 fiber)	734	-
B / Epoksi (%55 fiber)	109-190	-
Kevlar/Epoksi (%60 fiber)	317	158
AS Karbon/Epoksi (%60 fiber)	101-132	33-67
HMS Karbon/Epoksi (%60 fiber)	23	7.5
4340 Çelik (Rc=43-46)	214	-
7075-T6 Alüminyum Alaşımı	153	-
6061-t6 Alüminyum Alaşımı	67	-

Son yıllarda kompozit malzemelerin düşük hızdaki darbe testlerini karakterize etmek için sarkaç veya ağırlık düşürme darbe test cihazlarının bir araya getirilmesiyle oluşturulmuş darbe test cihazlarının kullanımı giderek artmaktadır. Ağırlık düşürme test yöntemi, kompozit malzemelerin darbe testleri için tercih edilen yöntem olmaya başlamıştır. Bunun en önemli sebebi daha geniş bir alanda test parametrelerinin belirlenmesi mümkündür ve sonuçlar çok daha kolay analiz edilebilmektedir.

Bu cihazların bazıları yer değiştirmeyi veya ivmeyi ölçmektedirler. Bu sayede yük, yer değiştirme ve ivmenin çarpma anındaki değişimi kaydedilir. Bu sonuçlar, darbe yükü-zaman ve darbe enerjisi-zaman değişimlerine dönüştürülebilir. Bunlar sayesinde, en uç noktadaki yük ve soğurulan enerji gibi özellikler malzemede meydana gelen kırılma işlemiyle ilişkilendirilebilirler. Tipik bir ağırlık düşürme test cihazı Şekil 5.2’de görüldüğü gibidir. Böyle bir cihazı meydana getiren donanım: platformlarla desteklenen numune, tüp içerisine yerleştirilen yük ölçme cihazları (yük hücresi), çarpışmadan hemen önceki tüp hızını ölçmeye yarayan fotoelektrik hücreler ve darbe olayını görüntülemek için kullanılan yüksek hız kamerasıdır.



Şekil 5.2 Ağırılık düşürme test düzeneği

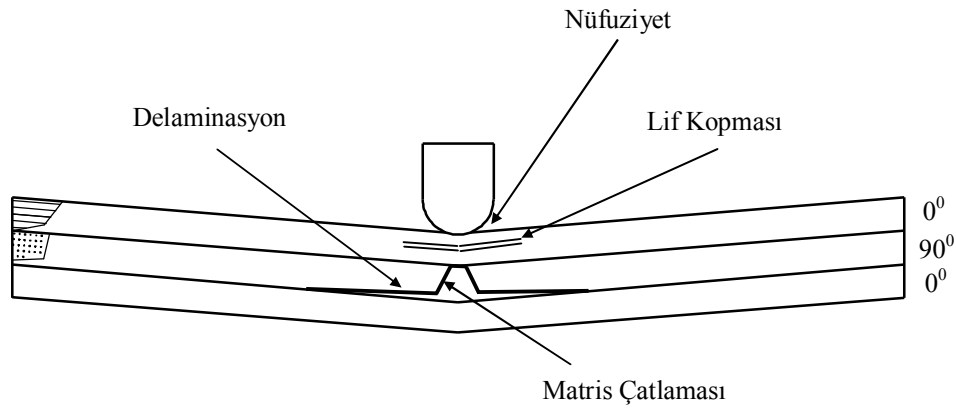
Kompozit malzemelerin darbe özelliklerini darbe test cihazı (serbest ağırlık düşürme, sarkaç, silah v.b), çarpan cismin karakteristiği (içi dolu veya boş, uç şekli ve boyutu v.b), çarpan cismin hızı ve kütlesi (veya enerjisi), numunenin yapılandırması (boyutu, geometrisi, numune ve destek noktalarındaki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

5.4. Tabakalı Kompozit Malzemelerde 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.



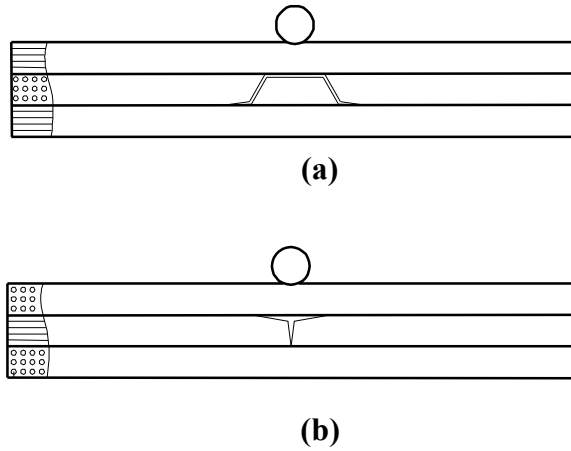
Şekil 5.3 Darbe sonucu kompozit malzemede oluşan hasar çeşitleri

5.4.1. Matris Hasarı

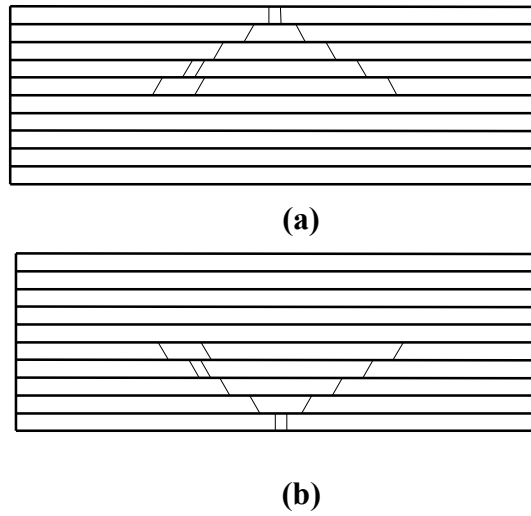
Literatürde rapor edilen darbe testlerinin çoğunluğu, düşük enerjili testleri içerir. Matris hasarı, düşük hızlı enine darbenin oluşturduğu hasarın ilk tipidir ve genellikle matris çatlaması şeklinde meydana gelir. Matris hasarı ayrıca lif ve matris ara yüzeyi arasındaki bağın kopması şeklinde de oluşur. 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 çatlaklığı gözlenir: çekme çatlakları ve kayma çatlakları (Şekil 5.4). Çekme çatlakları, düzlem için normal gerilmelerin tabakacılığın 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 darbe ucunun 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 çatlaklığına 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 çatlaklığı (b) kayma çatlaklığı



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 ayrılımdır. 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 uyumsuzluk ne kadar büyük olursa ki $0^\circ/90^\circ$ 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 $0^\circ/90^\circ/0^\circ$ 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 (Şekil 5.4.a). Oluşan çatlakların ara yüzeye ulaşınca durdurulması; elyaf yönlenmelerindeki değişimden dolayıdır. Bu delaminasyon, ortadaki enine çatlama tarafından zorlanır (Şekil 5.4.b). Düşey eğilme çatlağı büyümesi, zorlanmayan en alt ara yüzey delaminasyonunu başlatır. Delaminasyona önderlik eden matris çatlamları, kritik matris çatlamlarıdır. Delaminasyon, matris çatlamlarından 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 çatlama 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. HASAR TAHMİNİ

6.1. Giriş

Darbe hasarı genellikle birkaç kompleks dağılımı izler. Hasar oluşumuna öncülük eden tüm olaylar dizisini yeniden oluşturmak mümkün olmayabilir. Düşük hızdaki darbeler için hasar, matris çatlamasının oluşumu ile başlar. Bazı durumlarda hedef esnektir ve çatlak, tabakanın alt kısmındaki katmanda çekme gerilmeleri tarafından oluşturulur. Genellikle tabaka düzlemine dik olan bu çatlak “çekme çatlağı” olarak adlandırılır. Kalın tabakalarda çatlaklar, tabaka yüzeyi yakınlarında görünür ve temas gerilmeleri tarafından oluşturulurlar. Kayma çatlakları olarak adlandırılan bu çatlaklar orta düzlemin normaline bağlı olarak artarlar. Matris çatlakları birbirine yapışık plakalar arasındaki ara yüzeyde tabaka ayrılmasını meydana getirir ve alt katmanın üst yüzeyinde yada üst katmanın alt yüzeyinde hasar oluşumunu başlatırlar. Hasarın bir tipinin tahmin edilmesi mümkün olmasına rağmen hasarın son durumu hakkında gerçekçi detaylı bir bilgiye ulaşılamaz.

Darbe hasarının tahmini için iki tip yaklaşım kullanılır. Birinci tip yaklaşım deformasyon modlarını ayrı ayrı göz önünde bulundurmaksızın darbe noktası etrafındaki gerilme dağılımından kaynaklanan hasar alanının toplam boyutunun tahmin edilmesine yöneliktir. Genel bir yaklaşım olarak darbe, darbe noktası yakınlarında yüksek gerilmeler meydana getirir ve bu yerel gerilmeler, çatlakların oluşumunu başlatır, tabaka ayrılmalarını ilerletir ve sonuçta hasarın son halinin oluşmasına neden olurlar. Bölüm 6.2 yarısonsuz cisim gibi davranan kalın tabakalarda hasarın tahmin edilmesi için bu yaklaşımın nasıl kullanılacağını tasvir etmektedir. Bölüm 6.3 te bu yaklaşım, kayma deformasyonuna uğrayabilen tabakalar olarak modellendirilen ince tabakalara uygulanmaktadır.

İkinci yaklaşım uygun bir deformasyon kriterini ve darbe zonunun detaylı 3 boyutlu gerilme analizini kullanarak, genellikle ilk matris çatlağının görünümü olan hasar başlangıcının belirlenmesini kapsayan, darbe hasarının tahmininde kullanılır. Tabaka

ayrılmasının olduğu bölgeler belirlenir ve bu tabaka ayrılmalarının ilerlemesi üzerinde çalışılır. Bu yaklaşım hasar belirlenmesi işleminde yararlı görüşler sağlanmasına ve hangi malzeme özelliklerinin darbe direncine etki ettiğinin anlaşılmasını sağlamasına rağmen dizayn amaçları için pratik değildir. Hasar başlangıcının tahmini için metodlar bölüm 6.4 te mevcuttur ve bölüm 6.5 de mevcut tabaka ayrılmalarının ilerleme durumu incelenecektir.

6.2. Kalın Tabakalarda Hasar

Kalın tabakalar, düşük hızda darbeye maruz kaldıkları zaman eğilme deformasyonu genellikle ihmal edilebilir ve tabakalar yarı sonsuz cisim olarak düşünülebilir. Hertz temas teorisine göre, darbe dinamik analizinden belirlenen maksimum darbe kuvvetinin yüzeye yayıldığı varsayılır. Boussinesq, izotropik malzemelerde, sınırların bir yarısına etki eden yoğunlaşmış kuvvet tarafından oluşturulan gerilmenin hesaplaması için bir çözüm üretti (Timoshenko ve Goodier 1970). Yarı sonsuz cisimde temasın neden olduğu basınç dağılımı ile oluşan gerilmeler, temas bölgesinin entegrasyonu ile bu basit çözüm kullanılarak hesaplanabilir (Love 1929). Bu yaklaşım Poe tarafından (1991a,b) roket motorlarının kabini olarak kullanılan 36mm kalınlıkta grafit epoksi silindirik kabuklarda meydana gelen darbe hasarının tahmin edilmesi için kullanıldı. Tabakalar ortotropik katmanlardan yapıldığı ve homojen izotropik bir cisim olmadığı için sonuçların yalnızca niteliksel olması beklenmektedir. Ayrıca hasar modellenemediği için yalnızca hasar bölgesinin boyutu tahmin edilebilir. Darbe ucu altında kompleks bir gerilme durumu mevcuttur. Deformasyonun tahmin edilmesi için her bir noktadaki asal ve maksimum kayma gerilmeleri belirlenebilir, maksimum basma gerilmesi ve maksimum kayma gerilmesi dağılımı tahmin edilir. Maksimum kayma gerilmesi, yüzeyin altındaki temas zonunun merkez çizgisi boyunca meydana gelir. Maksimum kayma gerilmesi ve maksimum basma gerilmesi kriterleri hasar boyutunun belirlenmesi için kullanılabilir. Hasar, kayma gerilmesi nedeniyle yüzeyin alt kısmında başlar, genişlik ve derinliği kadar darbe ucu yarıçapına orantılı olarak ta artmaya devam eder.

Noktasal bir kuvvet nedeniyle, enine izotropik yarı mesafedeki gerilmeler için Lenkhitskii (1981) tarafından bir kapalı form çözümü oluşturuldu. Hertz temas yükünün oluşturduğu gerilmeler, temas bölgesi üzerindeki noktasal bir yükün gerilme bileşenlerinin

entegrasyonu ile belirlenir. Bu yaklaşım Matemilola ve Stronge (1995) tarafından, anizotropinin temas bölgesindeki gerilme dağılımı üzerindeki etkisinin belirlenmesinde kullanıldı. İç düzlem elastisite modülünün enine elastisite modülüne oranının (E_r/E_z) büyüdüğü zaman yüzey yüklemesinden oluşan radyal ve teğetsel gerilmelerin her ikisi de büyür. İzotropik malzemede oluşan radyal normal gerilme yükleme bölgesinin dışında çekme gerilmesi halini alır. Temas alanının çevresinde maksimum değere sahiptir. Gevrek malzemeler için kırılma, radyal çekme gerilmesinin maksimum değerini aldığı yerde başlar. Camın, temas yüküne maruz kaldığı zaman, üzerinde dairesel çatlak oluşumunun nedeni budur. Enine kayma gerilmesinin maksimum değeri yüzeye altında, temas bölgesinden dışa doğru yarı mesafede oluşur. Anizotropiklik oranı E_r/E_z artarken maksimum kayma gerilmesi de artar ve maksimum kayma gerilmesinin meydana geldiği yüzeyin altındaki derinlik çok daha küçük olur. Enine kayma gerilmelerinin maksimum olduğu yer, kayma kırılmasına karşı hayli hassastır.

İzotropik yada enine izotropik yarı sonsuz katılarda mevcut çözümleri kullanmak için tabaka, homojen katı olarak modellendirilmelidir. Bu çok katlı tabakalar için yapılabilir ve birkaç yazar tabakalandırma işleminin ve malzeme özellikleri verilen eşdeğer katının elastik özelliklerinin tahmin edilmesi için metodlar sundular. Poe tarafından basit bir yaklaşım kullanıldı (1991b). Her bir tabakanın elastik özelliklerinden ($E_1, E_2, \nu_{12}, G_{12}$) yola çıkarak, tabakalaşma teorisi tabakanın iç düzlemindeki elastik sabitlerin ($E_x, E_y, \nu_{xy}, \nu_{yx}, G_{xy}$) bulunmasında kullanılabilir. Sonra da enine izotropik eşdeğeri olan cismin elastik sabitleri şu şekilde hesaplanır.

$$E_r = \frac{(E_x + E_y)}{2} \quad E_z = E_{22} \quad \nu_r = (\nu_{xy} + \nu_{yx}) \quad (6.1)$$

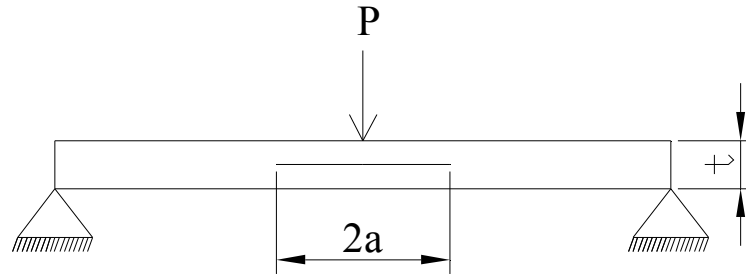
$$N_{rz} = \nu_{12} \quad G_{zr} = G_{12}$$

Bu yaklaşım, homojen eşdeğeri katının özelliklerinin çabuk bir şekilde belirlenmesine izin verir.

6.3. İnce Tabakalarda Hasar

Hasar boyutu yapının kalıntı özelliklerini etkilediği için önceden belirlenmiş bir darbe tarafından oluşturulan hasarın boyutunun belirlenmesi sıklıkla üzerinde durulan bir konudur. Hasar, yalnızca darbe kuvvetinin minimum seviyeye ulaşması sonrasında meydana gelir. Bu yüzden darbe kuvvetinin bu eşik değerinin tahmin edilmesi arzu edilir. Bu işlerin yapılabilmesi için burada iki basit metod oluşturulacaktır.

Dobyns (1980) ve Dobyns ile Porto (1981) tarafından önerilen ilk yaklaşım tüm hasar boyutunun tahmin edilmesini amaçlamaktadır. Bu yaklaşım darbe hasarının kritik bileşenlerinden olan, darbe ucu etrafında yüksek enine kayma gerilmeleri nedeniyle büyüyen tabaka ayrılması terimlerini baz almaktadır. Ortaya atılan fikir darbe noktası etrafında enine kayma kuvvetlerinin dağılımı belirleyecek ve hasar zonu boyutunun tahmin edilmesi için uygun deformasyon kriterini kullanacaktır. Enine kayma kuvvetleri, birinci dereceden kayma ile deforme olabilen plaka teorisi ile belirlenir. Temas kuvveti, yoğunlaştırılmış yük olarak varsayılırsa enine kayma kuvvetinin değeri, yükün uygulama noktası yakınlarında sonsuz değerine yaklaşmaktadır.



Şekil 6.1 Hasar başlangıcı için gerekli kritik yükün belirlendiği model (Davies ve arkadaşları 1994)

Yük, darbe ucunun teması ile uygulandığı için bu yükün ufak bir alana yayıldığını varsaymak makuldür. Hasar zonu genellikle temas alanından kayda değer şekilde daha büyük olması nedeniyle basitleştirilmiş bir dağılım kullanmak mümkündür. Dobyns ve Porter (1981) temas kuvvetinin her bir kenarı darbe ucunun radüsüne eşit olan ufak bir kare üzerinde düzgün bir şekilde dağıldığını varsaydılar. Tabakanın kalınlığı boyunca

gerçek gerilme dağılımını elde etmek için hiçbir teşebbüste bulunulmadı. Grafit epoksi için ortalama enine normal gerilme Q_n/h 34,6 MPa ı aşması halinde tabaka ayrılması meydana geleceği varsayılır. Bu yaklaşım hasar zonunun iyi bir doğruluk derecesiyle tahminine izin verir. Grauses ve Koonta (1988) aynı yaklaşımı izlediler ve grafit epoksi için 23,3 MPa ve grafit PEEK tabaklar için 20,6 MPa ortalama kritik enine kayma gerilmesi değerini kullandılar.

Burada tartışılan ikinci yaklaşım hasar başlamasına neden olan temas kuvvetinin eşik değerinin tahmin edilmesi ile ilgilidir. Maksimum darbe kuvveti-hasar alanı grafiği çizilecek olursa; yük kritik bir değere (P_{cr}) ulaştıktan sonra hasar boyutunda gözle görülür ani bir artış meydana gelir (Davies ve arkadaşları 1994). Hertzian yüzey hasarı nedeniyle bu kritik değer in altında hasar alanı küçüktür. Delaminasyonun başlangıcı P_c ile ilgilidir. Şekil 6.1 de bu kritik yükün tahmin edilmesi için çok basit bir model gösterilmiştir. Yarı izotropik tabaka izotropik olarak ele alınıyor. Basit destekler üzerindeki dairesel bir plakanın orta düzleminde, radüsü “a” olan tek bir dairesel tabaka ayrılmasının oluştuğu varsayılır. Kırılma modu II için enerji azalma miktarı, kritik enerji azalma miktarına ulaştığı zaman tabaka ayrılmasının artması beklenmektedir. Bu basit model enerji azalma miktarı için aşağıdaki ifadeyi ortaya koyar.

$$G_{II} = \frac{9P^2(1-\nu^2)}{8\pi^2 Eh^3} \quad (6.2)$$

Burada E ve ν sırasıyla sırası ile tabakanın eşdeğer içdüzlem modülü ve poisson oranıdır. h ise tabaka kalınlığıdır. Şekil değiştirme enerji azalma miktarı, delaminasyon radüsü “a” dan bağımsız olduğuna dikkat edilmelidir. P artarken G_{IIc} kritik değeri, tabaka ayrılması boyutunun belirsiz olduğu bir noktaya yükselir. Sonuç olarak kuvvetin kritik değeri yükselir yükselmez delaminasyon alanı hızlı bir şekilde artar. Kritik kuvvetin eşik değeri aşağıdaki gibi olur.

$$P_c^2 = \frac{8\pi^2 Eh^3}{9(1-\nu^2)} G_{IIc} \quad (6.3)$$

Bu eşitlik kritik kuvvetin eşik değerinin $h^{3/2}$ ile orantılı olduğunu göstermektedir. G_{IIc} nin kritik değeri olarak 0,8 N/mm kullanılmaktadır. Eşitlik (6.3) yarı izotropik grafit epoksi çeşitli tabakalardaki delaminasyon başlangıç hasarının tahmin edilmesinde başarılı bir şekilde kullanıldı. Cam-polyester tabakalarla deneyler yapıldı. Deneylerden elde edilen temas kuvveti ile hasar alanı diyagramından elde edilen değerler böyle bir kuvvet eşik değerinin mevcudiyetinin bir delildir. (Davies ve arkadaşları 1994). Ancak bu durumda, cam polyesterin malzeme özellikleri şekil değiştirme miktar bağımlılığı göstermesi nedeniyle statik delme testlerinden elde edilen sonuçlar ile bunların çarpma testleri arasında önemli bir fark gözlenir. Özellikle (1) modüller şekil değiştirme miktarı $10 s^{-1}$ mertebelerine ulaştığı anda artmaya başlar ve (2) kırılma tokluğunun da miktar-bağımlılık göstereceği beklenir. Fakat literatürdeki çelişkili ifadeler kırılma tokluğunun artacağını yada bazen şekil değiştirme miktarıyla düşebileceğini göstermektedir.

6.4. Hasar Başlangıcı

Bu bölümde, matriste meydana gelen ilk çatlakın görünümünün tahmin edilmesi için kullanılan metodlar yer almaktadır. Bu çatlak, ele alınan bir plaka ile buna bitişik iki plakanın ara yüzeyine ulaştığında yeniden kayda değer bir gerilme dağılımı oluşur ve delaminasyon çatlak başlangıcı için muhtemel dört bölge oluşur. Bir sonraki işlem tabaka ayrılmasının olup olmayacağını ve olacak ise nerede olacağını belirlemesidir. Mevcut delaminasyon ilerlemesi bir sonraki bölümde işlenecektir.

Tabakalar arası normal ve kayma gerilmeleri darbe hasar oluşumunda önemli bir rol oynarlar ve doğru bir şekilde belirlenmeleri gerekir. Metodun değişkenliğinden dolayı bu amaç için 2 yada 3 boyutlu sonlu eleman modelleri oluşturulur. Ancak çok sayıdaki serbestlik dereceleri içindeki bu sonuçlar sınırlanmış olabilir. Birinci dereceden kayma deformasyonu plaka teorisini kullanarak modellendirilen tabaka genellikle iç düzlem gerilmelerinin iyi bir şekilde tahmin edilmesine olanak sağlar. Bir tabaka yüksek hızda bir darbeye maruz kaldığı zaman, başlangıçta gerilme dalgaları darbe ucunun yakınlarında ufak bir alanla sınırlandırılır ve bu dalgalar C ses hızı ile kalınlık boyunca ilerlerler. Basma şekil değiştirmeleri V/C şeklinde ifade edilir. Bu durumda deformasyonun, V/C değerinin

%1'i civarında oluşacağı beklenir. Grafit epoksi için C yaklaşık olarak 2000 m/s'dir. Bu yüzden kalınlık boyunca 20m/s ye ulaşılan hızlar için gerilme dalgaları göz önünde bulundurulmalıdır. Daha düşük hızlarda kiriş, plaka ve kabuklar için mühendislik yaklaşımları geçerlidir. Enine deformasyon tabakanın kalınlığını aşarsa, gerçek temas kuvveti değişimini elde etmek için darbe dinamiği analizindeki geometrik lineersizliklerin etkilerini dahil etmek gerekli olabilir. Bu durumda darbe enerjisinin önemli bir bölümü membranın deformasyonu için kullanılır. Analiz termal kalıcı gerilmeleri de içermelidir. Çünkü termal kalıcı gerilmeler çoğunlukla, hasar eşik enerjisi seviyesi üzerinde güçlü bir etkiye sahiptirler.

Gerilme dağılımının doğru olarak belirlenmesi mümkün olduğu zaman ilk matris çatlağının yerinin belirlenmesinde uygun bir deformasyon kriteri kullanılabilir. Birinci yaklaşım her bir plakada elyafa dik yönde maksimum çekme gerilmesini belirlemelidir. Deformasyon, maksimum gerilme kriteri kullanılarak tahmin edilir. Yani matris çekme deformasyonu, maksimum gerilmenin enine doğrultuda çekme dayanımını aştığı zaman meydana gelir. Hashin'in deformasyon kriteri matris çatlaklarının görünüşünün tahmin edilmesi için birkaç yazar tarafından kullanıldı.

$$\frac{1}{Y_t^2} (\sigma_{yy} + \sigma_{zz})^2 + \frac{1}{S^2} (\sigma_{yz}^2 + \sigma_{yy}\sigma_{zz})^2 + \frac{1}{S^2} (\sigma_{xy}^2 + \sigma_{xz}^2) = e_M^2 \quad (6.4)$$

Burada Y_t çekmedeki enine normal gerilme ve S de enine kayma dayanımıdır. Z eksen tabakanın normali yönündedir bununla birlikte x ve y eksenleri, düşünülen tabakadaki elyaf yönünün normali ve elyaf yönüne paralel yönde olan yerel koordinatlardır. e_M bunlardan birisine eşit yada daha büyük olursa deformasyon meydana gelir. Enine normal gerilme genellikle küçük olduğu için (6.4) teki σ_{zz} ihmal edilebilir. Yalnızca silindirik darbe ucuna maruz kalmış iki boyutlu basit bir kiriş problemi için σ_{xz} de sıfırdır ve kriter daha da basitleştirilebilir.

$$\left(\frac{\bar{\sigma}_{yy}}{Y} \right)^2 + \left(\frac{\bar{\sigma}_{yz}}{S_i} \right)^2 = e_M^2 \quad (6.5)$$

Burada Y ve S_i iç kısım enine normal dayanımı ve kayma dayanımlarıdır (Choi ve arkadaşları 1991b, Choi ve Chang 1992). Formülde gerilmeler üzerinde gözükten üst çizgi, gerilmenin plaka kalınlığı üzerinde, ortalama bir değer aldığını belirtmektedir. Örneğin;

$$\bar{\sigma}_{yy} = \frac{1}{h_n} \int_{z_{n-1}}^{z_n} \sigma_{yy} dz \quad (6.6)$$

Enine doğrultudaki dayanım $\sigma_{yy} > 0$ ise $Y = Y_t$ ve $\sigma_{yy} < 0$ ise $Y = Y_c$ olarak alınır. Farklı elyaf yönlenmelerine sahip plakalar arasına yerleştirilen plakanın enine yöndeki dayanımı, yine bu plakanın tek yönlü tabakanın bir parçası olduğu durumdaki enine dayanımından farklıdır. Bitişik plakalar bir plakanın görünür yada iç dayanımını artıracak etki meydana getirirler. İç dayanımlar mevcut bir plaka ile bitişigindeki plaka arasındaki minimum açı değişimi $\Delta\theta$ ve plakadaki katman sayısı “M” ile değişir. İç dayanım aşağıdaki formül kullanılarak tahmin edilebilir.

$$Y = Y^0 \left(1 + A \frac{\sin(\Delta\theta)}{M^B} \right) \quad (6.7)$$

$$S = S^0 \left(1 + C \frac{\sin(\Delta\theta)}{M^D} \right)$$

Burada A ve D deneylerden elde edilen sabitlerdir.

Elyaf deformasyonu aşağıdaki kriter kullanılarak tahmin edilebilir. Elyafların basma kopması $\sigma_{xx} < 0$ ve

$$\|\sigma_{yy}\| > X' \quad (6.8)$$

olduğu zaman meydana gelir Burada X' tabakanın elyaf doğrultusundaki basma dayanımıdır. Elyafların çekme kopması $\sigma_{xx} > 0$ ve

$$\left(\frac{\sigma_{xx}}{X} \right)^2 + \frac{\sigma_{xy}^2 + \sigma_{xz}^2}{S} \geq 1 \quad (6.9)$$

olduğu zaman meydana gelir. Burada X elyaf yönündeki çekme dayanımı ve S iç düzlem kayma dayanımıdır.

Kritik matris çatlaklarının yakınındaki gerilme dağılımını hesaplamak için çatlakın meydana gelmesi beklenen yerdeki sonlu elemanın elastik özellikleri değiştirilir. Hasarlı elemanın, hiçbir enine çekme gerilmesini ya da düzlemden dışarı doğru olan kayma gerilmesini meydana getirmedeği varsayılır. $[0_6,90_2]_s$ şeklinde tabakalandırılmış bir kompozit tabaka için, 90° lik yönlenmeye sahip tabakalardaki kayma matris çatlakları, hasarlı alandan uzaktaki ara yüzey boyunca pozitif normal gerilmelere neden olduğu sonucuna varılmıştır. Üst ara yüzey boyunca durum tersine döner. Delaminasyonlar mod 1 de başlar ve Şekil 4.6 da gösterilen hasar tipinin oluşumuna önderlik eder.

Enine kayma nedeniyle bir matris çatlaklarının oluşumu, matris çatlak ucunda kayma gerilmeleri kadar tabakalar arası yüksek gerilmelerde meydana getirir. Gerilme gradyanındaki ani değişim; matris çatlaklarının ara yüzeylerdeki delaminasyonlara neden olan, tabakalar arası gerilme tekilliği ile sonuçlandığını göstermektedir. Wang ve Yew (1990), Liu (1993), Liu ve arkadaşları (1993a,b) delaminasyon başlangıcının tahmini için farklı bir kriter kullandı:

$$\left(\frac{\sigma_{zz}}{X}\right)^2 + \frac{\sigma_{xz}^2 + \sigma_{yz}^2}{S^2} = e_D^2 \quad (6.10)$$

e_D 1 değerine ulaştığında deformasyon meydana gelir. Denklem (5.10) deformasyon başlangıcının tahmini için kullanılır. Uygulanan yük artırılmaya devam ederken delaminasyon büyümesinin simülasyonu için kırılma analizi uygulanır.

6.5. Darbe Esnasında Delaminasyonların İlerlemesi

Darbe esnasında delaminasyon ilerlemesinin gözlemlendiği çalışma şu ifadelerin doğru tahminini gerektirir: çatlak ucu yakınlarındaki gerilme dağılımının farklı birçok kırılma modu için şekil değiştirme enerji azalma miktarının hesaplanması ve doğru bir karma mod kırılma kriterinin kullanımı.

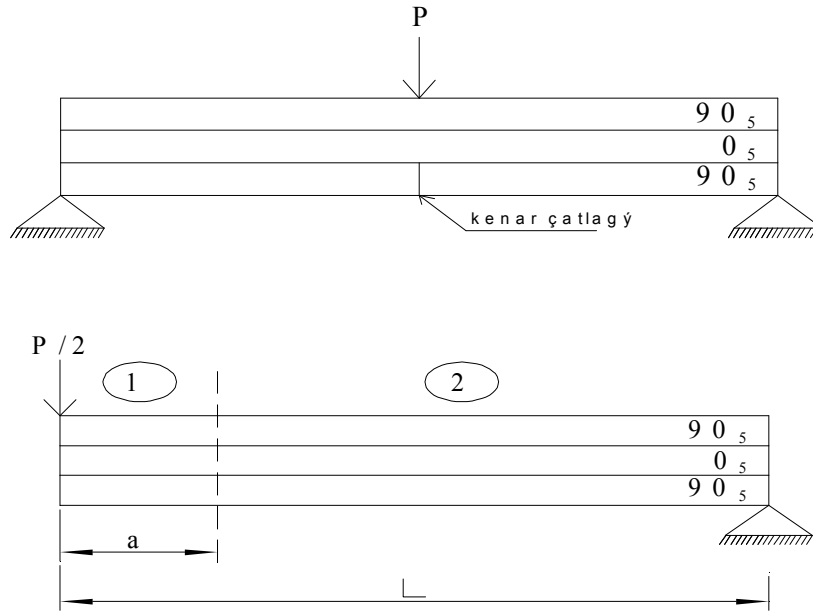
Bazı durumlarda kiriş ve plaka modelleri kullanılabilmesine rağmen delaminasyon içeren tabakalar çoğunlukla 2 boyutlu ya da 3 boyutlu katı olarak analiz edilir. Eğilme, enine kayma, temas gerilmeleri bulunduğu darbe bölgesindeki kompleks gerilme durumu ve matris çatlakları ile delaminasyonların her ikisinin bir arada bulunması nedeniyle delaminasyona uğramış çatlak ucunda mod 1 ve mod 2 kırılmaları mevcuttur. Benzer olmayan iki elastik ortamın ara yüzey boyunca çatlak oluşumu için gereken mod 1 ve mod 2 şekil değiştirme enerji azalma miktarları, çatlak ucu yakınlarında küçük bir bölgedeki gerilmelerin salınımlı davranışları nedeniyle iyi bir şekilde belirlenemez (Sun ve Jih 1987). Ancak toplam şekil değiştirme enerji azalma miktarı daima iyi bir şekilde belirlenir. İki boyutlu sonlu eleman modeli, çatlak ucu delaminasyonu yakınlarındaki gerçek gerilme dağılımını elde etmek için kullanıldığı zaman; toplam şekil değiştirme enerjisi azalma miktarı “G” ile onun iki bileşeni; G_I ve G_{II} gerçek çatlak kapanma tekniği ile belirlenebilir (Rybicki ve Kanninen 1977). Ancak beklenildiği gibi, sonlu eleman aralığının küçülmesi nedeniyle G_I ve G_{II} nin değerleri birbirine yaklaşmayacaktır (Sun ve Jih 1987, Salpekar 1993). Salınım bölgesi küçüktür ve sonlu eleman analizinde kullanılan çatlak uzama artışı bu salınımlardan kaçınmak için yeterince büyük olması gerekir. Diğer taraftan toplam enerji azalma miktarını doğru bir şekilde belirlemek için küçük elemanlara gerek duyulur. Denge, bu zıt gereksinimlerden etkilenmiş olmalıdır. Salpekar (1993) tarafından tavsiye edilen en küçük eleman boyutu tek bir plakanın kalınlığının dörtte biridir.

Yukarıda bahsedilen gerçek şekil değiştirme enerji azalma miktarının hesaplanması ile ilgili zorluklara ilave olarak iki problem kaynağı daha verilmektedir. Bunlar; emniyetli kritik şekil değiştirme enerji azalma miktarının doğru ölçümü ve uygun bir deformasyon kriterine uyarlanmasıdır. Bu yoğun çabaların amacı, güvenilir test prosedürlerinin geliştirilmesi ve kritik enerji azalma miktarının karakterize edilmesidir.

Literatürün gözden geçirerek (Jones ve arkadaşları 1988) detaylı deneysel prosedürleri tanımladılar. 24 farklı çalışmadan elde edilen G_{Ic} değerleri test metodlarındaki farklılıklara rağmen kayda değer bir şekilde yakınlık göstermektedir. Mod 2 kırılmasında G_{IIc} deki büyük değişkenlik raporlara geçti. Kompozit tabakalardaki

karma mod kırılmasının kapsam olarak gözden geçirilmesi (Garg 1988) güvenilir bir deformasyon kriterinin halen mevcut olmadığını gösterdi. Basit ve yaygın olarak kullanılan deformasyon kriteri aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\left(\frac{G_I}{G_{Ic}} \right)^m + \left(\frac{G_{II}}{G_{IIc}} \right)^n = e_D \quad (6.11)$$



Şekil 5.2 [90₅,0₅,90₅] şeklinde tabakalandırılmış tabakalı grafit epoksi kompozitte eğme çatlağı tarafından başlatılan delaminasyon analizi (Sun ve Manoharan 1989)

Burada “m” ve “n” deneysel verilere uygunluğun sağlanması için kullanılan sabitlerdir. $e_D \geq 1$ olduğu zaman delaminasyon büyür. Liu ve arkadaşları (1993a,b) ve diğerleri $m = n = 1$ kabulü ile denklem (5.11) i kullandılar.

Matris eğilme çatlakları tarafından başlatılan delaminasyon büyümesi öncelikle en alt katmanın elyaf yönlenmesine normal yöndeki mod 1 kırılması tarafından kontrol edilir (Choi ve Chang 1992, Liu ve arkadaşları 1993a,b). Böyle delaminasyonların büyümesi oldukça istikrarlıdır.

Liu ve arkadaşlarının (1993a,b) [0₆,90₃]_s ve [0₄,90₄]_s şeklinde tabakalandırılmış karbon epoksi tabakalı kompozitlere yapmış oldukları yarı statik 3

noktadan eğme testi, kayma çatlakları tarafından başlatılan delaminasyonların kararlı olmayan bir halde büyüdüklerini ve katastrofik deformasyona yol açacağını gösterdi. Darbe ucu deformasyonuna tepki olarak uygulanan kuvvet değerleri, nümerik tahminler ve deneysel sonuçlar arasındaki çok iyi bir tutarlılık olduğunu göstermektedir. Liu ve arkadaşları (1993b) $[0_4,90_3, 0_2]_s$ ve $[0_3,90_2, 0]_s$ şeklinde tabakalandırılmış tabakalı kompozitten yine benzer sonuçlar elde ettiler ve raporladılar. Salpekar (1993) $[0_2,90_8, 0_2]$ şeklinde tabakalanmış, çatlakları azaltılmış cam epoksi ve grafit epoksi tabakalı kompoziti analiz etti. Buradaki amacı çatlak ucunda tabakalar arası büyük bir çekme gerilmesi olduğunu, bunun delaminasyonu artırabileceğini, kayda değer bir şekil değiştirme enerjisi azalma miktarının olduğunu ve mod 1 bileşeninin delaminasyon başlangıcında mevcut olduğunu göstermekti.

Sun ve Manoharan (1989) $[90_5,0_5,90_5]$ şeklinde tabakalandırılmış grafit epoksi kenar çentikli tabakalı kompozit üzerinde çalıştılar. Buradaki amaçları böyle tabakaların düşük hızlı darbeden sonra benzer şekilde gözlemlenen eğilme çatlaklarının simülasyonunun yapılmasıydı. Numune 3 noktadan eğmeye maruz kaldığı durumda, kırılma modları 1,2'ye ve aynı zamanda toplam enerji azalma miktarına uyumluluk gösteren G_I ve G_{II} enerji azalma miktarlarını belirlemek için 2 boyutlu lineer sonlu eleman analizi kullanıldı. Toplam enerji azalma miktarının bulunmasını sağlayan aşağıdaki ifadenin türetilmesi için kayma deformasyon etkisini içeren bir kiriş modeli geliştirildi.

$$G = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{A_{11}}{D} \right)_1 - \left(\frac{A_{11}}{D} \right)_2 \right] \cdot \frac{P^2}{4} \cdot (a-L)^2 \quad (6.12)$$

Çatlak uzunluğu artarken G azalmaktadır. Buda çatlak büyümesinin kararlı olduğunu göstermektedir. Dahası G_I , G_{II} den çok daha büyüktür buda mod 1 deformasyonunun baskın mod olduğunu gösterir.

Grady ve Sun (1986), Sun ve Grady (1988), Sankar ve Hu (1991) kauçuk bir top tarafından hasarlanan 20 katmanlı $[90,0]_s$ olarak tabakalandırılmış grafit epoksi kiriş konsolunda, mevcut olan orta düzlem delaminasyon çatlaklarının darbe esnasında ilerlemesi konusunda çalıştılar. Bu durumda mod 1 in şekil değiştirme enerji azalma

miktarına katkısı ihmal edilebilir ve çatlak ilerlemesi mod 2 kırılma sürecinde gerçekleşir. Bu iki basit örnek, özel durumlara bağlı olarak delaminasyon ilerlemesinin ya mod 1 ya da mod 2 tarafından gerçekleştirildiği görülmektedir. Bu durum malzeme seçimi ve geliştirilmesi için gizli bilgiler içermektedir. Seçilen bir malzeme, test tiplerinden birinin koşulları altında üstün hasar direncine sahip olduğunu kanıtlayabilir fakat farklı bir test tipi uygulanırsa durumlar tersine dönebilir.

Razi ve Kabayashi (1993) $[0_4,90_4]_s$ ve $[0_4,90_4]_s$ çapraz katlı tabakalı kirişler ve plakalar üzerinde delaminasyonu geliştirme çalışmaları yaptı. Düşük hızlı darbe esnasında gözlemlenen hasar, yarı statik testler esnasında oluşan ile benzerdi. Plaka tipi ve kiriş tipi numunelerdeki delaminasyon boyutunun tahmininde, enerji azalma miktarına dayalı deformasyon kriteri ile uyuşan detaylandırılmış sonlu eleman analizi kullanıldı. Mod 2 baskın deformasyon modu olarak gösterildi ve G_I in katkısı ihmal edildi. Şekil değiştirme enerjisi azalma miktarının dinamik başlangıç değeri, G_{IIc} den %15 daha az olarak tahmin edildi ve şekil değiştirme azalma miktarı G_{IIc} den yaklaşık %75 daha düşük bir G_{IIa} değerine ulaştığı zaman delaminasyonlar durduruldu. Bu yaklaşımı kullanılarak tahmin edilen delaminasyon şekli ile deneysel sonuçlar arasında çok iyi bir kıyaslama olduğu gösterildi.

6.6. Hasar Tahmini Sonuçları

Delaminasyonları, matris çatlamları ve elyaf kopmaları gibi kompleks durumları içeren darbe hasarı, tam detaylı olarak tahmin edilemez. Bu tip hasarlar malzeme özelliklerindeki düşüşü hesaba kattığı için delaminasyonun yerinin ve boyutunun tahmin edilmesi arzu edilir. Hasar zonunun toplam boyutu genellikle benzer yaklaşımlar kullanılarak tahmin edilebilir. Aynı zamanda hasar prosesinin bütünü başlattığı düşünülen matris çatlağının başlangıcı, doğru bir şekilde tahmin edilebilir. Ara yüzey delaminasyonlarının gelişeceği yeri belirlemek ve bu delaminasyonların büyümesini tahmin etmek için teşebbüsler arttığı zaman zorluklarda artmaktadır. Böyle hesaplamalar başarılı bir şekilde uygulanmasına rağmen kompleks ve maliyetlidirler. Bu yüzden rutin hesaplamalar olarak düşünülemezler.

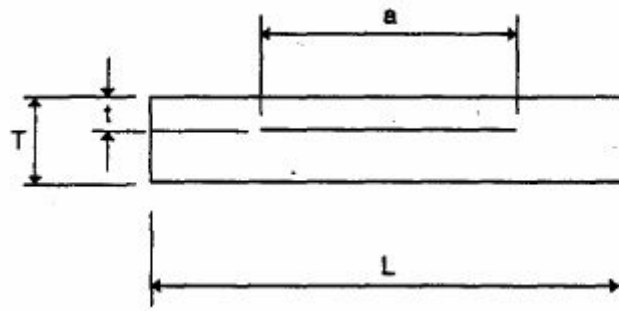
7. BURKULMA

Darbe tarafından meydana getirilen tabaka ayrılmaları yapının basma dayanımını önemli ölçüde azaltır. Bir çok araştırmacı darbe ile tabaka ayrılmaları meydana gelmiş tabakalı kompozitlerin stabilitesi üzerinde çalışmıştır(Tablo 7.1).

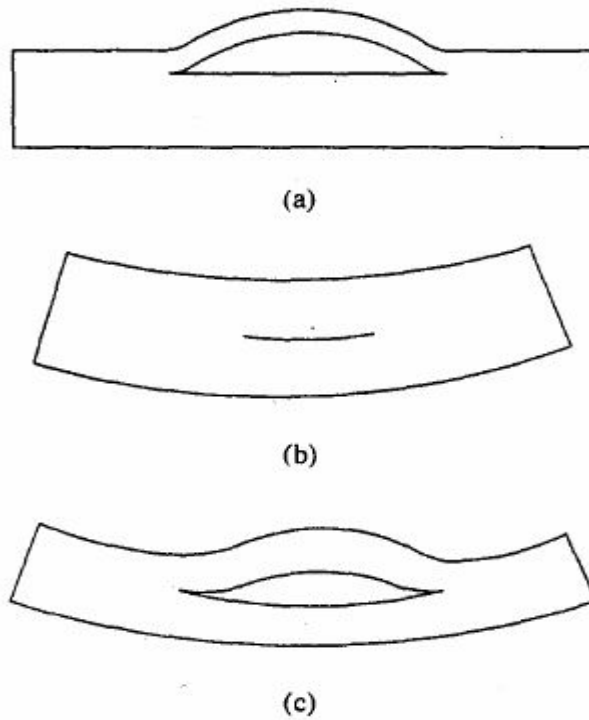
Tablo 7.1 Darbe hasarlı tabakaların kararlılığı hakkında çalışma yapan bilim adamlarının referans listesi

Analytical studies	Experimental studies
Adan et al. (1994)	Horban and Palazotto (1987)
Avery (1989)	Ilcewicz et al. (1989)
Bottega and Maewal (1983)	Jones et al. (1985)
Chai et al. (1981, 1983)	Kassapoglou and Abbott (1988)
Davidson (1989, 1991)	Mousley (1984)
Dost et al. (1988)	Palazotto et al. (1989)
Grady et al. (1989)	Romeo and Gaetani (1990)
Jones et al. (1985)	Seifert and Palazotto (1987)
Kapania and Wolfe (1987, 1989)	Zheng and Sun (1995)
Kardomateas (1989)	
Kardomateas and Schmueser (1987)	
Kassapoglou (1988)	
Kassapoglou and Abbott (1988)	
Moon and Kennedy (1994)	
Naganarayana and Atluri (1995)	
Palazotto et al. (1991)	
Peck and Springer (1991)	
Romeo and Gaetani (1990)	
Simitses et al. (1985)	
Tracy and Pardoen (1989)	
Vizzini and Lagace (1987)	
Wilder and Palazotto (1988)	
Williams et al. (1986)	
Yeh and Tan (1994)	
Yin (1985, 1986, 1987)	
Yin and Fei (1984, 1985)	
Yin and Wang (1984)	
Yin et al. (1986)	

Burkulma ve delaminasyonun bölgesin büyümesi basma dayanımının azalmasında ilk adım olarak düşünülmektedir. Burada bilinmesi istenen şey hasarlı numunenin ne kadarlık bir yüke dayanabileceğidir. Delaminasyonların meydana gelmesi nedeniyle hasarlı numunenin yük taşıma kapasitesi düşecek dahası ilk burkulma meydana geldiğinde delaminasyon artacak ve delaminasyon artışı ile de yük taşıma kapasitesi çok daha fazla düşecektir. Hasarlı tabakanın kararlılığının anlaşılması; kiriş tipli plakanın homojen, aksenal yüklü, delaminasyonların simetrik olduğu, durumlar göz önünde bulundurulması ile elde edilebilir(şekil 7.1).



Şekil 7.1 Delaminasyona uğramış kiriş plakası



Şekil 7.2 Yerel, genel ve karma burkulma modları

Delaminasyonlar numunenin eni doğrultusunda artış gösterdikleri için tek boyutlu analiz kullanılabilir. Önemli derecede ilgi gören özel bir durum ise ince delaminasyonlardır. Bu delaminasyonlar numunenin yüzeye yakın bölgelerinde oluşur ve numunenin bu bölümü dışındaki kısımları düzgünlüğünü korurken bu kısmı burkulur(şekil 7.2a). buna genel yada karma mod'un tam zıttı olduğu için yerel burkulma modu denir(şekil 7.2). Küçük bir delaminasyon, tabakalı kompozitin orta tabakası yakınlarında olduğu zaman bu delaminasyonun tabakanın stabilitesi üzerindeki etkisi de küçük olur, tabaka hasarlanmamış gibi burkulur ve bu durumda genel bir burkulma moduna sahip olmuş oluruz (şekil 7.2b). Yüzeye yakın bölgeye yerleşmemiş daha büyük delaminasyonların olduğu hallerde tabaka ayrılmasının meydana geldiği bölgenin burkulması tabakalı kompozitin tüm rijitliğini azaltır. Geri kalan kısmı artık simetrik olmayacaktır ve farklı bir mod'da çok daha düşük yüklerde burkulacaktır(şekil 7.2c). Buda karma mod olarak adlandırılır.

Burada ilk olarak delaminasyona uğramış kirişler için yerel burkulma modlarının analizi yapılacaktır. Sonra delaminasyona uğramış kiriş için yerel, genel ve karma modların tahminine elverişli daha genel bir model tasvir edilecektir. Sonuç olarak delaminasyona uğramış plakaların stabilitesinin analizini yapmak için kullanılan matematiksel modeller tartışılacaktır.

7.1. İnce Film Tabakası Ayrılması

Enine delaminasyon içeren bir tabaka genellikle kiriş plakası olarak adlandırılır. Analizi basitleştirmek için tabakaları simetrik olduğu ve tabaka ayrılması tarafından oluşturulan her iki alt tabakanın da simetrik olarak tabakalandırıldığı varsayılır. Bu durumda malzeme anizotropisi nedeniyle çekme-eğme kaplini mevcut değildir. Delaminasyon numunenin yüzeye yakın bölgelerine yerleştiği zaman; basma gerilmesi uygulanırken delaminasyon bölgesinin burkulacağı ve bununla birlikte geri kalan kısımlar düzgünlüğünü muhafaza edeceği varsayılabilir. Amaç, böyle bir delaminasyona uğramış kirişin akma yükünün belirlenmesi olmalıdır.

Şöyle bir varsayım yapılabilir. Yük yavaş yavaş artarken ilk olarak delaminasyon burkulması gözlenir, bunu izleyen kararlı delaminasyon büyümesi gerçekleşir ve sonunda kararsız büyüme gerçekleşir. Delaminasyonun büyüme başladığı andaki koşullar genellikle tabakanın maksimum yük taşıma kapasitesindeki koşulları olarak ele alınır. Bazı bilim adamları dinamik delaminasyon büyümesi üzerinde çalışmalarına rağmen bu daha çok dikkat gerektiren karmaşık bir problemdir.

Eğer delaminasyon bölgesi simetrik bir tabaka ise çekme-eğme kaplini olmayacaktır ve enine deformasyon aşağıdaki gibi ifade edilecektir.

$$\frac{d^4 \omega}{dx^4} + \frac{P'}{D} + \frac{d^2 \omega}{dx^2} = 0 \quad (7.1)$$

Burada D delaminasyona uğramış bölgenin eğme rijitliğidir. P ise çekmede pozitif olarak alınan aksenal kuvvettir. (7.1) genel olarak şu formda yazılabilir:

$$\omega = A + Bx + C \sin(\beta x) + D \cos(\beta x) \quad (7.2)$$

Burkulma yükü $P' = \beta^2 \cdot D$ formülünden anlaşılacağı üzere β ile bağlantılıdır ve “A-D” sabitleri sınır şartlarından bulunabilir. Delaminasyona uğramış bölgenin her iki uç kısmında deformasyon ve dönmenin sıfır olduğu varsayarsak bu bölgedeki aksenal kuvvet kritik değere ulaştığı anda burkulma meydana gelir.

$$P^* = -4\pi^2 \frac{D}{a^2} = -\frac{\pi^2}{3} \frac{Ebt^3}{a^2} \quad (7.3)$$

Burada “a” delaminasyon boyu, “b” genişliği, “t” kalınlığı, “E” de elastisite modülüdür. Bu durumda basma gerilmesi;

$$\sigma = \frac{\pi^2}{3} \frac{Et^2}{a^2} \quad (7.4)$$

Ve numunenin boyundaki kısalma aşağıdaki ifade ile bulunur.

$$u = \frac{\sigma L}{E} = \frac{PL}{bTE} \quad (7.5)$$

Burada “L” ve “T” sırası ile numunenin toplam boyu ve toplam kalınlığıdır. P* tüm tabakalar üzerine etkiyen basma kuvvetidir. Sistem kompliyansı $\lambda = \delta U / \delta P$ olarak belirlenir ve enerji azalma miktarı aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$G = \frac{P^2}{2b} \left(\frac{\partial \lambda}{\partial a} \right) \quad (7.6)$$

(7.5) denkleminde de açıkça anlaşılacağı üzere, burkulmadan önce delaminasyon boyu ne olursa olsun $G = 0$ 'dır.

Lokal burkulmadan sonra delaminasyona uğramış kısmın sadece P' kuvvetine dayanabileceği varsayılır ve uç kısmın kısalması şu şekilde ifade edilebilir.

$$u_p = P \left[\frac{at + L(T-t)}{bTE(T-t)} \right] - \frac{\pi^2 t^3}{3a(T-t)} \quad (7.7)$$

Burada $P > P^*$ dır. (7.6) denkleminde yerine koyarak ve boyutsal olmayan ifadeleri kullanarak

$$\alpha = \frac{a}{t}, \quad \beta = \frac{t}{T-t} \quad (7.8)$$

Burkulma yükünün üzerinde enerji azalma miktarının delaminasyon boyutları ile ilgili olduğunu şu ifade ile buluruz.

$$G = \frac{\beta T \sigma^2}{2E} \left[1 + \left(\frac{\alpha^*}{\alpha} \right)^2 \right] \quad (7.9)$$

Burada uygulanan σ gerilmesi için burkulmanın meydana geldiği α değeri şu şekilde bulunabilir.

$$\alpha^* = \left(\frac{\pi^2 E}{3\sigma} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (7.10)$$

Şekil 7.3; verilen bir σ gerilmesi için bu model delaminasyon uzunluğunun kritik değere ulaşmaya kadar enerji azalma miktarının sıfır olacağı tahmin etmektedir. delaminasyonun kritik boya ulaştığı anda boyutsal olmayan enerji azalma miktarının ikinci maksimum değerini aldığı varsayılır. Delaminasyon boyu artarken l 'in asimptotik değeri de artar.

Bu analiz olabilecek 3 senaryo tariflemektedir: (1) Başlangıçtaki enerji azalma miktarı kritik enerji azalma miktarından daha küçükse hiçbir delaminasyon büyümesi gerçekleşmez. (2) Başlangıçta delaminasyon büyür fakat sonunda enerji azalması kritik değerden daha düşük olur ve büyüme durur. (3) Delaminasyon devam eder ve G kritik değeri sürekli aşarsa muhtemelen kararsız büyüme gerçekleşir.

7.2. Delaminasyona Uğramış Plakaların Burkulması

Pratikte kompozit plakalar üzerindeki darbe; delaminasyonların yaklaşık olarak eliptik şekilde olduğunu göstermektedir. Sonuç olarak delaminasyonlar bazen dikdörtgen ortotropik plaka olarak modellenmelerine rağmen kompozit eliptik plakaların kararlılığı geniş bir şekilde çalışıldı(Örneğin Gottesman ve arkadaşları 1994). Bu, yüzeye yakın delaminasyon varsayımının yapıldığı, ince film delaminasyonun çalışmasının bir uzantısıdır. Alt tabakanın düz kaldığı varsayılır ve yerel delaminasyon modu oluşturulur. Bu durumda, analizde sadece delaminasyona uğramış alanın ihtiyaçları göz önünde bulundurulur. Delaminasyona uğramış giriş ile öncelikle burkulma yükünü ve delaminasyon büyümesi için gerekli yükü belirleriz.

Hasara uğramış tabakaların CAI dayanımını belirlemek için bir kişi her bir alt tabakanın basma akmasını ve kararlılığını kontrol etmelidir. Eğer alt tabakalar burkulursa ekstra hiçbir yükü kaldıramazlar ve gerilmeler yeni bir dağılım gösterir. Eğer alt tabakalar işlevini yerine getiremez hale gelirse o zaman yük taşıma kapasitesi azalır.

CAI dayanımının tahminini içeren işlem kavram olarak basit olmasına rağmen bu işlemi gerçekleştirmek karmaşıklığı nedeniyle zordur.

İç düzlem yüküne maruz kompozit plakanın kararlılığı Rayleigh-Ritz metodu kullanılarak çalışılabilir.

$$U = \frac{1}{2} \int_{\Omega} \left[\varepsilon_0^T A \varepsilon_0 + K^T D_K + 2\varepsilon_0^T B_K \right] d\Omega + \frac{1}{2} \int_{\Omega} \gamma^T \bar{A} \gamma \cdot d\Omega \quad (7.11)$$

$$U = \frac{1}{2} \int_{\Omega} K^T D_K \cdot d\Omega \quad (7.12)$$

Plakadaki şekil değiştirme enerjisi genel olarak tabakalandırılmış plaka için (7.11) ile yada simetrik olarak tabakalandırılmış bir plaka için (7.12) ile verilir. Potansiyel enerji ise şu şekilde yazılabilir.

$$V = \frac{1}{2} \int_{\Omega} \left[N_x \left(\frac{\partial \omega}{\partial x} \right)^2 + N_y \left(\frac{\partial \omega}{\partial y} \right)^2 + 2N_{xy} \frac{\partial \omega}{\partial x} \cdot \frac{\partial \omega}{\partial y} \right] dx \cdot dy \quad (7.13)$$

Burada N_x ve N_y ve N_{xy} delaminasyona uğramış plakaya uygulanan iç düzlem kuvvetleridir. Plakanın toplam potansiyel enerjisi $\pi = U + V$ minimize olacaktır. Simetrik bir tabaka için iç düzlem hareketi ve enine hareket birbirinden bağımsızdır. Rayleigh-Ritz metodunu kullanarak enine şekil değiştirmeler “w” (7.14) de ifade edilmiştir.

$$\omega = \sum_{i=1}^N c_i \phi_i(x, y) \quad (7.14)$$

Bu ifade, problemin asıl sınır şartlarını karşılamak zorunda olan deformasyon yaklaşım fonksiyonları ile bağlantılı bir ifadedir. Sabitlenmiş eliptik bir plaka için aşağıdaki deformasyon yaklaşım fonksiyonu kullanılabilir.

$$\phi_i = x^\alpha y^\beta \left[\left(\frac{x}{a} \right)^2 + \left(\frac{y}{b} \right)^2 - 1 \right]^2 \quad (7.15)$$

α ve β katsayıları 0,1,2,3,4... değerlerini alır ve plaka sınırlarında parantez içindeki miktar sıfırlanır. Yaklaşım fonksiyonu bu miktarın karesini içerdiğinden, plaka sınırları boyunca Φ ve sınırın normali yönündeki türevleri sıfırlanır.

Rayleigh-Ritz metodu gerçek değer problemine yol açar.

$$([K] - \lambda[K_G])X = 0 \quad (7.16)$$

$$[K] = \int_{\Omega} \Phi^{nT} D \Phi^n d\Omega \quad (7.17)$$

Burada "X" zahiri deformasyon vektörüdür. K, (7.17) de verilen elastik rijitlik matrisi ve K_G aşağıdaki formülden belirlenen geometrik rijitlik matrisidir.

$$\begin{aligned} K_{ij}^G = & N_x \int_{\Omega} \varphi_{i,x} \varphi_{j,x} dx.dy + N_y \int_{\Omega} \varphi_{i,y} \varphi_{j,y} dx.dy \\ & + N_{xy} \int_{\Omega} (\varphi_{i,x} \varphi_{j,y} + \varphi_{i,y} \varphi_{j,x}) dx.dy \end{aligned} \quad (7.18)$$

λ yük faktörüdür. Bu gerçek değer probleminin çözümü alt tabakalarda burkulma yükünün elde edilmesini sağlar.

Davidson tarafından 3 terim yaklaşımı kullanıldı(1991). İlk mod x ve y eksenleri ile bağlantılı olarak simetrikliğin beklenmesi dolayısı ile 3 terim yaklaşım fonksiyonları modelde $(\alpha, \beta) = (0,0)$, $(2,0)$ ve $(0,2)$ şeklinde bulundurulur.

Sonuçlar, ufak boyutlu delaminasyonlar için deneysel değerlerle iyi bir tutarlılık içinde olduğunu gösterdi. Daha büyük delaminasyon için model, burkulma yükünü büyük tahmin etmektedir. 3 terimli deformasyon yaklaşımı, en düşük burkulma değerini yeterince temsil edememesi nedeniyle bir çelişki meydana getirir.

Avery (1989) de Rayleigh-Ritz metodunu ve klasik plaka teorisini, eliptik kompozit plakaların kararlılığını araştırmak için kullandı. Ancak analiz edilmiş alt

tabakaların simetrik olmadığı ve bu yüzden anizotropinin analiz tarafından hesaba katılan çekme- eğme kaplinine neden olduğu varsayıldı. Enine deformasyon ve iç düzlem deformasyonlarının her ikisi, yaklaşım fonksiyonlarının plakanın kenarı boyunca sıfırlandığı kabulü ile seriler şeklinde ifade edildi. Plakanın şekil değiştirme enerjisi (7.11) formülünü kullanarak ve kayma deformasyonu ile ilgili son terimi ihmal ederek belirlenir. Deneysel sonuçlar ile iyi uyum sağlandığı belirtildi. Xiong ve arkadaşları(1995) 6 terimli polinomial genişlemeyi kullanarak aynı problem üzerinde durdular. Diğerlerinden farklı olarak çekme-eğme kaplini, etkisi azaltılmış eğme modülü yaklaşımının kullanımı ile hesaba katıldı. Bu yaklaşım analiz içinde yalnızca enine deformasyonu göz önünde bulundurmaya izin vermektedir.

Peck ve Springer (1991) Rayleigh-Ritz metodu kullanarak bu problemi araştırdılar. İleri burkulma davranışı geometrik lineersizlik içermektedir. Alt tabaka deforme olması nedeniyle alt tabaka ve plakanın denge merkezi arasında temas kuvvetleri oluşabilir. Bu temas, alt tabakanın lineer elastik temele dayanmış tek taraflı bir plaka olarak düşünülmesi ile modellendirilebilir. Alt tabaka ile plaka katmanları arasında uyumsuzluk olduğu zaman termal kalıntı gerilmeler burkulma yükünü etkiler.

Darbe hasarının çok gerçekçi modeli, farklı boyutlarda ve yönlendirmelerde birçok delaminasyonun hesaba katılmasından meydana gelir. Davidson (1989) değiştirilebilir(ayarlanabilir) bir model kullanarak kalınlık boyunca birçok eliptik delaminasyona sahip tabakaların burkulmasını içeren bir çalışma yaptı.

Sonlu elaman metodu, darbe hasarlı tabakalar hesaba katıldığı gibi karmaşık detaylı modelin detaylandırılmasında uygun bir metoddur. Örneğin Guedra-Degeorges ve arkadaşları (1991) hasar alanının tabakanın önünden arkasına doğru arttığını gösteren deneysel delillere dayalı bir sonlu eleman modeli kullandılar. Delaminasyon miktarının kalınlık boyunca parabolik olarak değiştiği hesaba katıldı. Yerel burkulma başlangıcı genellikle katastropik deformasyon ile çakışmaz. Darbe hasarlı tabakanın CAI dayanımını tahmin etmek için birkaç yazar (İlcwicz ve arkadaşları 1989, Xiong ve arkadaşları 1995) kararsızlık ve elyaf kopması nedeniyle darbe hasarı etrafındaki gerilmenin yeniden dağılımını göz önünde bulundurdular. İleri burkulma halinde, bir alt tabakanın rijitlik kaybını etkin bir şekilde doğrulayan sabit yük taşıdığı varsayılır. Daha

yumuşak kalıntı içeren kompozit plakanın deformasyonu maksimum şekil değiştirme kriteri yada diğer uygun deformasyon kriterleri kullanılarak tahmin edilebilir. Deformasyon, yük altında delaminasyonun artması olarak ta belirlenebilir.

Peck ve Springer (1991) ileri burkulma rejiminin detaylı gerilme analizine dayalı bir kırılma mekaniği yaklaşımı kullanarak delaminasyon büyüme başlangıcını araştırdılar. Delaminasyon büyümesi için gerekli yük, toplam potansiyel enerji azalmasının malzemenin kritik şekil değiştirme enerjisi azalma miktarını aştığı varsayılarak hesaplandı. Kuvvet-şekil değiştirme ilişkilerinin ve model tarafından tahmin edilen delaminasyon büyüme başlangıcı için gereken yüklerin, deneysel verilerle oldukça iyi uyduğu görüldü. Sunulan örneklerde delaminasyon büyümesi için gerekli yükler, burkulma yüklerinden kayda değer şekilde büyüktü.

Şekil değiştirme enerjisi azalma miktarını belirlemek için delaminasyonların çoğunlukla her zaman ki benzer modunda büyüdüğü varsayılır yani eliptik delaminasyonun en-boy oranının sabit olduğu varsayılır. Aslında şekil değiştirme enerjisi azalma miktarı delaminasyon civarında kayda değer bir şekilde değişir ve bu etkiyi bilmek için detaylı bir sonlu eleman analizi gereklidir (Naganarayana ve Alturi 1995).

Basit çift konsollu giriş numunesi analizi, basit bir durum olması rağmen delaminasyon civarında SERR dağılımının düzgün olmadığını gösterdi (Zheng ve Sun 1995). Böyle analizler için delaminasyona uğramış bölgedeki her bir alt tabakanın ayrı bir plaka olarak modellendirilmesi ve plakanın hasarsız kısmının hasarlı kısma bağlantısı ile sonlu eleman modelleri oluşturulabilir. (Naganarayana ve Alturi 1995).

Diğer yaklaşım tüm bir tabakayı iki plaka olarak düşünülmesidir. Bir tanesi delaminasyonun altında diğeri de üstünde olduğunu düşünürsek üst ve alt kısımlar ara yüzey boyunca delaminasyon dışında ve temas eden yüzeyler delaminasyona uğramış bölge içinde kaldığı düşünülmektedir (Zheng ve Sun 1995).

Gillepsi ve Carlsson (1991), termoset ve termoplastikler içerisindeki burkulmayı ve genişlik boyunca büyüyen delaminasyonu inceledi. Delaminasyon ilerlemesinin başlangıcı, karma mod deformasyon kriteri kullanılarak tahmin edilir.

$$\frac{G_I}{G_{Ic}} + \frac{G_{II}}{G_{IIc}} = 1 \quad (7.19)$$

Kısa ve kalın delaminasyonlar, mod 1 koşulları altında büyürken, uzun ve ince delaminasyonlar, mod 2 kırılma mekaniği koşullarında büyüdüğü gösterildi. Bu; Hill ve Shi (1993)'in CAI dayanımı ile bazı zamanlarda G_{Ic} ve G_{IIc} arasında, diğer zamanlarda ise G_{IIc} arasında deneysel olarak bulunan bağıntı göz önünde bulundurarak yaptığı gözlemlerle tutarlılık arz etmektedir. Bu sonuç malzeme geliştirme ile ilgilidir. Aslında yüksek değerdeki mod 1 ve mod 2 kritik şekil değiştirme enerji miktarından dolayı hasar toleransının artırıldığını savunan birçok makale yayımlanmıştır. Ancak bu yaklaşımda bazı zorluklar mevcuttur. G_I ve G_{II} nin belirlenmesi zordur. Kritik şekil değiştirme enerji miktarının deneysel olarak belirlenmesi zordur ve (7.19) denkleminde verilen deformasyon kriterinin yanında daha birçok deformasyon kriteri de ileri sürülmektedir(Garg 1988)

8. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

8.1. 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. 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 $(0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ)_s$ şeklinde yönlendirilmiş 8 tabakalı 4.8 mm kalınlığında E-cam/epoksi tabakalı kompozit numune kullanılmıştır. Başka bir çalışmada ise (Whittingham ve ark. 2004) $215 \times 215 \times 1.66$ ölçülerinde 8 tabakalı $[0^\circ,+45^\circ,-45^\circ,90^\circ]_s$ grafit/epoksi kullanılmıştır.

Bu çalışmada kullanılan deney numuneleri 140×140 mm olarak seçilmiştir. Numuneler 16 tabakalı $[0^\circ,-45^\circ,+45^\circ,0^\circ,90^\circ,+45^\circ,-45^\circ,0^\circ]_s$ şeklinde tek yönlü güçlendirilmiş E cam/epoksi tabakalı kompozit malzemeden hazırlanmış olup numunelerin her biri 3.0 mm kalınlığındadır. önceki yapılmış olan çalışmalarda kullanılan numunelerden elde edilen değerlerle bir kıyaslama yapılabilmesi için, cam takviyeli epoksi malzemelerin yüksek dayanıklılığının yanında üretim proseslerinin kolaylığı nedeniyle ucuz ve çabuk temin edilebilir olması kullanılacak numune malzemesi seçiminde göz önünde bulundurduğumuz nedenler olarak sıralayabiliriz. Şekil 8.1'de 140×140 mm boyutlarındaki deney numunesinin ön tarafından çekilen fotoğraf görülmektedir.

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

İZOREEL Kompozit İzole Malzemeler Sanayi ve Ticaret Limited Şirketi'nde Epoksi/Cam Kumaş bazlı levhaların kalite sınıfları şu şekilde sıralanmıştır,

Epoksi/Cam Kumaş bazlı levhaların kalite sınıflarının belirgin özellikleri Çizelge 8.1' de verilmiştir.

Çizelge 8.1 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	-
Elektriksel Özellikler					
Elektriksel mukavemet (90°C yağda)	IEC 243-1	KV/mm	18	13	18
Dağılma faktörü, 50Hz	IEC 250		0,008	0,005	0,008
Geçirgenlik, 50Hz	IEC 250		5,0	4,5	5,0

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

Daha sonra yapısı ve çalışması açıklanacak olan cihaz üzerindeki darbe ucu 18 kg lık bir kütleye sahiptir. Tabaka sayısının belirlenmesinde bu kütle göz önünde tutulmuştur. Kütle fazla olduğu için deney numunesinin 16 tabakalı tek yönlü güçlendirilmiş kompozit malzeme seçilmesi uygun görülmüştür. Numunenin uzunluğu geliştirilen cihaz üzerindeki bağlama aparatına uygun olarak belirlenmiştir. Deney numunesi dört tarafı ankastre olarak bağlanmıştır. Numunenin kenarından itibaren kalıp tarafından tutulduğu mesafe 20 mm'dir.

8.2. Yakma Deneyi

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

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

$$V_f = \frac{W_f / \rho_f}{W_c / \rho_c} \quad (8.1)$$

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

Bu çalışmada kullanılan malzemelerin yakma deneyi sonucunda elyaf hacimsel oranları (V_f), 16 tabakalı deney numuneleri için 0.65 olarak bulunmuştur.

8.3. Düşük hızlı darbe deneyi

8.3.1. Ağırlık Düşürme Test Cihazı

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



Şekil 8.1 Ağırlık düşürme test cihazı

Cihaz 2.5 m yüksekliğindedir. Darbe ucu 17 kg kütleli olup 2.0 m den serbestçe düşebilmektedir. Ağırlığın istenilen mesafeden bırakılabilmesi için kilit mekanizması vardır. Böylece değişik darbe hızlarında deney yapılabilmektedir. Serbest düşme ile öngörülen en büyük teorik hız 6.0 m/s dir.

Cihazımız üç ana elemandan oluşmaktadır. Bunlardan birincisi bağlama aparatı, çelik raylar ve darbe ucu kütesini üzerinde tutan alt tabladır. İkincisi ise çelik ray-darbe ucu kütesi bağlantısı ve numune bağlama aparatı grubudur. Son elemanımız ise elektronik kontrol ünitesidir. Ağırlık düşürme test cihazımız Şekil 8.1’de görülmektedir

Ayrıca cihaz üzerinde darbe ucu kütesini istediğimiz yüksekliğe kaldırabileceğimiz bir palanga sistemi mevcuttur. Palanga halatının uç kısmında darbe ucu kütesini tutan bir mekanik kanca sistemi vardır. Bu sistemin üzerinde bulunan manüel kol kaldırıldığı anda darbe ucu kütesi serbest düşme ile çelik ray üzerinde düşey harekete geçer.

Şekil 8.2 de darbe ucu kütesinin en az sürtünmeyle serbest düşmesini sağlayan TecnoLine lineer yatak sistemi görülmektedir. Çelik ray üzerinde hareket eden karşılıklı dört adet tekerlek vardır. Şekilde 8.3’te görüldüğü gibi darbe ucu kütesinin her iki kenarına da bağlanarak monte edilmiştir. Darbe ucunun kütesi, bağlı olduğu lineer yatak, Al döküm gövde, ucu ve bağlama elemanları ile beraber toplam 17 kg dır.



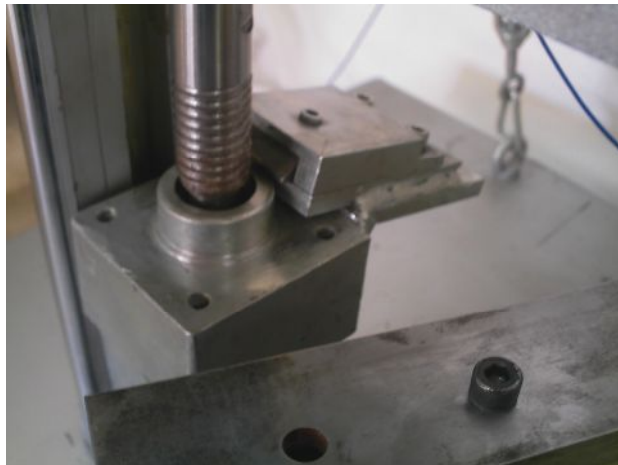
Şekil 8.2 TecnoLine lineer-yatak sistemi



Şekil 8.3 Darbe ucu

8.3.1.1. Darbe ucu Durdurma Mekanizması

Şekil 8.4’te kuvvet uygulandıktan hemen sonra darbe ucuyu durduran mekanik kilit sistemi görülmektedir. Darbe ucu kütesinin her iki kenarına da kilit mekanizması yerleştirilmiştir. Darbe ucu numune üzerine ilk darbeyi yaptıktan sonra mekanik kilit sistemi darbe ucu kütesinin hareketini durdurmaktadır. Böylece tekrarlı darbeler engellenmiştir.



Şekil 8.4 Darbe ucu durdurma mekanizması

8.3.1.2. Darbe ucu Geometrisi ve Kuvvet Algılayıcı

Şekil 8.5’da darbe ucu ile kuvvet algılayıcı bağlantısı görülmektedir. Denejde kullanılan darbe ucu 24 mm çapında, yarı küresel uçlu bir geometriye sahiptir. Denejde kullanılan kuvvet algılayıcı PCB Quartz ICP Force Sensor (M202B04) modelidir. 22.6 kN ölçme kapasitesi vardır. Darbe ucu kütlesi ile darbe ucu arasına monte edilmiştir. Kuvvet algılayıcıya bağlı teflon kablo yardımı ile sinyal elektronik kontrol ünitesine iletilmektedir.



Şekil 8.5 Darbe ucu-Kuvvet algılayıcı bağlantısı

8.3.1.3. 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.

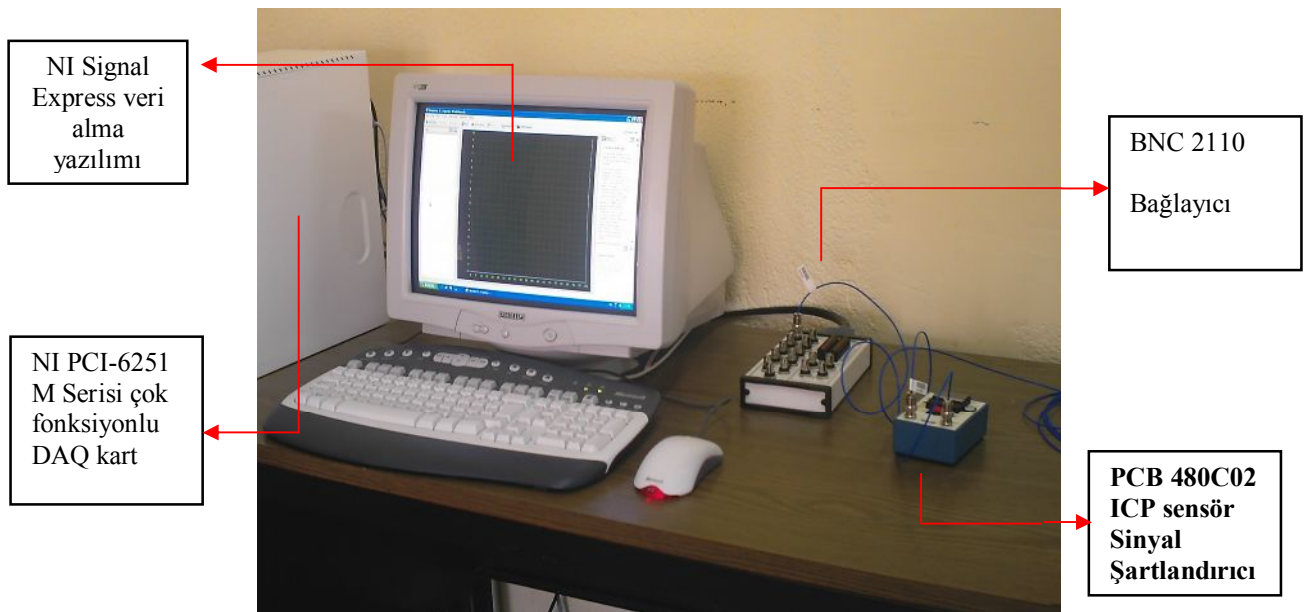
Sinyal şartlandırıcı’ da yükseltiletilen sinyali DAQ karta iletilebilmesi için BNC bağlayıcı blok kullanılmıştır. Sinyalin doğrudan DAQ karta verilmesi risk taşımaktadır. Kartın yanmasına veya işlevini yitirmesine sebep olabilir. Bu yüzden yükseltiletilen sinyal bir bağlayıcı blok üzerinden iletilmektedir. Sistemle uyumlu çalışabilmesi için BNC

2110 bağlayıcı blok kullanılmıştır. Bağlayıcı blok farklı verilerinde aktarılmasında kullanılabilir. Örneğin hız sensöründen alınan bir veri kolaylıkla DAQ karta iletebilir. Ayrıca mevcut sistemle beraber çalıştırılacak cihazlar için DAQ kart tarafında üretilen gerilim bu bağlayıcı blok üzerinden alınabilir. 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 işleyebilir. Bunun yanı sıra istediğimiz özellikte yeni sinyaller de üretilebilir. Bu sinyalleri bağlayıcı blok üzerinden alarak başka sistemler çalıştırılabilir.

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

Şekil 8.6'de elektronik kontrol ünitesi görülmektedir.



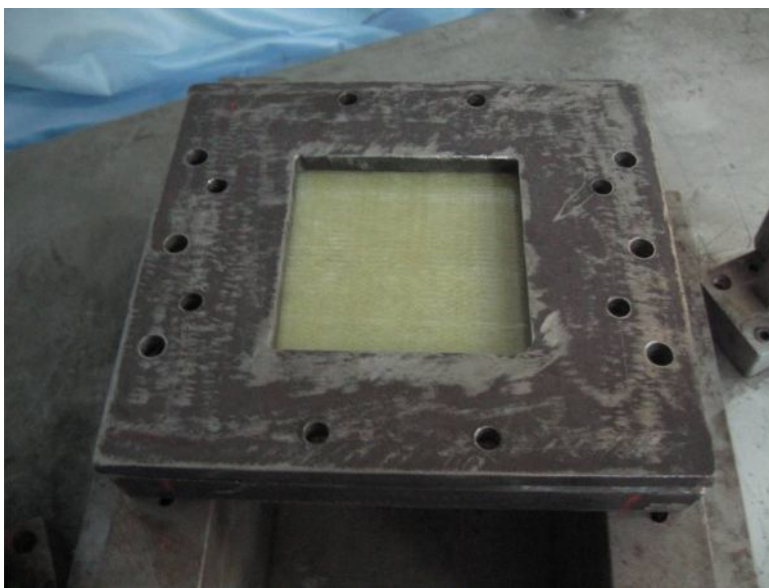
Şekil 8.6 Elektronik kontrol ünitesi

8.3.2. Düşük Hızlı Darbe Deneyinin Yapılması

Şekil 8.7a,b’de görüldüğü gibi deneyde kullanılan numuneler dört tarafı ankastre olacak şekilde bağlama aparatına bağlanmıştır. Numune boyutları 140×140 mm, kalınlığı ise 3 mm dir. Merkezi çarpmanın temini için önce her bir deney numunesinin merkezi markalama ile tespit edilmiştir. Bağlama aparatına yerleştirilirken darbe belirlenen bu merkeze olacak şekilde numunenin monte edilmesi sağlanmıştır.



Şekil 8.7a Dört tarafı ankastre deney aparatı

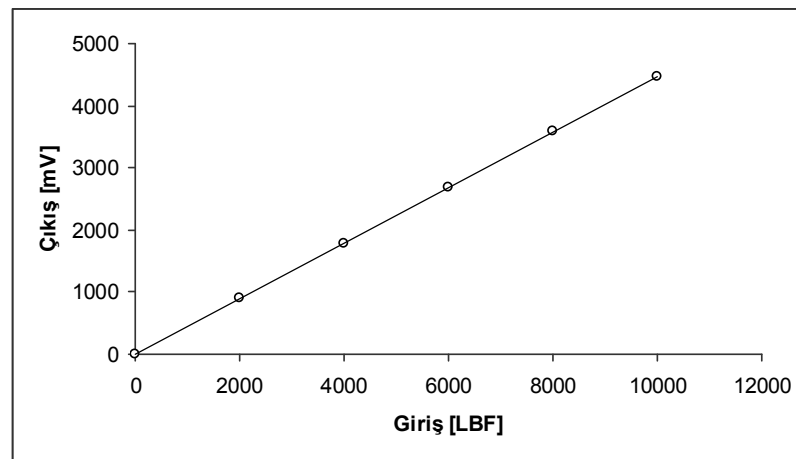


Şekil 8.7b Dört tarafı ankastre bağlanmış deney numunesi

İki kademede yapılması planlanan deneylerden ilki darbe deneyidir. Darbe deneyleri 2.0 m/s, 2.5 m/s ve 3.0 m/s, 3.5 m/s, 4 m/s'lik çarpma hızlarında yapılmıştır. Bu hızları elde edebilmek için darbe ucu kütlelerini bırakacağımız yükseklik teorik olarak hesaplanmıştır. Darbe ucu kütlesi 2.0 m/s'lik çarpma hızı için 20.4 cm, 2.5 m/s'lik çarpma hızı için ise 31.9 cm, 3.0 m/s çarpma hızı için ise 45.9cm, 3.5 m/s'lik çarpma hızı için 62.5cm ve 4 m/s'lik çarpma hızı için 81.6cm yükseklikten düşürülmüştür. Yarı küresel uçlu darbe ucu ile her bir numunenin merkezine darbe yapılmıştır. Darbe ucu ilk darbeyi yaptıktan sonra darbe ucu 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 beş ayrı çarpma hızında elde edilen en büyük temas kuvvetleri ve bu kuvvetlerin etkisi belirlenmiştir. Hasara uğramış numunelerin makro yapıda hasar analizleri yapılmış ve hasar haritaları oluşturulmuştur.

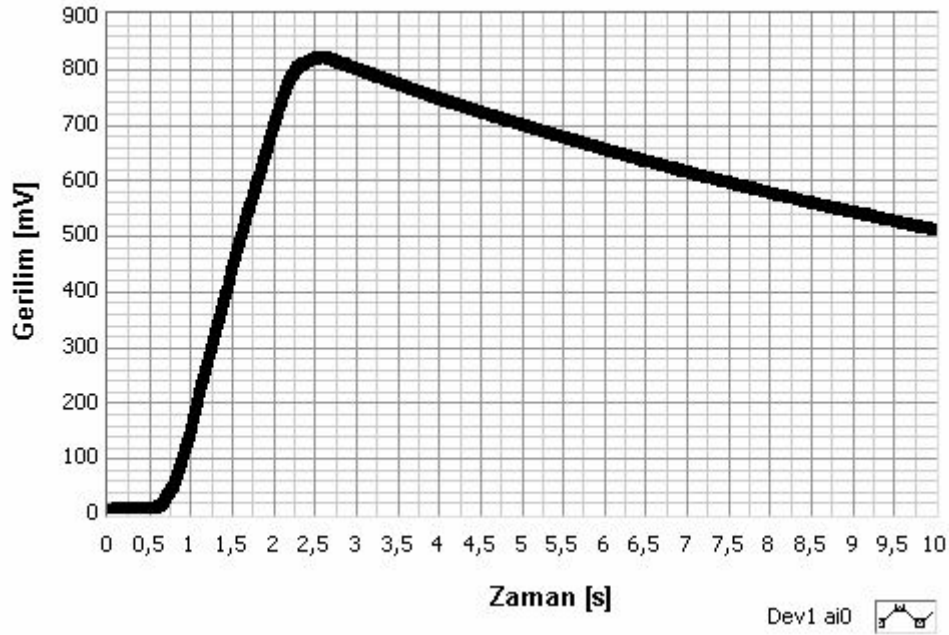
8.3.3. Kalibrasyon

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 6.8 da görülmektedir.



Şekil 8.8 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 8.9 da verilmiştir.



Şekil 8.9 PCB kuvvet sensörü ön yüklemesi

8.4. Burkulma deneyi

Darbe deneyi gerçekleştirilmiş hasarlı numuneler ikinci kademedeki Ünlversal Çekme-Basma Deney Makinasında burkulma testine tabi tutulmuşlardır ve darbe hasarının burkulma yüküne etkisi belirlenmiştir.

8.4.1. Burkulma deney tesisatı

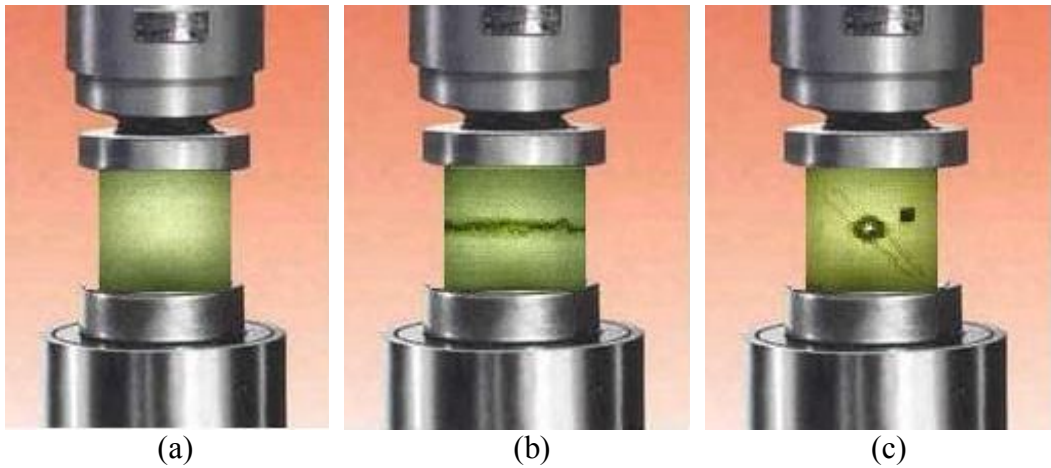
Burkulma deneyi üniversal çekme-basma makinesinde yapıldı. Makine hidrolik çekme-basma tertibatı ve gösterge panelinden oluşmaktadır. 100 ton' a kadar basma kuvveti oluşturabilmektedir. Şekil 8.10'da Ünlversal Çekme-Basma Makinesinin resmi verilmiştir.



Şekil 8.10 Ünlversal Çekme-Basma Makinesi

8.4.2. Burkulma deneyinin yapılması

Ünlversal Tezgah çalıştırıldı ve numune üzerine uygulanacak yük belirlendi. Öncelikle sağlam numune silindirler arasında sabitlendi. Sağlam numuneler burkulma işlemine tabi tutuldu. Sağlam numunelerin elastik burkulma ve ileri burkulma yük değerleri kaydedildi. Daha sonra sırasıyla 2, 2.5, 3, 3.5, 4 m/s hızlarda düşük hızlı darbeye maruz kalmış darbe hasarlı numuneler burkulma işlemine tabi tutuldu. Burkulma yük değerleri göstergeden okundu ve kaydedildi. Şekil 8.10'da Ünlversal Çekme-Basma Makinesine bağlanmış sağlam ve hasarlı numunelerin burkulma resimleri verilmiştir. (Şekil 8.10 (a) sağlam numune burkulması (b) sağlam numune ileri burkulma hali (c) darbe hasarlı numune burkulması)

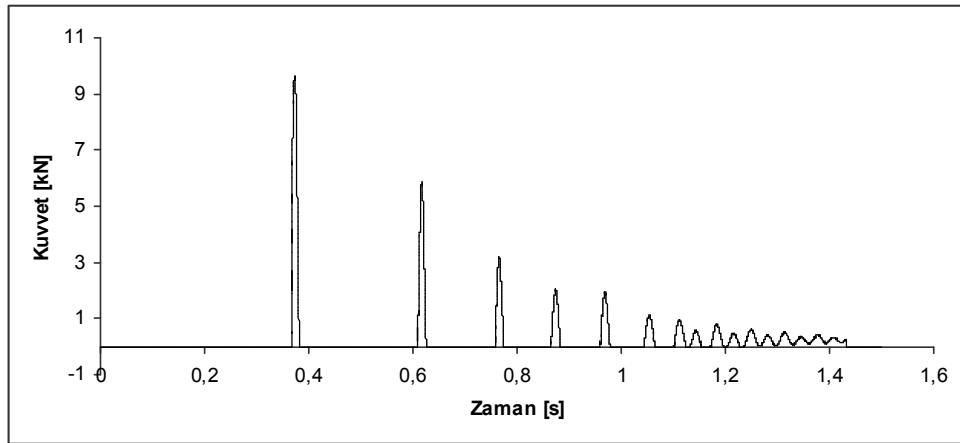


Şekil 8.10 Ünlversal Çekme-Basma Makinesine bağlanmış sağlam ve hasarlı numunelerin burkulma resimleri

9. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME

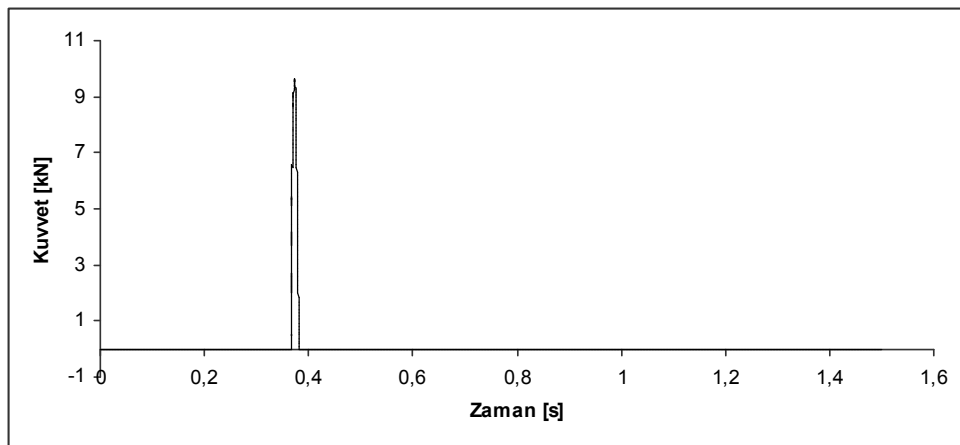
9.1. Darbe ucu ile Deney Numunesi Arasındaki Temas Kuvvetleri

Düşük hızlı darbe deneyleri 2.0 m/s, 2.5 m/s, 3.0 m/s, 3.5 m/s ve 4 m/s çarpma hızlarında 17 kg kütleli darbe ucu ile yapılmıştır. Dört tarafı ankastre olan deney numunelerinin düşük hızlı darbe cevabını araştırmak için geliştirilen cihazın elektronik aksamında kullanılan NI Signal Express 1.0 yazılımından alınan örnek bir sinyal Şekil 9.1'de görülmektedir. Burada darbe ucu 32 cm yükseklikten bırakılmış ve numune üzerinde tekrarlı darbeler yapılmıştır. Darbe ucu serbest düşmeye bırakıldığı yükseklikten deney numunesine temas edinceye kadar geçen sürede alınan sinyal değeri sıfırdır. Darbe ucunun deney numunesine temas ettiği andan itibaren kuvvet değeri yükselmeye başlamıştır. Kuvvet değeri azami bir değere (peak value) ulaştıktan sonra tekrar düşmüş ve sıfır seviyesine gelmiştir. Kuvvet değeri sıfır olur olmaz darbe ucu geriye doğru sıçramış ve numune ile teması kesilmiştir. Belirli bir yüksekliğe ulaştıktan sonra yerçekiminin etkisiyle tekrar serbest olarak düşmüştür ve deney numunesine ikinci darbeyi yapmıştır. Birinci darbede enerjinin bir kısmı soğurulduğu için ikinci darbe daha düşük bir enerji seviyesinde olmuş ve buna bağlı olarak azami kuvvet değeri de daha düşük olmuştur. Darbe ucu numune üzerinde duruncaya kadar tekrarlı darbeler devam etmiştir. Her darbede darbe ucunun enerjisi azaldığından azami kuvvet değeri zamana göre azalmış darbe ucu durduğunda sıfır olmuştur.



Şekil 9.1 Tekrarlı darbeye maruz deney numunesinden zamana bağlı olarak alınan kuvvet sinyalleri

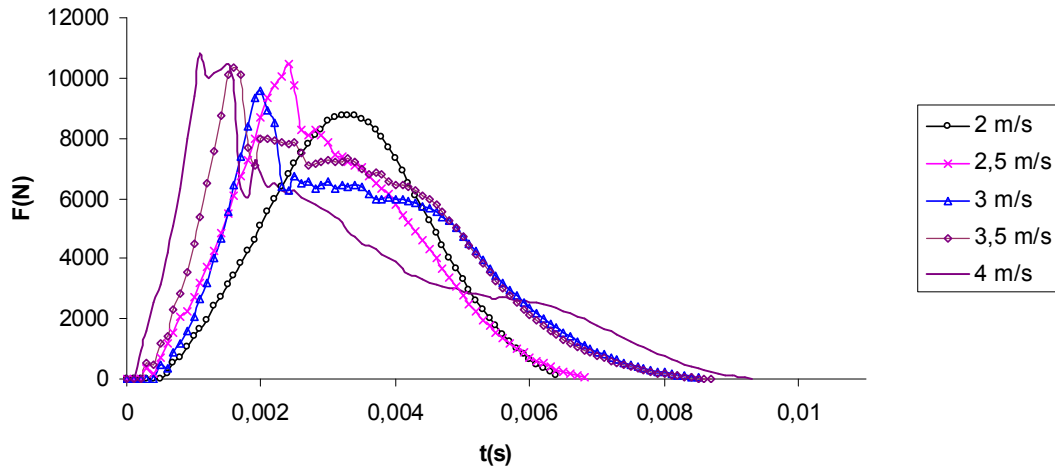
Bu tez çalışmasında sadece ilk darbenin etkileri araştırılmıştır. Bunu amaçla ilk darbeden sonra darbe ucu tutulmuştur. Darbe ucunun tutulmasıyla elde edilen örnek bir sinyal Şekil 9.2' de görülmektedir.



Şekil 9.2 Tek darbeye maruz deney numunesinden zamana bağlı olarak alınan kuvvet sinyalleri

Şekil 9.3 de 140×140 mm ebatlarındaki deney numunelerinde 2.0 m/s, 2.5m/s, 3.0 m/s, 3.5 m/s ve 4 m/s çarpma hızlarında elde edilen kuvvet-zaman değişimleri görülmektedir.

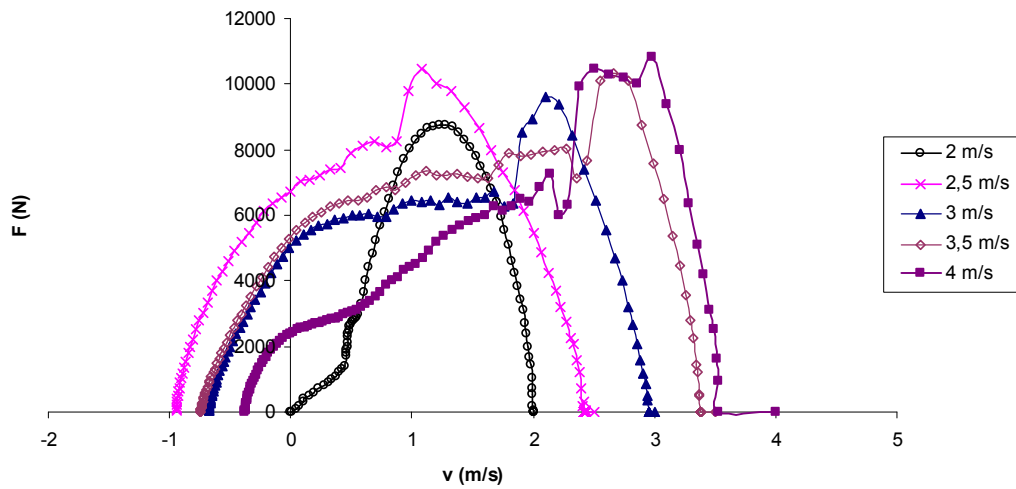
Elde edilen kuvvet–zaman değişimlerinin ıngırak eğrisi Şeklinde olduğu görülmektedir. Bütün Şekillerde kuvvet hızla artarak bir azami kuvvet değerine ulaşmaktadır ve daha sonra sıfıra düşmektedir. Her bir grafikte darbenin başlangıcında bir salınım meydana geldiği görülmektedir. Bu durum numunenin merkezi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



Şekil 9.3 Değişik arpma hızlarında 140×140 mm numunelerde temas kuvveti–zaman değişimi

9.1.1. Çarpma Hızının Temas Kuvvetine Etkisi

Düşük hızlı darbeye maruz bir numunede çarpma hızının temas kuvvetine olan etkisini belirleyebilmek için deneylerden elde edilen veriler 140×140 mm numuneler için derlenmiş ve bu değişimler Şekil 9.4 de çizilerek gösterilmiştir.



Şekil 9.4 Değişik çarpma hızlarında 140×140 mm numunelerde temas kuvveti-çarpma hızı değişimi

Numunelerin değişik çarpma hızlarında yapılan darbe deneylerinde elde edilen en büyük temas kuvveti ile temas süresi değerleri Çizelge 9.1 de verilmiştir.

Çizelge 9.1 Düşük hızlı darbe deneylerinde elde edilen en büyük temas kuvveti ve darbe ucu temas süresi değerleri

Numune Boyutları [mm]	Çarpma Hızı [m/s]	En Büyük Temas Kuvveti [kN]	Temas Süresi [s]
140×140	2	8758.88	0.0002
	2.5	10470.36	0.0002
	3	10510.48	0.0002
	3.5	10343.51	0.0002
	4	10834.80	0.0002

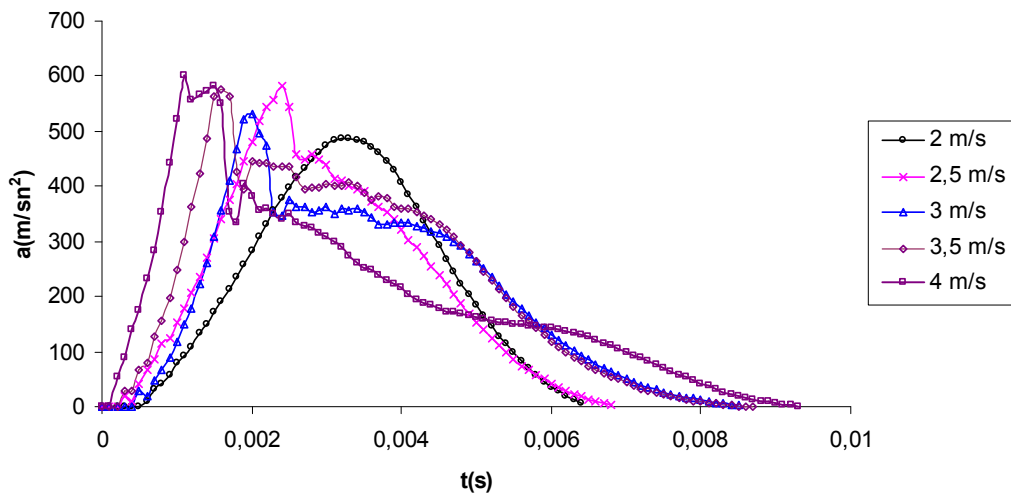
9.2. Kinetik Analiz Neticesinde Elde Edilen Değerler

Tüm deney değerleri üzerinde yapılan hesaplamalar neticesinde ivme-zaman, hız-zaman, yer değiştirme-zaman, kuvvet-yer değiştirme değişimleri elde edilmiştir. Her bir deney numunesi için elde edilen grafikler, karakteristik olarak diğer numuneler için elde edilene benzemektedirler. Bu nedenle değişimleri göstermesi amacıyla 140×140

mm boyutlarındaki deney numunelerinde 2.0 m/s, 2.5 m/s, 3.0 m/s, 3.5 m/s ve 4 m/s çarpma hızları için elde edilenler grafik olarak takip eden alt bölümlerde verilmiştir

9.2.1. İvme – Zaman Değişimi

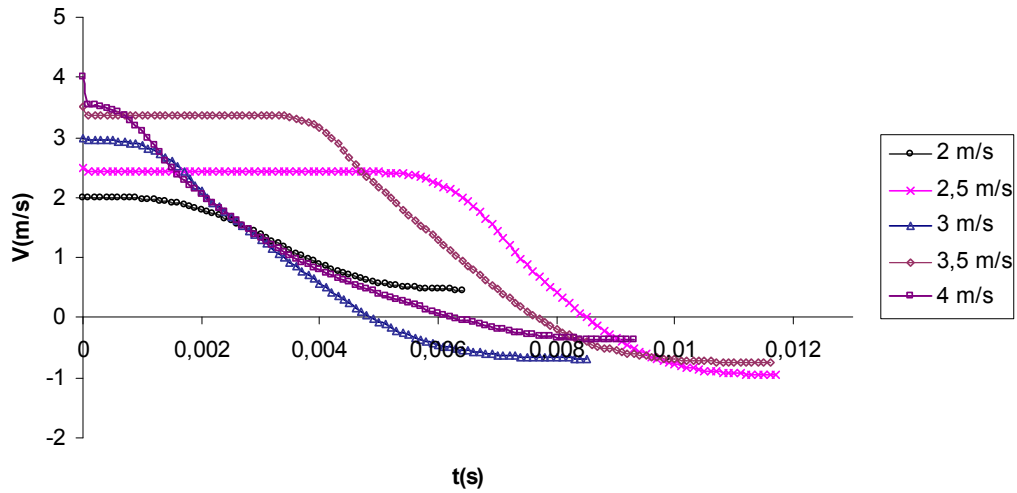
İvmenin zamana bağlı değişimi bir parçacık için Newton'un II kanununun uygulanmasıyla kuvvet-zaman değerlerinden elde edilmiştir. İvmenin zaman göre değişimi temas kuvvetinin zamana göre değişimine benzemektedir. Şekil 9.5'de değişik çarpma hızlarında 140×140 mm boyutlarındaki numunelerde ivme-zaman değişimi, Şekil 7.9'da ise değişik numunelerde 2.0 m/s, 2.5 m/s, 3.0 m/s, 3.5 m/s ve 4 m/s çarpma hızlarında ivme-zaman değişimi görülmektedir.



Şekil 9.5 Değişik çarpma hızlarında 140×140 mm numunelerde ivme-zaman değişimi

9.2.2. Hız – Zaman Değişimi

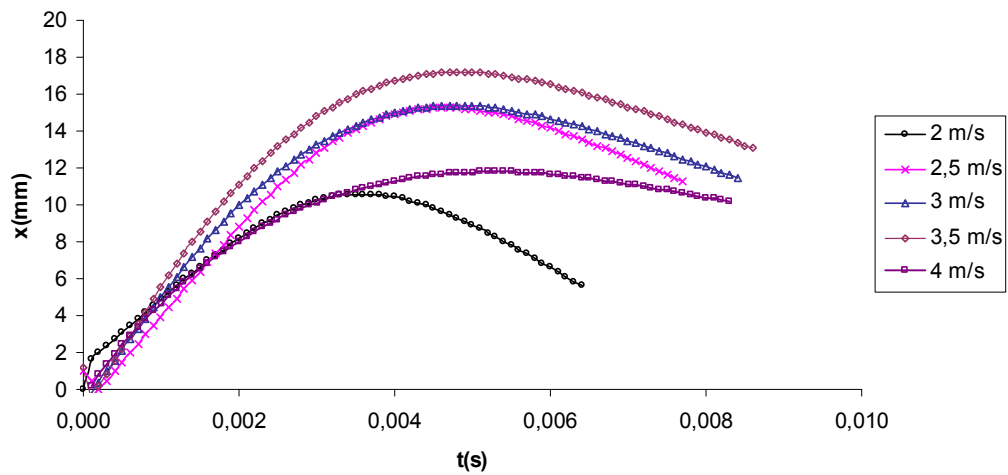
Hızın zamana bağlı değişimi, ivme-zaman değerlerinden iki veri arasındaki değişimin doğrusal olması yaklaşımı ile sayısal integral yöntemlerinden yamuklar kuralı yardımıyla elde edilmiştir. Hızın zaman göre değişimi katı cisim darbe teorisiyle verilen değişime benzer çıkmıştır. Şekil 9.6'da değişik çarpma hızlarında 140×140 mm boyutlarındaki numunelerde hız-zaman değişimi görülmektedir.



Şekil 9.6 Değişik çarpma hızlarında 140×140 mm numunelerde hız–zaman değişimi

9.2.3. Yer Değiştirme – Zaman Değişimi

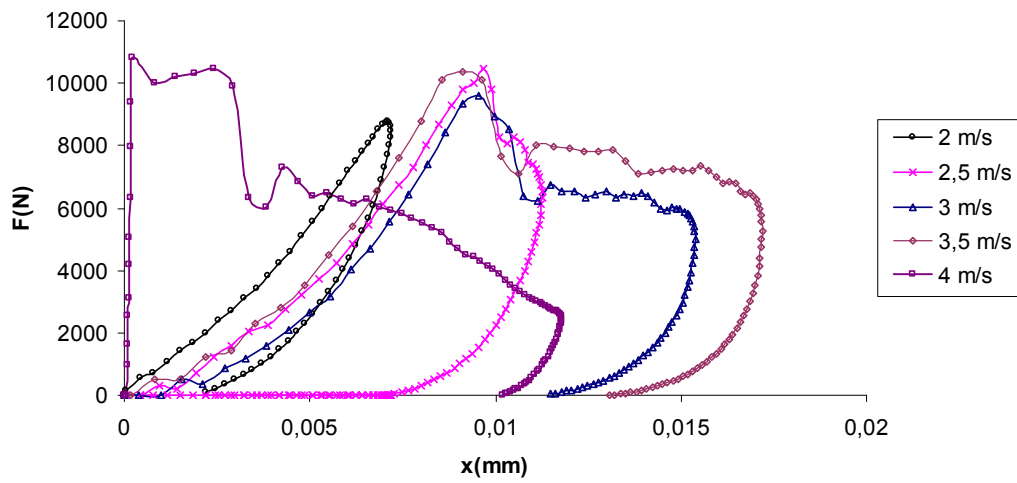
Yer değiştirmenin zamana bağlı değişimi, hız-zaman değerlerinden iki ivme verisi arasındaki değişimin doğrusal olması yaklaşımı ile sayısal integral yöntemlerinden yamuklar kuralı yardımıyla elde edilmiştir. Şekil 9.7’de değişik çarpma hızlarında 140×140 mm boyutlarındaki numunelerde yer değiştirme-zaman değişimi görülmektedir.



Şekil 9.7 Değişik çarpma hızlarında 140×140 mm numunelerde yer değiştirme –zaman değişimi

9.2.4. Kuvvet–Yer Değişirme Değişimi

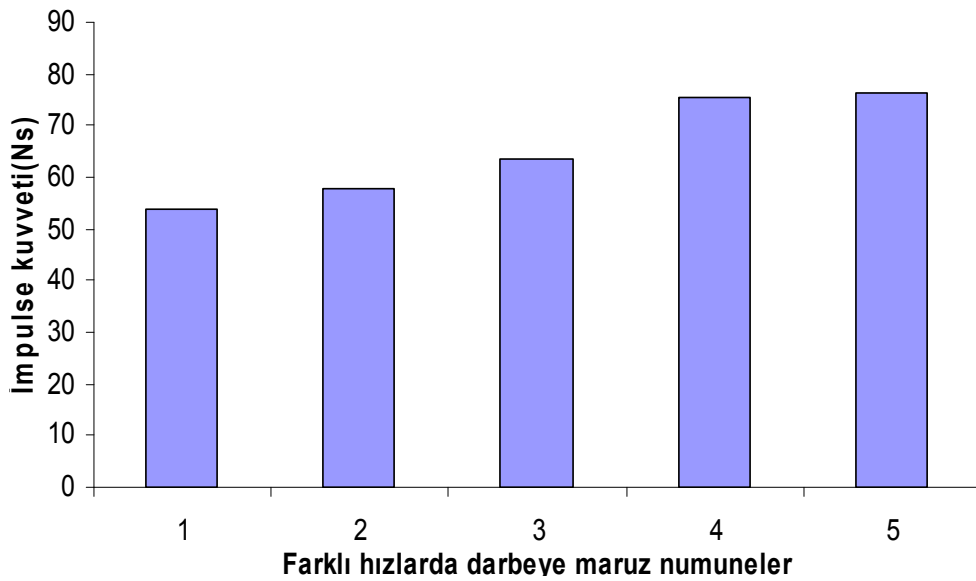
Kuvvetin yer değiştirmeye göre değişimi aşağıdaki grafiklerde sunulmuştur. Bu değişim katı cisim darbe teorisiyle verilen değişime benzer çıkmıştır. Kuvvet-yer değiştirme grafiği altında kalan alan numune üzerinde yapılan işi (numunede yutulan enerjiyi) vermektedir. Şekil 9.8’de değişik çarpma hızlarında 140×140 mm ebatlı numunelerde kuvvet–yer değiştirme değişimi görülmektedir.



Şekil 9.8 Değişik çarpma hızlarında 140×140 mm numunelerde kuvvet–yer değiştirme değişimi

9.3. İmpuls Kuvveti

Çarpışma sırasında cisimlerin hareketini değiştiren kuvvet, genellikle çok kısa sürelerde etkilidir. İmpuls kuvveti lineer momentumdaki değişmeye eşit olup aynı zamanda kuvvet-zaman eğrisinin altında kalan alana da eşittir. İmpuls kuvveti yamuklar kuralı yardımıyla eğri altında kalan alanın tespit edilmesiyle bulunmuştur. Elde edilen değerler Şekil 9.9’da gösterilmiştir.



Şekil 9.9 140×140 mm numunelerde 2.0 m/s, 2.5 m/s, 3.0 m/s, 3.5 m/s ve 4 m/s çarpma hızları için elde edilen impuls kuvvetleri

9.4. Düşük Hızlı Darbede Enerji Dağılımı ve Hasar Bölgeleri

Düşük hızlı darbede darbe ucu kütesinin serbest düşmeye geçmeden önce sahip olduğu enerjinin (darbe enerjisi) aşağıdaki mekanizmalara harcandığı düşünülmektedir.

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

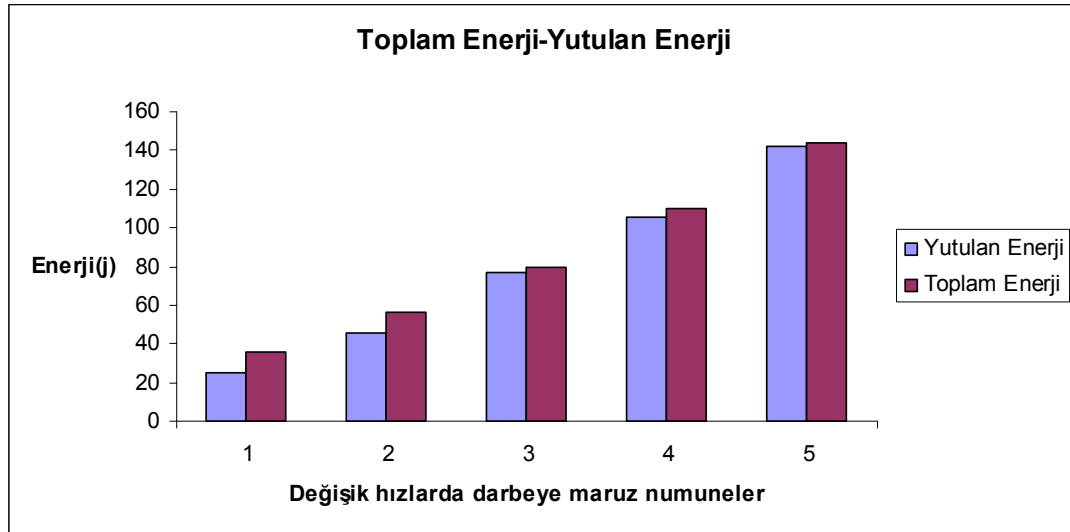
Kuvvet algılayıcı PCB kullanım el kitabında önerildiği şekilde sisteme bağlanmış ve ön yükleme yapılmıştır. Bu şartlar sağlandığında kalibrasyon eğrisinde garanti edilen değerler içerisinde kuvvet algılayıcıda harcanan enerji dikkate alınmamıştır. Bağlama aparatı ve alt tabla deney numunesine nazaran kalın, ağır ve rijit olduğu için bunlardaki elastik deformasyona harcanan enerji deney numunesine

harcanan enerjiye göre çok azdır ve dikkate alınmamıştır. Darbe ucu Ç4140 malzemesinden yapılp 63 Rc sertlik derecesinde sertleştirilmiştir. Bu nedenle darbe ucundaki elastik şekil değiştirme deney numunesine göre oldukça küçük olduğunda burada harcanan enerji ihmal edilmiştir. Numune bağlama aparatına yeterli sıklıkta bağlanarak kayması önlenmiştir. Darbe ucu kütesinin hareket ettiği ray ve lineer yatak sistemi 0.001 mm hassasiyetle çalışmakta olduğu için yatakta meydana gelen sürtünme kayıpları ihmal edilmiştir. Bu nedenlerle toplam enerji, parçaya aktarılan enerji ve sıçrama enerjisi olmak üzere iki kısımda değerlendirilmiştir. Parçaya aktarılan enerji şekil değiştirme enerjisi ve hasar enerjisi olarak harcanmaktadır.

Kinetik analiz sonucu elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafiklerinin altında kalan alan numune üzerine yapılan işi (numunede yutulan enerjiyi) vermektedir. Bu durumdan yararlanarak sıçrama enerjisi ve numuneye aktarılan enerji tespit edilmiştir (Şekil 9.10).

Darbe ucunun serbest düşmeye geçmeden önce sahip olduğu potansiyel enerji (darbe enerjisi) Bölüm 4.8'de verilmiştir. Bu enerji değerinden numunede yutulan enerji değeri çıkarıldığı zaman sıçrama enerjisi tespit edilmektedir. Farklı darbe hızlarına maruz numunelere ait enerji dengesi Çizelge 9.2 de verilmiştir.

Delinmenin oluşmadığı (Çizelge 9.3) ve oluştuğu (Çizelge 9.4) numunelerdeki yutulan enerji ile hasar alanları değişimleri ayrı çizelgeler halinde verilmiştir. Bunun nedeni; delinme sonrası numunenin yapısal özellikleri değişmektedir.



Şekil 9.10 numunelerde (a) 2.0 m/s, (b) 2.5 m/s, (c) 3.0 m/s, (d) 3.5 m/s ve (e) 4 m/s çarpma hızlarında enerji dağılımı

Çizelge 9.2 Farklı darbe hızlarına maruz numunelere ait enerji dengesi

ÇARPMA HIZI (m/s)	YÜKSEKLİK (cm)	TOPLAM ENERJİ (J)	YUTULAN ENERJİ (J)	SIÇRAMA ENERJİSİ (J)	YUTULAN ENERJİ (%)
2	20,4	36,0	25,4	10,6	71
2,5	31,8	56,1	45,8	10,3	82
3	45,3	80,0	76,7	3,3	96
3,5	62,5	110,3	105,9	4,4	96
4	81,6	144,0	141,9	2,1	99

Çizelge 9.3 Delinme oluşmayan numunelerde yutulan enerji ile hasar alanı analizi

NUMUNELER	YUTULAN ENERJİ (J) (%)	HASAR ALANI (mm ²)
2 m/sn darbeye maruz hasarlı numune	71	278
2,5 m/sn darbeye maruz hasarlı numune	82	499,19
3 m/sn darbeye maruz hasarlı numune	96	683,75

Çizelge 9.4 Delinme oluşan numunelerde yutulan enerji hasar alanı analizi

NUMUNELER	YUTULAN ENERJİ (J) (%)	HASAR ALANI (mm ²)
3,5 m/sn darbeye maruz hasarlı numune	96	655,24
4 m/sn darbeye maruz hasarlı numune	99	558

9.5. Darbe hasarlı numunelerin burkulma davranışları

Burkulma deneyi ile düşük hızlı darbeye maruz kalmış numuneler ikinci bir teste tabi tutuldular. Burkulma deney sonuçlarından elde edilen bilgiye göre düşük hızda darbeye maruz numunelerde delaminasyon için gerekli enerjinin bir kısmı numunenin delinmesi için harcanması nedeniyle toplam delaminasyon miktarında bir azalma olduğu sonucuna varıldı. Delinme sonrası delaminasyon miktarının azalması nedeniyle numune dayanımındaki azalmanın daha küçük seviyede olduğu gözlemlendi. Çizelge 9.5 ve 9.6 da hasar alanı burkulma yükü kıyaslaması verilmiştir.

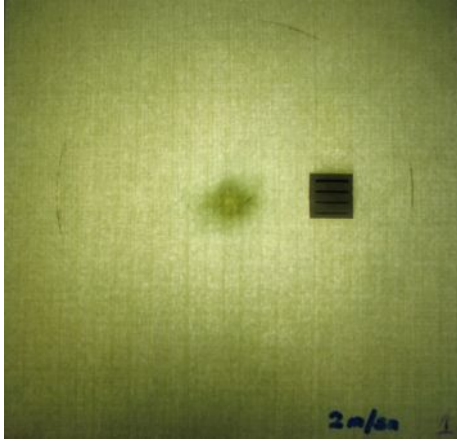
Çizelge 9.5 Delinme oluşmayan numunelerde burkulma kuvvetinin hasar alanı ile değişimi

NUMUNELER	HASAR ALANI (mm ²)	Burkulma Kuvveti
Hasarsız numune	0	13 kN
2 m/sn darbeye maruz hasarlı numune	278	10 kN
2,5 m/sn darbeye maruz hasarlı numune	499,19	9 kN
3 m/sn darbeye maruz hasarlı numune	683,75	6,5 kN

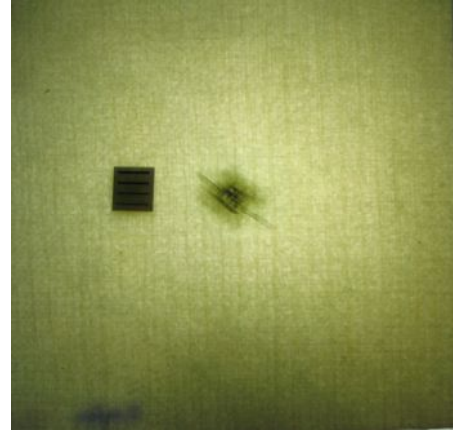
Çizelge 9.6 Delinme oluşan numunelerde burkulma kuvvetinin hasar alanı ile değişimi

NUMUNELER (Nüfuziyet meydana gelen)	HASAR ALANI (mm ²)	Burkulma Kuvveti
3,5 m/sn darbeye maruz hasarlı numune	655,24	8 kN
4 m/sn darbeye maruz hasarlı numune	558	10 kN

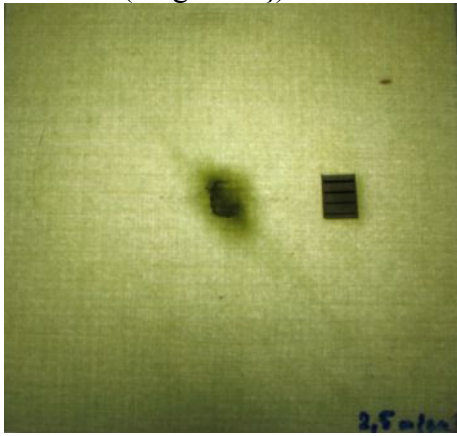
2 m/sn (ön görünüş)



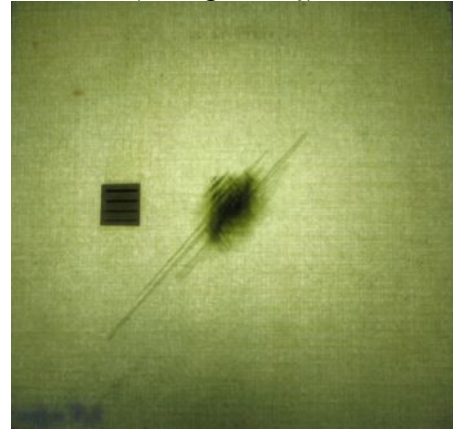
2 m/sn (arka görünüş)



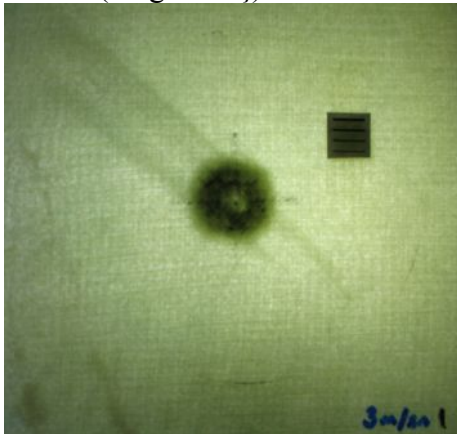
2.5 m/sn (ön görünüş)



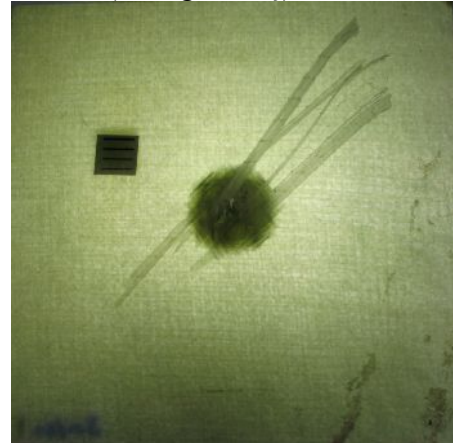
2.5 m/sn (arka görünüş)



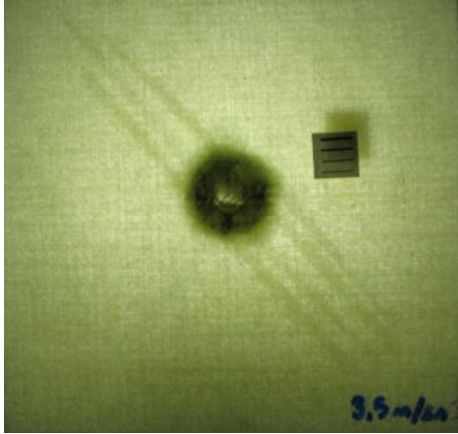
3 m/sn (ön görünüş)



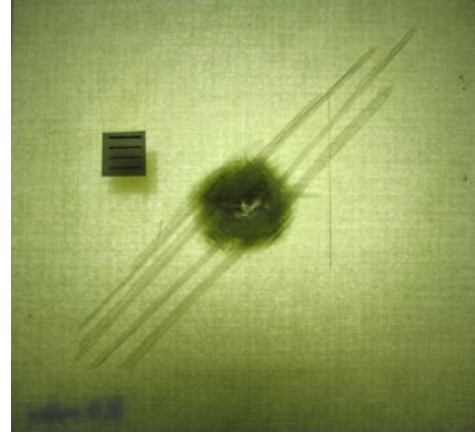
3 m/sn (arka görünüş)



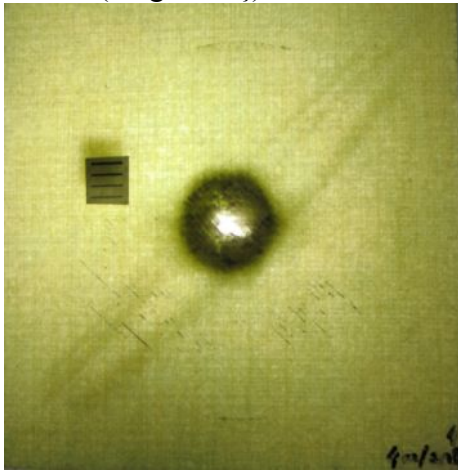
3.5 m/sn (ön görünüş)



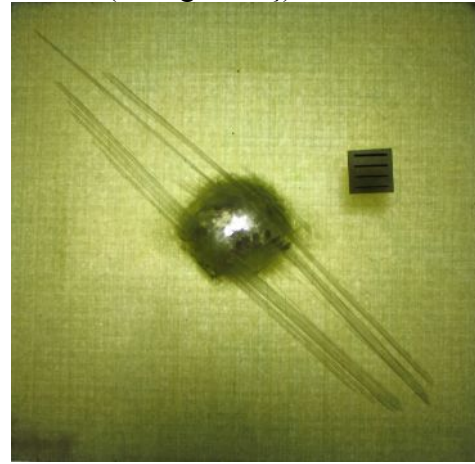
3.5 m/sn (arka görünüş)



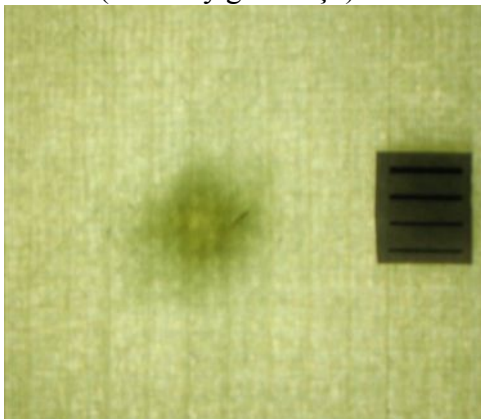
4 m/sn (ön görünüş)



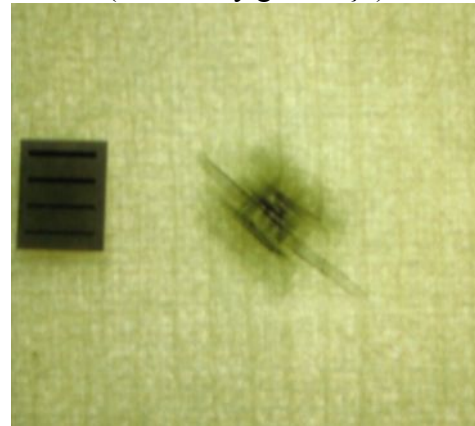
4 m/sn (arka görünüş)



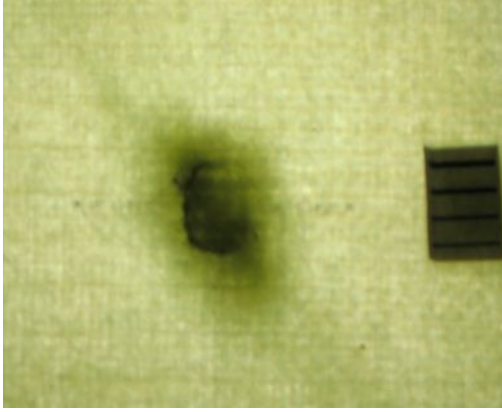
2 m/sn (ön detay görünüşü)



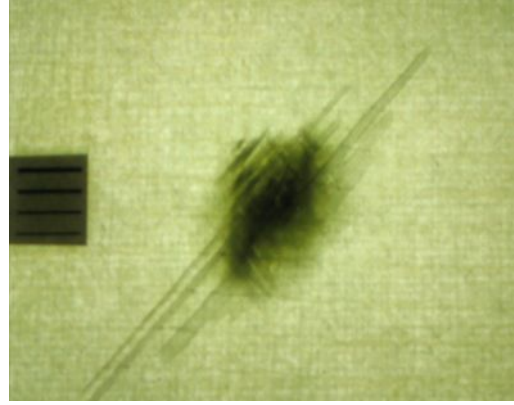
2 m/sn (arka detay görünüşü)



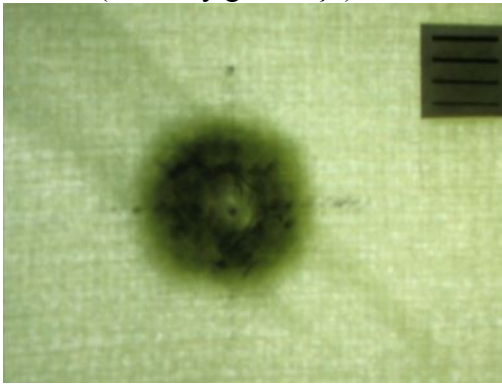
2.5m/sn (ön detay görünüşü)



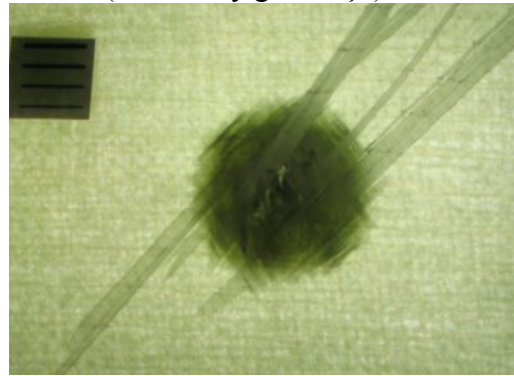
2.5m/sn (arka detay görünüşü)



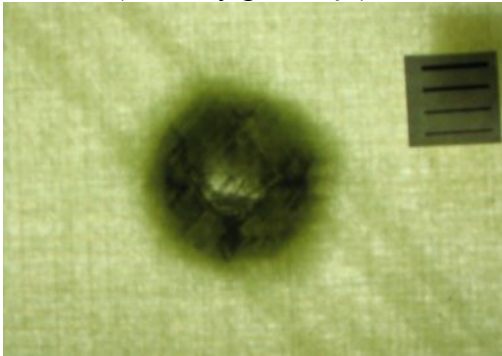
3 m/sn (ön detay görünüşü)



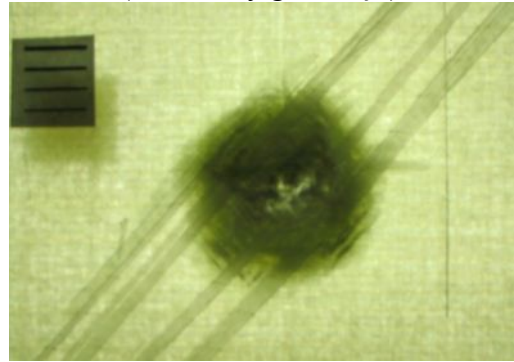
3 m/sn (arka detay görünüşü)



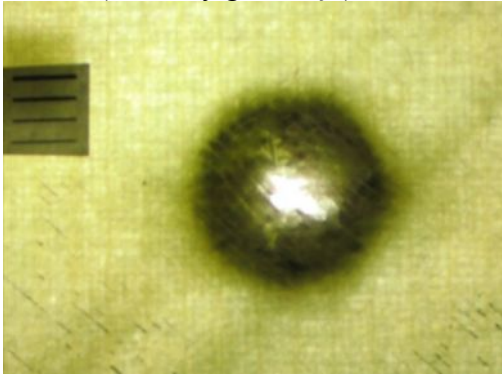
3.5m/sn (ön detay görünüşü)



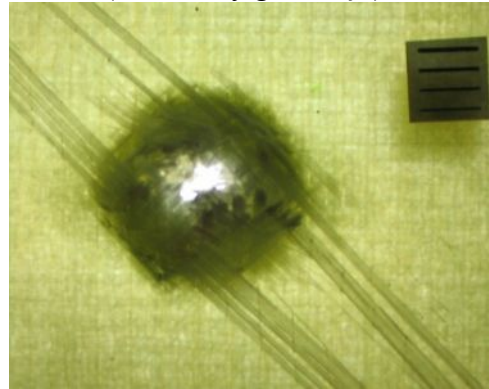
3.5m/sn (arka detay görünüşü)



4 m/sn (ön detay görünüşü)

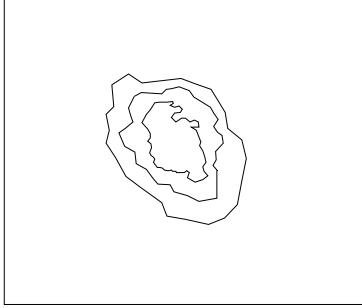


4 m/sn (arka detay görünüşü)

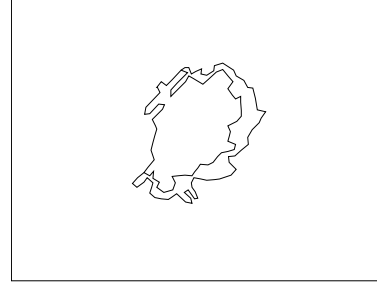


Numune resimleri ve hasar alanlarının Auto CAD programı ile belirlendiği resimler aşağıda verilmiştir.

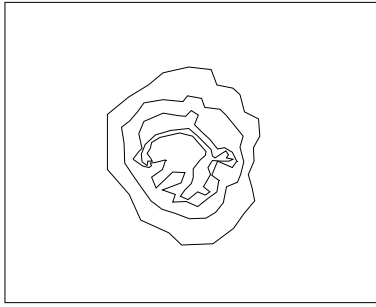
2.5m/sn (ön görünüş)



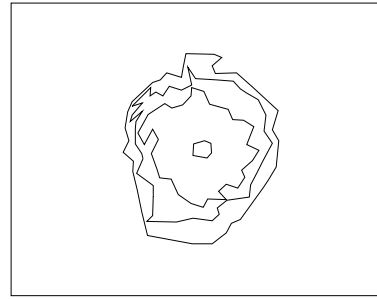
2.5m/sn (arka görünüş)



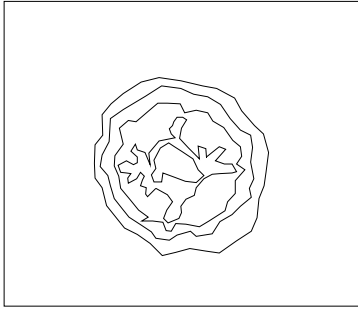
3.0m/sn (ön görünüş)



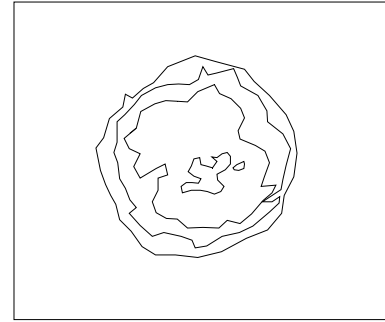
3.0m/sn (arka görünüş)



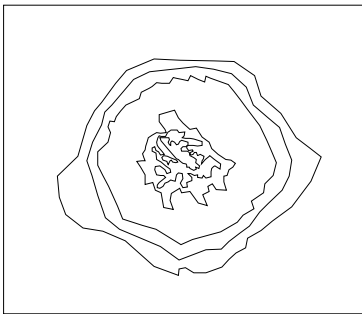
3.5m/sn (ön görünüş)



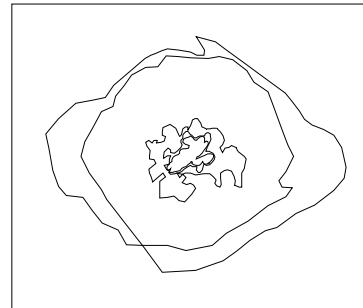
3.5m/sn (arka görünüş)



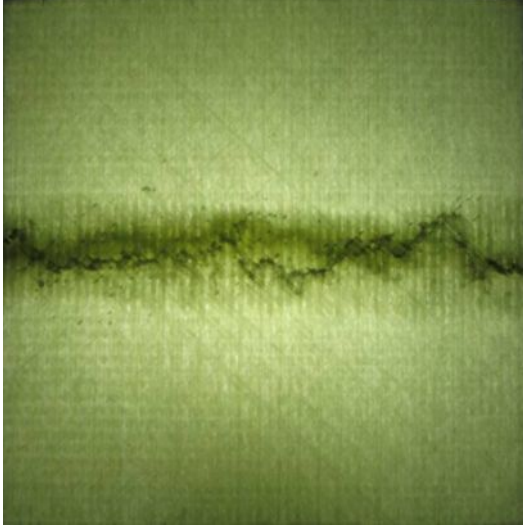
4.0m/sn (ön görünüş)



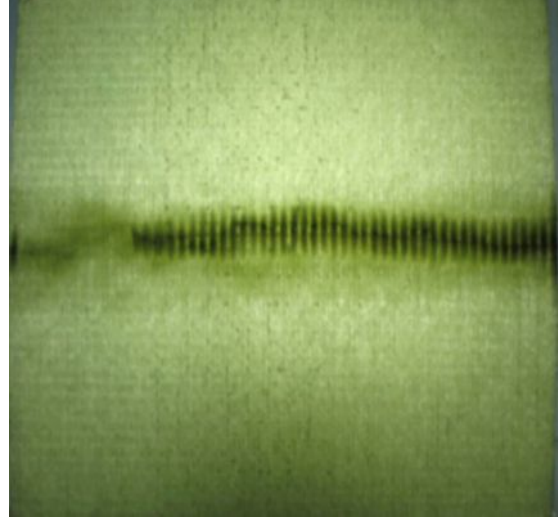
4.0m/sn (arka görünüş)



Burkulmuş numune ön görünüş



Burkulmuş numune arka görünüş



10. SONUÇLAR

- 1- Darbe hızı arttıkça numunede meydana gelen hasar alanı büyümektedir.
- 2- Kuvvet-yer değiştirme diyagramından da anlaşılacağı üzere darbe hızı arttıkça numune üzerine yapılan iş artmaktadır. Bu işin meydana getirdiği deformasyonun elastik olan kısmı ağırlık sistemini geri itmede kullanılırken plastik olan kısmı ise malzemede kalıcı deformasyona neden olmaktadır.
- 3- Hasar öncelikle matris çatlama ile başlamakta, delaminasyon oluşumu ve ilerlemesini takiben elyaf kopması ve nüfuziyet aşamaları ile sonuçlanmaktadır.
- 4- Düşük hızlı darbeye oluşan hasar, hasar alanının Auto CAD programı ile hesaplanması ile belirlendi. “Verilen enerji-oluşan hasar” kıyaslaması yapıldı. Düşük hızlarda delinme meydana gelmedi. Şekil değiştirme enerjisinin bir kısmı matris çatlama diğer kısmı da delaminasyonun başlaması ve ilerlemesinde kullanıldığı gözlemlendi. 3 m/sn hızdan büyük hızlarda delinme meydana geldi. Bu tabakalarda da matris çatlama ve delaminasyonun yanı sıra elyaf kopması ve nüfuziyet gözlemlendi.
- 5- Delinme oluşan numunelerde delaminasyon alanının azaldığı gözlemlendi. Bu da delaminasyon için harcanan plastik şekil değiştirme enerjisinin bir kısmının delinme için kullanıldığını göstermektedir.

- 6- Burkulma deneyi ile düşük hızlı darbeye maruz kalmış numuneler ikinci bir teste tabi tutuldular. Burkulma deney sonuçlarından elde edilen bilgiye göre düşük hızda darbeye maruz numunelerde delaminasyon için gerekli enerjinin bir kısmı delinme tarafından harcanması nedeniyle toplam delaminasyon miktarında bir azalma gözlemlendi. Delinme sonrası delaminasyon miktarının azalması nedeniyle numune dayanımındaki azalmanın daha küçük seviyede olduğu gözlemlendi

- 7- Düşük hızlı darbeye maruz kalmış fakat delinmemiş bir parça aynı şartlardaki delinmiş bir parçadan daha düşük mekanik özellik sergileyebilir. Bunun nedeni olarak ta delinmeyen malzeme üzerinde harcanan hasarlanma enerjisinin büyük bir kısmının delaminasyon için harcandığı bunda malzemenin içyapısını zayıflattığı düşünülmektedir.

11. KAYNAKLAR

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

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

Aslan, Z., (2002) Behavior of laminated Composite Structures Subjected to Low Velocity Impact. Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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.

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

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

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

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

- Lee, L.J., Huang, K.Y., & Fann, Y.J. (1993) Dynamic Responses of Composite Sandwich Plate Impacted By Rigid Ball. *Journal of Composite Materials*, 27, 1238-1256
- Lee, Y.S. , Kang, K.H., & Park, O. (1997). Response of Hybrid Laminated Composite Plates under Low Velocity Impact. *Computers & Structures*, 65, 965-974.
- Lifshitz, J.M. (1976). Impact Strength of Angle Ply Fiber Reinforced Materials. *Journal of Composite Materials*, 10, 92-101.
- Mili, F., & Necip, B. (2001). Impact Behavior of Cross-Ply Laminated Composite Plates under Low Velocities. *Composite Structures*. 51, 237-224
- Mitreviski, T., Marshall, I.H., Thomson, R., Jones, R. Whittingham, B. (2004) The Effect of Impactor Shape on the Impact Response of Composite Laminates. *Composite Structures*, 67, 139-148
- Prasad, C.B., Ambur, D.R., & Starnes, J.H.Jr. (1994). Response of Laminated Composite Plates to Low Speed Impact By Different Impactors. *AIAA Journal*, 32, 1270-1277.
- Ramkumar, R.L., & Chen, P.C. (1982). Low Velocity Impact Response of Laminated Plates. *AIAA Journal*, 21, 1448-1452.
- Rotem, A., & Lifshitz, J.M. (1971). Longitudinal Strength Of Unidirectional Fibrous Composite Under High Rate Of Loading. *Proc. 26th Annual Tech. Conf. Soc. Plastics Industry Reinforced Plastics, Composites Division, Washington, DC, Section 10-G: pp. 1-10.*
- Sankar, B.V. (1992). Scaling Of Low Velocity Impact for Symmetric Composite Laminates. *Journal of Reinforced Plastics Composites*, 11, 297-305.

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

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

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

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

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

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

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

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

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