

T.C
SELÇUK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DAİRESEL KOMPOZİT TABAKALARDA
DÜŞÜK HIZLI DARBE HASARININ İNCELENMESİ

İBRAHİM YÜCE
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
KONYA 2007

**DAİRESEL KOMPOZİT TABAKALARDA
DÜŞÜK HIZLI DARBE HASARININ İNCELENMESİ**

İBRAHİM YÜCE

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Bu tez 15/10/2007 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği/~~oy çokluğu~~ ile kabul edilmiştir.

Öğr. Grv. Dr. Memiş IŞIK
(Danışman)

Prof. Dr. Selçuk HALKACI
(Üye)

Yrd. Doç. Dr. Yusuf YILMAZ
(Üye)

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

DAİRESEL KOMPOZİT TABAKALARDA DÜŞÜK HIZLI DARBE HASARININ İNCELENMESİ

İbrahim YÜCE

Selçuk Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Öğr. Grv. Dr. Memiş IŞIK

2007- 81 Sayfa

Jüri: Prof. Dr. Selçuk HALKACI (Başkan)

Yrd.Doç. Dr. Yusuf YILMAZ

Öğr. Grv. Dr. Memiş IŞIK

Kompozit malzemelerde darbe karşısında verilen cevap, diğer malzeme türlerinininkinden farklı olabilmektedir. Kompozit malzemelerin birden fazla bileşenden meydana gelmiş olması da mekanik cevabın önceden tahmin edilebilmesini zorlaştırmaktadır. Özellikle de tabakalı Kompozit malzemelerde tabakalar arası ayrışma (delaminasyon) olaylarının da görülme ihtimali ile bu malzemelerin dinamik darbe karşısında ne tür davranış sergileyeceğinin belirlenmesi büyük önem kazanmaktadır. Bu çalışmada E-camı/epoksi tabakalı kompozitlerin düşük hızlı darbe altındaki dinamik cevabı deneysel olarak araştırılmıştır. Tek yönlü takviyelendirilmiş tabakalar [+45/-45/90/0]_s şeklinde düzenlenerek 8 tabakalı numuneler elde edilmiştir. Aynı açısal düzenlemenin simetriği de alınarak 16 tabakalı numuneler elde edilerek iki farklı kalınlıkta numune üretilmiştir. Darbe testleri özel olarak geliştirilmiş olan, düşey ağırlık düşürme test cihazı ile yapılmıştır. Darbe testlerinde kullanılan vurucu 24 mm çapında, yarı küresel uçlu bir geometriye sahiptir. Vurucu kütlesi 30 kg'dır. 1,0, 1,5, 2,0, 2,5 ve 3,0 m/s'lik çarpma hızlarında testler yapılmıştır. Çalışmalarda 140x140mm ebatlarındaki iki farklı kalınlıktaki numuneler, çapı 100 mm olan kalıba bağlanarak darbe testine tabi tutulmuşlardır. Deney sonunda yutulan enerji, hasar miktarı, temas kuvvetleri ve şekil değişimleri incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Plastik matrisli kompozitler, düşük hızlı darbe, ağırlık düşürme

ABSTRACT

Master of Science Thesis

**THE INVESTIGATION OF LOW –VELOCITY IMPACT DAMAGE IN
CIRCULAR COMPOSITE LAYERS****İbrahim YÜCE****Selcuk University****Graduate School of Natural and Applied Sciences****Department of Mechanical Engineering****Supervisor: Öğr. Grv. Dr. Memiş IŞIK****2007 - 81 Page****Jury: Prof. Dr. Selçuk HALKACI (Chairman)****Yrd.Doç. Dr. Yusuf YILMAZ****Öğr. Grv. Dr. Memiş IŞIK**

The answering against to reaction in composite materials can be different from the other kinds of materials. The composite materials have a lot of components in their structure which can be complicated to estimate mechanical answering. Especially, the delamination of what kinds of behavior against to dynamic impact in spite of decomposition between the layers in layer composite materials is very important.

In this study, It has been investigated that dynamic answering of the composite of E-glass/epoxy layers under low-velocity impact with experimental. Single direction reinforced layers were put in order like to [+45/-45/90/0]s and 8 layers samples were obtained. Two different thickness samples were produced from 16 layers from symmetric same angular arrangement. The impact tests were conducted with a specially developed vertical drop weight testing machine. The impactor has 24 mm in diameter and its mass is 30 kg, and it has a geometric figure of a semi globe point. The impact speeds that tests were done is 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 and 3.0 m/s. In the studies, the samples that 140x140 mm dimensions and two different thickness had been tied to mould which have 100 mm diameters and were applied the impact tests. End of the experiments, It has been investigated absorbed energy, quantity of damage, power of contact and deformations.

Key words: Plastic matrix composites, low-velocity impact, drop weight

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın tamamlanmasında her türlü desteği sağlayan tez danışmanım Sayın Öğr. Grv. Dr. Memiş IŞIK'a minnet ve şükranlarımı sunarım.

Numunelerin hazırlanmasında bilgilerinden ve tecrübelerinden faydalandığım Prof. Dr. Ahmet Avcı'ya, Prof. Dr. Ahmet Akdemir'e, İzoreel firması çalışanlarına , deney esnasında yardımlarını esirgemeyen Öğr. Grv. Memduh KARA'ya ve Y. Lisans öğrencisi arkadaşlarım Mak. Müh. Mehmet METİN'e ve Mak. Müh. Adem YAR'a yardımlarından dolayı teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	4
3 KOMPOZİT MALZEMELER.....	6
3.1. Kompozit Malzemelerin Genel Özellikleri.....	6
3.2. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması.....	8
3.2.1 Takviye Elemanına Göre Sınıflandırma.....	9
3.2.2 Matriks Malzemesine Göre Sınıflandırma.....	13
3.3 Kompozitlerin Geleneksel Malzemelerle Karşılaştırılması.....	18
3.4 Tabakalı Kompozit Malzemeler.....	19
3.4.1. Metal tabakalı kompozit malzemeler.....	20
3.4.2 Cam Tabakalı Kompozit Malzemeler.....	21
3.4.3 Polimer esaslı tabakalı kompozit malzemeler.....	21
3.4.4 Ahşap tabakalı kompozit malzemeler.....	22
3.4.5 Tabakalı lifli kompozit malzemeler.....	22
4.DARBE MEKANİĞİ.....	24
4.1 Düşük Hızlı Darbenin Mekaniği.....	24
4.2 Katı Cisim Darbesinin Tanımı.....	25
5 TABAKALI KOMPOZİT MALZEMELERİN DARBE DAVRANIŞI.....	27
5.1 Düşük Hızlı Darbenin Belirlenmesi.....	28
5.2 Enine Darbe.....	29
5.3 Darbe Testleri.....	30
5.4 Tabakalı Kompozit Malzemede Darbe Sonucu Oluşan Hasar Modları.....	33
5.4.1 Matriks hasarı.....	34
5.4.2 Delaminasyon.....	34
5.4.3 Fiber kopması.....	36
5.4.4 Nüfuziyet.....	37

<u>6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....</u>	<u>39</u>
<u>6.1 Deney Numunesinin Hazırlanması.....</u>	<u>39</u>
<u>6.2 Yakma Deneyi.....</u>	<u>42</u>
<u>6.3 Deney Cihazının Hazırlanması.....</u>	<u>43</u>
<u>6.3.1 Ağırlık Düşürme Test Cihazı.....</u>	<u>43</u>
<u>6.3.2 Vurucu Durdurma Mekanizması.....</u>	<u>46</u>
<u>6.3.3 Vurucu Geometrisi ve Kuvvet Algılayıcı.....</u>	<u>46</u>
<u>6.3.4 Elektronik Kontrol Ünitesi.....</u>	<u>47</u>
<u>6.4 Deneyin Yapılması.....</u>	<u>49</u>
<u>6.5 Kalibrasyon.....</u>	<u>50</u>
<u>7 DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME.....</u>	<u>52</u>
<u>7.1 Vurucu ile numune arasındaki temas kuvvetleri.....</u>	<u>52</u>
7.1.1.Çarpma Hızının Temas Kuvvetine Etkisi.....	52
7.1.2. Malzeme Kalınlığının Temas Kuvvetine Etkisi.....	57
<u>7.2. Kinetik Analiz Sonucunda Bulunan Değerler.....</u>	<u>59</u>
7.2.1. Hız – Zaman Değişimi.....	59
<u>7.2.2. Yer Değiştirme – Zaman Değişimi.....</u>	<u>63</u>
7.2.3. Kuvvet–Yer Değiştirme Değişimi.....	65
7.3. Düşük Hızlı Darbede Enerji Dağılımı	68
7.4 Hasar Bölgeleri.....	71
7.5 İmpuls Kuvvetleri.....	77
<u>8. SONUÇLAR</u>	<u>78</u>
<u>9. KAYNAKLAR.....</u>	<u>80</u>

1. GİRİŞ

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

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

Kompozit malzemeler, aranan özellikleri sağlayacak yeni malzeme meydana getirmek amacıyla makro boyutta iki veya daha fazla malzemenin özel yöntemlerle birleştirilmesi ile elde edilen yeni malzemelerdir. Birleştirilen malzemeler çıplak gözle veya büyüteçle kolaylıkla görülebilecek büyüklükte bir araya getirilirler ve birbirleri içinde çözünmezler.

Kompozit malzeme genel olarak matriks ve takviye elemanı olarak iki ana bileşenden meydana gelir. Takviye elemanı olarak adlandırılan bileşen; fiber, partikül veya ince levha şeklinde olabilir. Matriks bileşeni ise takviye edilmiş olan ana yapıdır. Bu malzemelerin bir araya getirilmesi, bir takım çalışma karakteristiklerinin bu bileşenler tek olarak değerlendirildiği durumdakinden daha iyi olmasına müsaade eder. Buna karşılık bu malzemelerin mekanik özelliklerini belirlemede bazı güçlükler mevcuttur. Bu durum kompozit malzemelerin metalik malzemelere nazaran daha kompleks bir yapıya sahip olmasından kaynaklanmaktadır.

Kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi, bu malzemelerin kullanılabilirliğinin tespiti açısından önemlidir. Her malzeme gibi kompozit malzemelerin de ısı özellikler, mukavemet, elastikiyet, rijitlik, darbe

davranışı gibi birçok özelliği vardır. Kompozit malzemeyi meydana getiren bileşenlerin bu ve benzeri özellikleri genel olarak belli olmasına rağmen iki veya daha fazla malzemenin beraber kompozit malzeme olarak bir araya gelmesi sonucu oluşan kompozit malzemenin özelliklerini önceden tespit etmek veya hesaplayabilmek oldukça zordur.

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

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

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

Darbe karşısında malzemenin davranışı da malzemedan malzemeye farklılıklar göstermektedir. Örneğin metallerde ve metal alaşımlarda hasar, darbeye maruz kalan yüzeyde meydana gelirken, kompozit malzemelerde ise çarpmanın türüne göre darbeye maruz kalmayan bölgelerde ve iç yapıda da hasar meydana gelebilmektedir. Metallerde darbe cevabı, plastik şekil değiştirme sonucunda bir kopma veya kırılma şeklinde olmasına rağmen, kompozitler çok değişik modlarda hasara uğrayabilirler.

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

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

Bu çalışmada daha önce Selçuk Üniversitesi Kadınhanı Meslek Yüksek Okulu laboratuvarında düşük hızlı darbe çalışmalarında kullanılmak üzere geliştirilen ağırlık düşürme test cihazı kullanılmıştır.

Darbe davranışı ile ilgili özellikleri tespit edilmek üzere İzoreel firması tarafından bu çalışma için özel olarak üretilen E camı /epoksi bileşimiyle üretilen ve [+45/-45/90/0]_s şeklinde açısız elyaf dizilimine sahip 8 tabakalı malzeme ve aynı açısız dizilimin simetrik dizilimi ile oluşturulan 16 tabakalı kompozit malzeme kullanılmıştır.

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

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

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

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

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

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

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

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

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

Belingardi ve Vadori (2003) kompozit malzemelerde plaka kalınlığının düşük hızlı darbe davranışına etkilerini araştırmışlardır. Üç farklı kalınlıktaki deney numunelerine yarı-statik ve dinamik darbe yüklemesi yapılmıştır. Kuvvet-yer değiştirme eğrileri çıkarılarak numunelerin farklı darbe hızlarındaki enerji yutma

kabiliyetlerini araştırmışlardır. Bařka bir çalışmada ise (2001) değişik açısal dizilimlere değişik kalınlıklara sahip cam elyaf- epoksi malzemelerin dairesel kesitli olarak dūřuk hızlı darbeye maruz kaldıktan sonra darbe enerjisi, hasar durumu hakkında değerlendirmeler yapmışlardır.

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

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

Hosseinzadeh ve ark. (2005) fiberle gūlendirilmiř kompozit levhaların dūřen ağırlık darbelerindeki hasar cevabını incelemişlerdir. Dört farklı fiberle gūlendirilmiř tabakalı kompozit plakalara dūřuk hızlı darbeler yapmışlardır. Numunelerdeki hasar bölgelerinin haritalarını çıkararak darbe enerjisi-hasar çapı değişimi elde etmişlerdir. Farklı numunelerdeki değişimleri rapor etmişlerdir. Ayrıca hasar durumunun sonlu elemanlar metoduyla bilgisayar ortamında teorik olarak da çözümleyerek deneysel sonuçlarla kıyaslamıştır.

3 KOMPOZİT MALZEMELER

3.1. Kompozit Malzemelerin Genel Özellikleri

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

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

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

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

- Yüksek dayanım
- Yüksek rijitlik
- Yüksek yorulma dayanımı
- Mükemmel aşınma direnci
- Yüksek sıcaklık kapasitesi
- İyi korozyon direnci
- İyi termal ve ısı iletkenliği
- Düşük ağırlık
- Estetik görünüm

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, çekme dayanımları vb. hesaplanabilir.

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

Bu avantajların yanında kompozit malzemelerin bazı olumsuz yanları da vardır. Bunlar;

- Üretim güçlüğü
- Pahalı olması
- Maliyetinin yüksek olması ve gerekli yüzey kalitesinin elde edilemeyişi
- Diğer malzemeler gibi geri dönüşümünün olmayışı
- Kırılma uzamasının az oluşu

gibi faktörler sayılabilir.

Yeni gelişen bir malzeme, modern kompozit olarak adlandırabilmesi için aşağıda kriterleri taşımalıdır;

- a) En az iki veya daha fazla fiziksel ve mekanik özelliği ayrı olan malzemelerin birleştirilmiş ve farklı ara yüzeye sahip olmaları
- b) Herhangi bir ferdi bileşenle elde edilemeyen mekanik özelliklerin gerçekteştirilmesi
- c) Optimum özellikler elde edebilmek için bir malzemenin diğer malzeme içerisine kontrollü bir şekilde dağıtılmasıyla iki ayrı malzeme karıştırılarak kompozit bir malzeme oluşturulması gerekmektedir.

3.2. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

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

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

Kompozit malzemeleri genel olarak iki ana başlık altında toplamak mümkündür.

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

3.2.1 Takviye Elemanına Göre Sınıflandırma

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

- 1) Elyafli kompozitler
- 2) Parçacıklı kompozitler
- 3) Karma (hibrid) kompozitler
- 4) Tabakalı kompozitler

3.2.1.1 Elyafli kompozitler

Bu kompozit malzeme ince elyafların matriks yapıda yer almasıyla meydana gelmiştir. Elyaf, boyları çaplarına göre çok büyük olan malzemelerdir ve matriks içine yerleşimi kompozit yapının mukavemetini etkileyen önemli bir unsurdur. Uzun elyafların matriks içine birbirine paralel şekilde yerleştirilmeleri ile elyaf doğrultusunda yüksek mukavemet sağlanırken elyaflara dik doğrultuda oldukça düşük mukavemet elde edilir. İki boyutlu yerleştirilmiş elyaf takviyelerle her iki yönde de eşit mukavemet sağlanırken, matriks yapısında homojen dağılmış kısa elyaflarla ise izotrop bir yapı oluşturmak mümkündür.

Elyafın mukavemeti kompozit yapının mukavemeti açısından çok önemlidir. Ayrıca, elyafların uzunluk/çap oranları arttıkça matriks tarafından elyaflara iletilen yük miktarı artmaktadır. Elyaf yapının hatasız olması da mukavemet açısından çok önemlidir.

Kompozit yapının mukavemetinde önemli olan diğer bir unsur da elyaf matriks arasındaki bağın yapısıdır. Matriks yapıda boşluklar söz konusu ise elyaflarla temas azalacaktır. Nem emilimi de elyaf ile matriks arasındaki bağı bozan olumsuz bir özelliktir.

Elyafın cam elyaf, grafit elyaf, bor elyaf, kevlar elyaf, organik elyaf, seramik elyaf gibi çeşitleri mevcuttur. Bunlardan en yaygını ve çok kullanılanı cam, grafit ve organik elyaflardır.

Cam elyaflar: Cam elyaf esasen silis-kum(SiO_2)'den meydana gelmektedir. İçinde belirli oranlarda Na, Ca, Al, B ve Fe gibi elementlerin oksitleri bulunur. Takviye malzemesi olarak en geniş kullanılan ve en ucuz olanıdır. İç yapıları amorf haldedir. Atmosfere karşı dirençleri iyidir. Su absorbe etmezler, fakat çekme mukavemetleri nemli ortamda azalır. Termal genişleme katsayısı birçok plastikten, alüminyum ve çelik alaşımlarından daha düşüktür.

E camı; alkali olmayan boron silikat olup, iyi elektrik yalıtımı sağladığı için, en çok kullanılan cam elyafıdır.

C camı; oldukça iyi korozyon direncine sahip olmakla beraber mekanik özellikleri düşüktür.

D camı; çok düşük dielektrik sabitine sahiptir. Bu nedenle yüksek performanslı elektrik uygulamalarında kullanılır. Mukavemeti diğer camlara göre daha düşüktür.

S camı; yüksek modüle sahip magnezyum ve alüminyum silikat içerir. Yüksek mukavemetlidir. Rijitlik modülü E camına göre %20 daha büyüktür. Kopma enerjisi yüksektir.

Karbon elyaf: Karbon elyaflar, cam elyaflara göre; yüksek çekme dayanımı, yüksek elastiklik modülü, düşük yoğunluk, daha iyi yorulma özellikleri, daha iyi sünme, kırılma direnci ve daha düşük termal genişleme katsayısına sahiptir. Düşük şekil değiştirme/ kırılma oranı nedeniyle kırılma enerjileri oldukça düşüktür.

Kompozit malzemelerde grafit elyaflar, sürekli lifler ve demetler, kırılmış elyaflar, örgü ve dokunmuş elyaflar, öğütülmüş elyaflar olarak kullanılmaktadır.

Boron elyaf: Bor elyaflar, üstün gerilme mukavemetine (3.45 GPa), elastiklik modülüne (416GPa) ve ergime noktasına sahiptir. Erime sıcaklığı 2030 °C gibi yüksek bir değerdir.

Bor elyafın yoğunluğu $2,6\text{gr}/\text{cm}^3$ ile camlara yakındır. Spesifik mukavemetleri camınkinden 5 kat daha fazladır.

Bor elyaf, oda sıcaklığında katı durumda olan hafif metallere biri olup, çok seyrek oluşu, oldukça sert ve kırılabilirliği nedeniyle bor fiberlerin üretimi alışılmış, klasik yöntemlerin dışında yapılır. Bor, hidrojen ile triklorür reaksiyonu ile

elektriksel olarak 1300°C 'ye kadar, ısıtılmış tungsten teli veya karbon üzerinde çökeltilmesiyle elde edilir.

Kompozit üretimi sırasında boron elyafların Al ve Ti gibi metallere hızla reaksiyona girmesi nedeniyle boron üzerine kimyasal buharlaştırma yöntemiyle silisyum karbür (SiC) veya bor karbür (B₄C) kaplanır. Bu sayede yüksek sıcaklıklarda kullanılabilir. Bu da metal matrikslerde kullanımını sağlar.

Organik elyaflar: Takviye elemanı olarak tam dizilmiş polimerler önemli bir yer işgal ederler. Çok iyi aksel özellikler vermesi için çekilerek uzatılmasıyla halkalı zincirli dizilme meydana getirilirken, radyal özellikleri zayıftır. Kevlar bunlara en iyi örnektir. İki tip kevlar mevcuttur. Kevlar 29 ve kevlar 49.

Kevlar 29, esas olarak örme, dokuma veya çaprazlanmış tipiyle kurşun geçirmez yelek, sürtünen malzemelerde de halat ve araba lastiğinde kullanılır.

Kevlar 49 ise yüksek modüle sahip olduğu için takviye elemanı olarak yorulma ve kimyasal etkilere karşı özelliği nedeniyle cam ve karbon elyaflarla beraber kullanılır.

Elyaflar düşük yoğunluklu olduğundan, yüksek spesifik özelliklere sahip olup, uzay sanayinde kullanılmalarını sağlar.

Dezavantajları ise suya olan ilgileridir ki; bunların normal atmosferde % 3 nem veya su olması, onların kimyasal ortamda ve yüksek vakumda kullanılmaları uygun değildir. Korunmadıkça UV ışığa maruz kaldıkları takdirde özellikleri azalır.

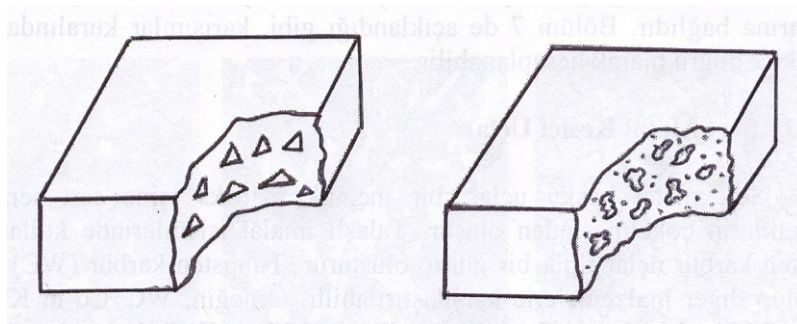
Günümüz plastik matriksli kompozit yapılarında ekonomik oluşu nedeniyle en çok tercih edilen elyaf türü cam elyaflardır. Cam elyafların E-camı , C-camı ve S-camı gibi çeşitleri geliştirilmiştir. E-camı bunlar arasında en ucuzu olmasına rağmen mukavemeti biraz düşüktür. S-camı yüksek mukavemet değerlerine sahiptir fakat pahalı bir elyaf çeşididir.

Tablo 3.1 Çeşitli elyafların mekanik özellikleri

ELYAF TÜRÜ	Yoğunluk g/cm ³	Çekme dayanımı MPa	Elastisite Modülü GPa	Isıl gen. Katsayısı °C ⁻¹ x10 ⁸	Kopma uzaması %	Fiyat 1980 \$
E-camı	2,54	3448	72,2	5	2,75	1
S-camı	2,49	4585	85,5	2,9	-	16
Kuvars	2,2	3100	413,7	2,9	-	-
Bor	2,68	3448	413,7	3	0,7	50
Karbon	1,85	2000-2900	220-520	-1	0,5-1,3	2,5
Kevlar-49	1,44	2708	131	-2	2,5	28

3.2.1.2 Parçacıklı kompozitler

Bir matriks malzeme içinde başka bir malzemenin parçacıklar halinde bulunması ile elde edilir. İzotrop yapılarıdır. Yapının mukavemeti parçacıkların sertliğine bağlıdır. En yaygın tip plastik matriks içinde yer alan metal parçacıklardır. Metal parçacıklar ısıl ve elektriki iletkenlik sağlar. Metal matriks içinde seramik parçacıklar içeren yapıların sertlikleri ve sıcaklık dayanımları yüksektir. Uçak motor parçalarının üretiminde tercih edilmektedirler.

**Şekil 3.1** Parçacık takviyeli kompozit malzeme

3.2.1.3 Karma (hibrid) kompozitler

Aynı Kompozit yapıda iki yada daha fazla elyaf çeşidinin bulunması olaydır. Bu tip kompozitlere hibrid kompozit denir.

Örneğin kevlar ucuz ve tok bir elyaftır. Ancak basma mukavemeti düşüktür. Grafit ise düşük tokluğa sahip, pahalı ancak iyi basma mukavemeti olan bir elyaftır. Bu iki elyafın Kompozit yapıda bir arada bulunması ile elde edilen hibrid kompozitin tokluğu grafit kompozitten daha iyi aynı zamanda maliyeti daha düşük ve basma mukavemeti de kevlar elyaflı kompozitten daha yüksek olmaktadır.

3.2.2 Matriks Malzemesine Göre Sınıflandırma

Yüksek performanslı kompozit malzeme üretimi için matriks malzemesi elyaflar arasına emdirilmeli, matriks malzemesi elyafları ıslatabilmeli, kimyasal veya belli şartlarda yapışma için bağ oluşturmalı, mümkün olan düşük basınç ve sıcaklıkta hızlı şekilde katılma yapabilmelidir. Bağdan ayrı olarak da üretim esnasında veya bundan sonraki işlemler sırasında matriks ve elyaflar arasında diğer etkileşimler olmamalı ve matriks zamanla kararlı kalmalıdır. Üretim sırasında matriksin kimyası nedeniyle elyaflarda herhangi bir fiziksel hasara maruz kalmamalıdır. Kompozitin sıcaklığa, kimyasal etkileşime ve neme karşı direnci öncelikle matriks tarafından belirlenir. Ayrıca takviye elemanı da sıcaklığa karşı kararlı olmalıdır.

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

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

b) Elyafları çevresel etkilerden ve darbelerden korumaktır. Cam elyaf takviyeli kompozitlerde kullanılan çoğu matriksler suya ve korozyona karşı çok

hassastırlar. Bazı matriks malzemeler üretim sırasında elyaflarla reaksiyona girerler. Bu yüzden matriks seçimi kadar elyaf seçimi de önemlidir.

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

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

1. Metal matriksli kompozitler.
2. Plastik matriksli kompozitler
3. Seramik kompozitler

3.2.2.1 Metal matriksli kompozitler (MMK)

Hafif metaller, kompozitler için matriks malzemesi olarak çok cazip olmaktadır. Bunlar plastiklerden daha yüksek elastiklik modülü, dayanım ve tokluğa sahip olup yüksek sıcaklıklardaki özellikleri de daha iyidir. Ancak metal matriksli kompozit üretimi daha zordur. Bunlar her elyafla iyi ara yüzey bağı oluşturamazlar. Metallerle en kolay bağ oluşturan SiC ile kaplanmış boron elyaftır. Fakat bunlar pahalıdır. MMK lerde çok yaygın olarak kullanılan matriks malzemesi; düşük yoğunluklu, iyi tokluk ve mekanik özelliklere sahip olan hafif metaller ve alaşımlarıdır. Bu hafif metal alaşımları, dayanım ve özgül ağırlık oranlarının iyi olması nedeniyle hafif yapı konstrüksiyonlarında tercih edilirler. Atmosfere karşı korozyon dayanımlarının yüksek olması da bir diğer karakteristik özellikleridir. Genellikle Al, Ti, Mg, Ni, Cu ve Zn matriks malzemesi olarak kullanılır. Fakat Al alaşımları, Ti ve Mg yaygın olarak kullanılmaktadır.

3.2.2.2 Plastik matriksli kompozitler

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

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

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

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

Plastikleri iki ana grupta toplayabiliriz. Termoplastikler ve termosetler.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

3.2.2.3 Seramik kompozitler

Seramikler, metal ve metal olmayan elemanlardan meydana gelen inorganik bileşikler olup, doğada kayaların dış etkilere karşı parçalanması sonucu oluşan kaolen kil v.b. gibi maddelerin yüksek sıcaklıkta pişirilmesi ile elde edilen malzemelerdir. Bunlar farklı şekilde silikatlar, alüminatlar ile birlikte metal oksitlerden oluşurlar. Genelde bunlar ya iyonik yada iyonik-kovalent bağ karışımına sahip oldukları için çok kararlıdırlar. Bu nedenle de çok sert gevrek ve yüksek sıcaklığa dayanıklıdırlar. Seramikler gevrek malzeme olduklarından mikro yapısal kusurlar, çentikler ve mikro çatlaklar bu malzemeler üzerinde gerilme yığılmalarına neden olurlar. Bu da seramik malzemenin çekme dayanımını düşürür. Basma dayanımları ise çok yüksektir. Ancak mikroyapısal kusurları azaltacak şekilde çok ince çaplı elyaflar üretilerek daha dayanıklı kompozit üretmek mümkün olmaktadır. Bu malzemelerde kayma direnci çok yüksek olduğundan plastik şekil verme olmaksızın gevrek tarzda kırılırlar.

Bununla birlikte çok sert olmalarından dolayı Al_2O_3 ve SiC gibi malzemeler aşındırıcı malzeme olarak kullanılırlar. Bu seramik malzemelerin yüksek sıcaklıklardaki özellikleri iyidir. Kompozit malzemelerde bu tür malzemeler

kırılganlığı azaltmak için takviye elemanı olarak kullanılırlar. Yaygın olarak kullanılan mühendislik seramiklerine örnek olarak SiC, Si₃N₄ ve Al₂O₃ gösterilebilir. Bu mühendislik seramikleri ile kompozit malzeme üretildiğinde, üretilen bu yeni malzeme yaklaşık olarak 1200°C'ye kadar dayanabilmektedir. Karbon matriks içine gömülen karbon elyaflardan oluşan kompozit malzemeler yaklaşık 3000°C de olağan üstü özellikler sergileyebilmektedirler. Bu da gayet tabidir ki seramiklerin birbirleri ile karşılaştırılmalarına olanak sağlamakta ve seçimleri konusunda uygulamada yardımcı olmaktadır.

3.3 Kompozitlerin Geleneksel Malzemelerle Karşılaştırılması

Kompozit malzemelerin daha yüksek dayanım ve modüle sahip olması makine elemanının ağırlığının azalması demektir. Bu durum bütün hareket eden parçalarda, özellikle taşıma araçlarında çok önemli bir faktördür, çünkü ağırlıkta azalmalar enerji tasarrufuna ve verimliliğin artmasına yol açmaktadır.

Bu kompozitlerin avantajları birim ağırlık modülü, özgül modül/yoğunluk oranı ve birim dayanımı içinde, özgül dayanım/yoğunluk oranı düşünüldüğünde ortaya çıkmaktadır.

Modern kompozit malzemeler evlerden binalara, köprülerden mobilyalara kadar insan yapımı mühendislik uygulamalarında geniş oranda, çok katlı tenis raketlerinden kayaklara, kılıçlara, optik lenslere kadar değişik yerlerde tercih edilmektedir. Özellikle sivil ve askeri uçaklarda son 25 yıldan beri ileri kompozit malzemeler kullanılmaktadır. Bu modern malzemelerde öncelikle cam, boron ve aramid elyaflar, daha sonraları da silisyum karbür ve alüminyum oksit elyaflar kullanılmaya başlanmıştır. Aşağıda değişik takviye elemanları kullanılarak yapılmış olan plastik ve metal esaslı kompozit malzemeler ve bunların bazı uygulama alanları gösterilmiştir.

Metal matriksli kompozitlerin uygulama alanına gelince, bunlar yalnızca uçak ve uzay sanayinde değil, aynı zamanda otomotiv sektöründe de yaygın olarak kullanılmaktadır. Makine tasarımı, spor malzemeleri ve diğer malzemeler yanında rijitlik ve hafiflik ile birlikte iyi yorulma direnci sağladığı için otomobil buji kolları,

alüminyum oksit takviyeli alüminyum kompozitlerden basınçlı döküm tekniği ile yapılmış ve yüksek sıcaklık özelliklerinin çok iyi olduğu tespit edilmiş ve bu nedenle de otomotiv sektöründe yaygın olarak kullanılmaktadır.

Parçacık ilaveleri aynı zamanda matris alaşımının daha iyi titreşim sönümlenme ve iletkenliğe sahip olmalarını sağlamaktadır. Örneğin alüminyum ve bakır alaşımlarının sönüm kapasitesi, alaşıma grafit takviye edildiği zaman önemli derecede gelişmektedir. Kompozitlerin yüksek sıcaklıklardaki titreşim sönümlenme kabiliyeti geleneksel vibrasyon yalıtıcı, dökme demir dahi, alaşımlardan oldukça daha kararlıdır.

3.4 Tabakalı Kompozit Malzemeler

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

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

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.

Bunun yanı sıra tabakalı kompozit malzemeleri;

1. Metal Tabakalı Kompozit Malzemeler
2. Cam Tabakalı Kompozit Malzemeler
3. Polimer Esaslı Tabakalı Kompozit Malzemeler
4. Ahşap Tabakalı Kompozit Malzemeler
5. Tabakalı Lifli Kompozit Malzemeler

olarak da 5 şekilde sınıflandırılabilir.

3.4.1. Metal tabakalı kompozit malzemeler

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

Metal ve metal olmayan katmanlardan oluşan kompozitler de üretilmektedir. Bu malzemeye örnek olarak, genelde her iki yüzeyi de boyalı veya farklı bir yüzey işleminde korunmuş alüminyum levhaların bir polimer malzemeyle birlikte oluşturdukları kompozit elemanlar gösterilebilir. Bunlar, yüzey kaplamada ve cephe boyası olarak da kullanılmaktadır. Ayrıca su yalıtımında kullanılan metal tabakalı bitüm kompozitleri de yine böyle bir yapıya sahiptir.

3.4.2 Cam Tabakalı Kompozit Malzemeler

Tabakalı kompozit malzemeler içinde cam tabakalarla üretilen kompozitler önemli bir gurubu oluşturur. Bilindiği gibi cam saydam olmasının yanı sıra, dış ve iç ortam koşullarına çok iyi dayanım gösteren bir malzemedir. Ancak kırılma riski yüksek olan yerlerdeki uygulamalarda sorun oluşturmada ve çeşitli açılardan tehlike meydana getirebilecek olan bu özelliğın giderilmesi gerekmektedir. Cam tabakalı kompozit malzeme en basit biçimiyle, iki cam tabakası arasına bir PVB (polivinilbütural) tabaka konularak, tabakaların belirli bir sıcaklıkta ve basınç altında yapıştırılmalarıyla elde edilmektedir.

PVB kırılmaksızın çok yüksek oranda şekil değışikliğı gösterebilen esnek bir malzemedir. Üretimin öncesin yarı saydam plastik bir film olan PVB tabakası, uygulama sırasında sıcaklığın etkisiyle saydamlaşmakta ve her iki yanındaki cam tabakalarının yüzeyine yapışmaktadır. Böylelikle, ortada PVB katmanı olan ve bu katmanla birbirine yapışmış, her iki yüzeyi cam olan kompozit malzeme elde edilmektedir.

Yüzeyleri oluşturan cam tabakaların dış atmosfer koşullarına dayanımını ve saydamlık özelliğini koruyan bu kompozit malzemenin, darbe etkisiyle kırılması halinde parçalar dağılmamakta ve dolayısıyla tehlikeli bir durum oluşturmamaktadır. Bu kompozit malzemenin üretiminde cam ve PVB tabakalarının sayıları çoğaltılarak kompozitin dayanımı da arttırılabilmektedir.

Kırılma sırasında camın dağılmaması veya yabancı cisimlerin geçişine karşı dirençli olması nedeniyle kullanılan tabakalı camlar, şeffaflık ve geçirgenlik özellikleri yönlerinden normal camlardan önemli bir fark taşımamaktadır.

3.4.3 Polimer esaslı tabakalı kompozit malzemeler

Çeşitli polimer malzeme katmanlarının bir arada kullanılmasıyla çeşitli kompozit malzemeler üretilmektedir. Cam lifi veya asbest lifi dokumalara silikon emdirilmesiyle yüksek sıcaklığa dayanıklı tabakalı kompozitler de elde edilmektedir. Ayrıca cam ve naylon elyaf dokumalar çeşitli reçinelerle tabakalar halinde

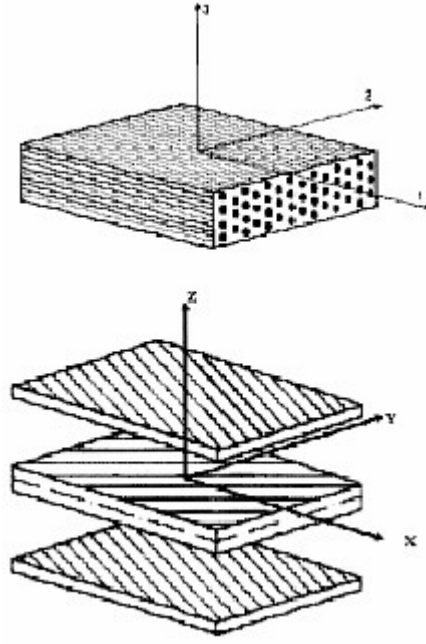
birleştirilerek, çarpmaya, herhangi bir nesnenin batmasına veya benzer etkilere dirençli, çok hafif kompozitler üretilmektedir. Bu malzemeler çeşitli amaçlı zırh kalkan ve benzeri elemanların yapımında da kullanılmaktadır. Plastik esaslı tabakalı kompozit malzemelerin çok değişik türleri mevcuttur ve farklı alanlarda kullanılmaktadır.

3.4.4 Ahşap tabakalı kompozit malzemeler

Ahşap, tabakalı malzeme üretiminde kullanılan en eski malzemelerden biridir. Bilindiği gibi ahşap organik bir malzeme olarak, lifli yapısıyla çeşitli yönlerden gelen mekanik etkilere değişik seviyede direnç göstermekte, genellikle su ve nemden aşırı lde etkilenmektedir. Ayrıca doğal ahşaplardan büyük boyutlu levhalar ve panolar retilenmemektedir. Bu yüzden çeşitli işlemlerle ahşap malzeme, artıklarıyla birlikte değerlendirilebilmekte ve özellikle büyük boyutlu, doğal olarak elde edilmesi mümkün olmayan yapay ahşap levhalar üretilmekte, yapı elemanları yapılabilmektedir. Ayrıca, bu tür ahşap malzemeler çoğu kez özel hammaddeler gerektirmediğinden, maliyetleri de düşük olabilmektedir.

3.4.5 Tabakalı lifli kompozit malzemeler

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



Şekil 3.1 Elyaf takviyeli kompozit malzemede tabakaların farklı açılarda dizilimi

4.DARBE MEKANİĞİ

4.1 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 direnir. Başlangıçta nüfuziyetin artmasıyla kuvvet de artar ve 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 darbeye, 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). (Impact Mechanics,W.J. Stronge, Cambridge University Press, 2000)

4.2 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 yaya benzer. Bu yay büyük bir yay sabitine sahip olup çok küçük bir temas süresine izin verir. Mesela sopa ile hızlı bir şekilde

vurulmuş beyzbol topunda temas süresi 2.0 ms iken, çelik bir çekiç ile vurulan bir çivideki temas süresi 0.2ms'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 sürecinin ortadan kalkacak kadar küçük olacak şekilde olduğu ele alınabilir. Bunun neticesinde hızlardaki değişim ani olarak meydana gelir. Bu teori temas süresince hareketin olmadığını varsayar.

5 TABAKALI KOMPOZİT MALZEMELERİN DARBE DAVRANIŞI

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

Kompozit malzemelerde bir darbe sonucunda oluşan hasar, çarpmanın türüne göre darbeye maruz kalmayan yüzeyde meydana gelebilir, iç yapıda oluşan delaminasyonlar (tabakalar arasında ayrılma) şeklinde başlayabilir. Yukarıda da bahsedildiği gibi metallerde darbe cevabı, plastik şekil değiştirme sonucunda bir kopma şeklinde olmasına rağmen, kompozitler çok değişik modlarda hasara uğrayabilirler ve bu hasar modlarında parçanın yapısal bütünlüğünde ciddi bir değişiklik meydana gelmez. Genellikle gözle görülmeyen veya çok zayıf bir şekilde görülebilen hasarlar meydana gelir. Plastik matriksli kompozit malzemelerin hemen tamamı kırılmandır, bu nedenle enerjiyi sadece elastik deformasyon ve bazı hasar mekanizmaları (matriks kırılması, delaminasyon, fiber kopması v.b) sayesinde absorbe edebilirler, diğer bir deyişle enerjiyi soğurmada plastik deformasyonun katkısı hemen hemen hiç yoktur. Bu anlamda hasar direnç ifadesi, bir kompozit sistemde meydana gelen darbe hasarının miktarını ifade eder.

Tabakalı kompozit malzemedede, eğer kalınlık boyunca bir takviye söz konusu değil ise, en büyük darbe hasarı enine doğrultuda oluşacaktır. Bunun en önemli nedenlerinden birisi, enine doğrultudaki malzeme elastik özelliğinin düşük olmasıdır.

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

5.1 Düşük Hızlı Darbenin Belirlenmesi

Genel olarak, darbeler düşük hızlı veya yüksek hızlı olarak sınıflandırılırlar, fakat bu kategoriler arasında açık bir geçiş yoktur. Yapılan araştırmalar bu geçişin belirlenmesinde henüz net bir sonucun elde edilemediğini göstermektedir. Bu konuda yapılmış çalışmalardan bir kısmı düşük hızlı darbeyi, ki bunlar statikmiş gibi düşünülebilir, hedefin rijitliğine, malzeme özelliklerine ve çarpan cismin kütle ve rijitliğine bağlı olarak 1 ila 10 m/s arasında değişen hızlar olarak değerlendirilmesi gerektiğini savunmaktadır [1,2]. Düşük hızlı darbeye en basit örnek olarak kompozit malzeme üzerine imalat veya bakım esnasında kaza sonucu bir parçanın düşmesi verilebilir.

Düşük hızlı darbeler normal olarak çarpışma temas anında malzeme iç yapısında deformasyon oluşturan darbelerdir. Bazen düşük hızlı darbe, düşük enerjili darbe olarak da kullanılır. Düşük hızlı darbede, malzemenin iç yapısında darbeye karşı cevap verebilmek için gerekli olan temas süresi yeterlidir ve sonuç olarak daha fazla enerji elastik olarak soğurulur. Bu nedenle hedefin dinamik yapısal cevabı çok büyük bir öneme sahiptir. Yüksek hızlı darbe cevabı malzeme boyunca yayılan gerilme dalgası tarafından hakim olunur ki bu durumda malzeme darbeye karşı cevap verebilme zamanına sahip olamaz ve çok küçük bir bölgede hasar oluşur.

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

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

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

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

5.2 Enine Darbe

Kompozit malzemelerin en hassas oldukları yükleme durumu düzlem dışına doğru (tabaka veya fibere dik yükleme) olandır. Çünkü; malzeme kalınlık doğrultusunda tabaka düzleminde olduğundan daha zayıftırlar. Sonuç olarak, enine darbeye maruz kalan kompozit malzemeler, toplam yük taşıma kapasitelerinde önemli düşümlere sebep olan hasarlara uğrarlar. Kompozit malzemelerin bu darbe yüklerine karşı göstermiş oldukları cevap çok komplekstir. Bu, kompozit malzemeyi meydana getiren her bir bileşenin kendi özellikleri kadar yapısal konfigürasyona da bağlıdır. Ayrıca, darbeye verilen cevap çarpan cismin geometrisine, hızına ve kütlesine de bağlıdır. Her biri enine darbenin toplam etkisini karakterize etmede önemli bir rol oynar.

Darbe yüklemesi altında çarpan cismin gözle görülemeyen veya zayıf şekilde seçilebilen nüfuziyetine kadar değişebilen farklı şekillerde hasar modları mevcuttur. Düşük hızlı darbeler tabakalar üzerinde gözle görülen hasarlar oluşturmayabilirler. Fakat tabaka içerisinde, matriks kırılması, delaminasyon ve/veya fiber kırılması

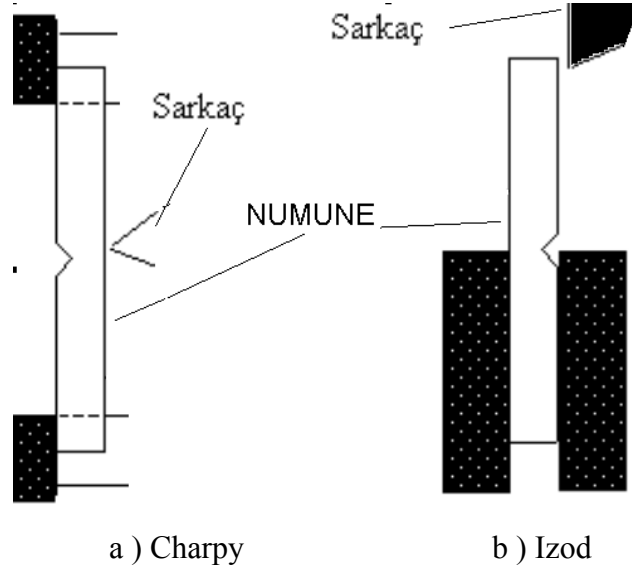
şeklinde hasarlara sebep olabilirler. Bu, mukavemette önemli derecede bir düşüşe sebep olur. Rijitlikte azalma da mümkündür. Yüksek hızlı çarpmada malzeme üzerinde oluşan hasar, çarpışma temas bölgesindeki küçük bir bölgede yoğunlaşır.

5.3 Darbe Testleri

Tabakalı kompozit malzemelerin darbe direncinin, bir cismin kompozit malzemenin enine doğrultusundaki darbesini simule eden testlerle karakterize edilebileceği açıktır. Birçok test tekniği darbe üretmek için kullanılırlar. Bununla birlikte kompozit malzemelerin darbe davranışını karakterize etmek için standart bir test tekniği veya farklı ülkeler, kuruluşlar ve araştırmacılar arasında yaygın bir şekilde kabul edilen herhangi bir teknik mevcut değildir. Bu durum, farklı kaynaklardan sonuçların karşılaştırılacağı zaman, kompozit malzemelerin darbe cevabı için uygun bir model geliştirme girişimleri için problem oluşturmaktadır. Bu olumsuzluklara rağmen kompozit malzemelerin darbe dirençlerinin belirlenmesi amacıyla günümüzde aşağıdaki test yöntem ve cihazları yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunlar genellikle üç kategoride sınıflandırılabilirler;

1. Sarkaç testleri (Izod ve Charpy),
2. Hava veya gaz silah testleri (düşük hız veya balistik testler).
3. Ağırlık düşürme testleri,

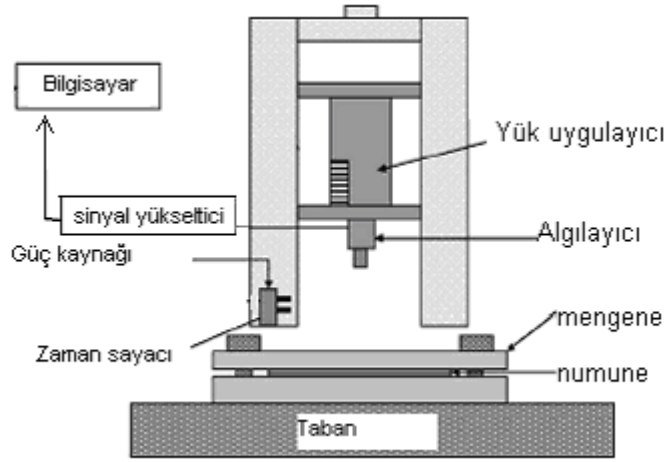
Bu testlerden Izod ve Charpy test düzenek şemaları Şekil 5.1'de görüldüğü gibidir. Charpy ve Izod darbe test yöntemlerinde çentik açılmış bir test numunesi, standart bir yükseklikten bırakılan bir sarkaç ile darbeye maruz bırakılır. Darbeden sonra sarkacın çıktığı yükseklik tespit edilerek sarkacın ilk ve son konumdaki enerji farkı numune tarafından soğurulan darbe enerjisi olarak ölçülür. Darbeden sonraki sarkacın yüksekliği ne kadar az ise, soğurulan darbe enerjisi, dolayısıyla malzemenin darbe direnci veya tokluğu da o derece yüksektir. Charpy ve Izod test yöntemleri ufak farklılıklar dışında birbirine çok benzerler. Bu farklılıklardan en önemli olanı, numunenin desteklenme şekli ile çentiğin destek ve darbe noktalarına göre konumudur (Şekil 5.1).



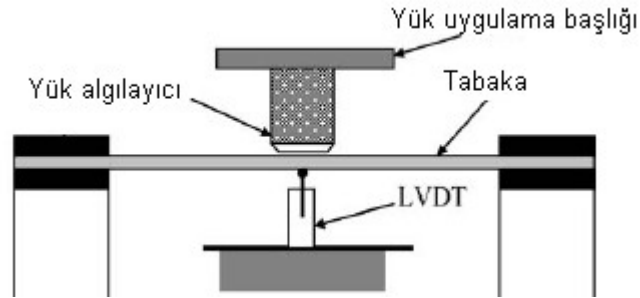
Şekil 5.1 Charpy ve Izod Darbe Test Düzenekleri

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

Bu cihazların bazıları yer değiştirmeyi veya ivmelenmeyi ölçmektedirler. Bu sayede yük, yer değiştirme ve ivmelenmenin çarpma anındaki değişimi kaydedilir. Bu sonuçlar, darbe yükü-zaman ve darbe enerjisi-zaman değişimlerine dönüştürülebilir. Bunlar sayesinde, en uç noktadaki yük ve soğurulan enerji gibi özellikler malzemede meydana gelen kırılma işlemiyle ilişkilendirilebilirler. Tipik bir ağırlık düşürme test cihazı Şekil 5.2'de görüldüğü gibidir. Böyle bir cihazı meydana getiren ekipmanlar: platformları destekleyen numuneye veya tüp içerisine yerleştirilen yük ölçme cihazları (yük hücresi), çarpışmadan hemen önceki tüp hızını ölçmeye yarayan fotoelektrik hücreler ve darbe olayını görüntülemek için kullanılan yüksek hız kamerasıdır. Balistik testler için yüksek hızlar gerektiğinden, kompozit malzemeye bu hızla bir cismi çarptırmak için tabanca veya silah sistemlerinden faydalanılır. Bu testlere ilişkin basit bir deney düzeneği Şekil 5.4'de görülmektedir.



Şekil 5.2 Ağrlık Düşürme Test Düzenęi



Şekil 5.3 Ağrlık Düşürme Test Düzenęinde ağrlığın numuneye temas ettiği kısmın ayrıntılı görünümü

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

5.4 Tabakalı Kompozit Malzemede Darbe Sonucu Oluşan Hasar Modları

Fiber takviyeli plastik tabakalar, anizotropik ve heterojen yapılarından dolayı dört değişik önemli hasar modunun ortaya çıkmasına müsaittirler (bunların dışında daha birçok hasar modundan bahsetmek mümkündür). Bu modların tabakalı bir kompozit üzerindeki modeli Şekil-4’de görüldüğü gibidir.

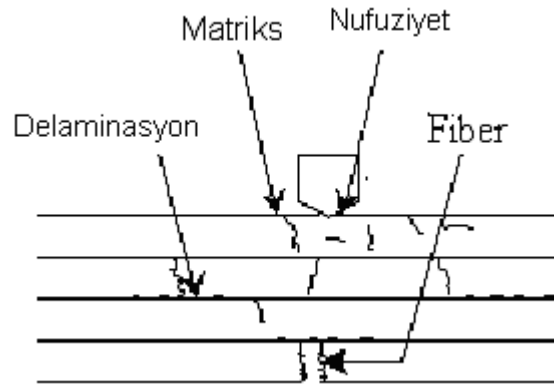
i. Matriks modu : kırılma fiberlere paralel meydana gelir. Bunun nedeni bası gerilmesi ve kesme gerilmeleridir.

ii. Delaminasyon modu : tabakalar arası eğilme cevabı uyumsuzluğundan ortaya çıkar.

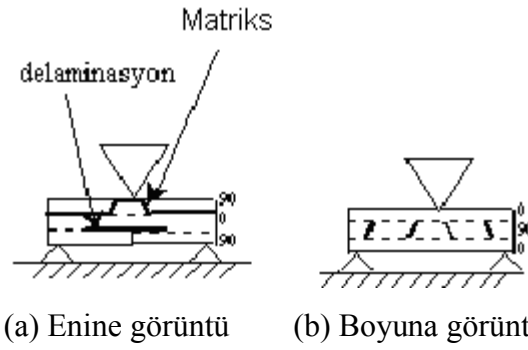
iii. Fiber modu : gerilme altındaki fiber kopar, sıkıştırma altındaki fiber eğilir.

iv. Nüfuziyet : çarpan cisim kompozit malzemeye tamamıyla nüfuz eder.

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



Şekil 5.4 Darbe Sonucu Kompozit Malzemede Oluşan Hasar Çeşitleri



Şekil 5.5 Matriks kırılması ve delaminasyon hasarı oluşumu [7]

5.4.1 Matriks hasarı

Literatürde rapor edilen darbe testlerinin çoğunluğu, düşük enerjili testleri içerir. Bu enerji seviyesi yaklaşık olarak 1-5 J arasında değişmektedir. Matriks hasarı, düşük hızlı enine darbenin oluşturduğu hasarın ilk tipidir ve genellikle matriks kırılması şeklinde meydana gelir. Matriks hasarı ayrıca fiber ve matriks ara yüzeyi arasındaki bağın kopması şeklinde de oluşur. Matriks kırılmaları, tek yönlü fiberlerden oluşmuş tabakalarda genellikle fiber doğrultusuna paralel düzlemlerde oluşur. Tipik bir matriks kırılması ve delaminasyon modeli Şekil 4.2'deki gibi açıklanabilir.

Üst ve orta katmanlardaki matriks kırılmaları, çarpan cismin kenarının altında başlar (Şekil 4.2-b). Bu kesme gerilmeleri, malzeme boyunca oluşan çok yüksek enine kesme gerilmeleri tarafından oluşurlar, ve genellikle 45° eğime sahiptirler. Enine kesme gerilmeleri, temas kuvveti ve temas alanıyla ilişkilendirilirler. Alt katmanlardaki kırılmalar, eğilme kırılması olarak isimlendirilirler. Çünkü bunlar yüksek eğilme gerilmeleri sonucunda oluşurlar ve karakteristik olarak dikeydirler. Eğilme gerilmesi, tabakaların eğilme deformasyonu ile ilişkilidir.

5.4.2 Delaminasyon

Delaminasyon, aynı katman grubundaki tabakalar arasında değil, farklı elyaf oryantasyonlarına sahip tabakalar arasında matriks bakımından zengin bölgede

meydana gelen bir kırılmadır. Tabakalı kompozit malzemelerde katmanlar arasındaki farklı fiber yönlendirmelerinden dolayı bu katmanların eğilme rijitlikleri farklılık gösterir. Delaminasyonun en önemli sebebi; tabakalar arasındaki bu eğilme rijitlik farklılığı ve eğilme kaynaklı gerilmelerdir. Bu konudaki deneyler ve analizler, eğilmenin enine doğrultuda dış bükey olduğu ve fiber doğrultusu boyunca tabakanın konkav eğilmeye eğilimli olduğunu göstermektedir. Tabakalar arası eğilme rijitliğindeki uyumsuzluk ne kadar büyük olursa, (ki 0/90° en kötü fiber doğrultusudur), delaminasyon alanı da o kadar büyük olur. Bunun yanı sıra delaminasyonu malzeme özellikleri, yığılma düzeni ve tabaka kalınlığı gibi diğer bazı faktörler de etkilemektedir.

Delaminasyon hasarının olduğu noktada soğurulan elastik şekil değiştirme enerjisi, (E_k), için basit bir ifade aşağıdaki gibidir.

$$(E_k) = \frac{2\tau^2 wL^3}{9E_f t} \quad (4.1)$$

Burada;

t: Kalınlık,

τ : Tabakalar arası kesme mukavemeti,

w: Genişlik, L: Desteklenmemiş uzunluk

E_f : Eğilme modülüdür.

Enine darbeden dolayı oluşan delaminasyon, belirli bir eşik (geçiş) enerji değerine ulaşıldıktan sonra ve sadece matriks kırılması mevcut ise meydana gelir.

Matriks kırılması delaminasyonun başlaması açısından gerekli bir faktördür. Matriks kırılması ve delaminasyon arasında sıkı sıkıya bir ilişki mevcuttur. Delaminasyonlar, tabakalar arası ara yüzey bölgesinde meydana gelirler. Fakat, bu bölge her zaman tam olarak ara yüzey bölgesi olmamakla beraber ayrıca her iki tarafta da bir miktar olabilir. Enine darbeye maruz 0/90/0 tabakaları için delaminasyon ve matriks kırılması etkileşmesi göz önüne alındığında; üst katmanlardaki eğimlenmiş kırıklar ara yüzeye ulaştığı zaman durdurulur ve katmanlar arasında delaminasyon olarak ilerler (Şekil 4.2-a). Oluşan kırıkların ara yüzeye ulaşınca durdurulması, fiber oryantasyonundaki değişimden dolayıdır. Bu delaminasyon, ortadaki enine kırılma tarafından zorlanır (şekil 1b). Düşey eğilme

kırığı büyümesi, zorlanmayan en alt ara yüzey delaminasyonunu başlatır. Delaminasyona önderlik eden matriks kırılmaları, kritik matriks kırılmalarıdır. Delaminasyon, matriks kırılmalarından dolayı meydana gelen yüksek mertebedeki düzlem dışı gerilmeler ve ara yüzey boyunca tabakalar arasındaki kesme gerilmelerinden dolayı Mod I kırılma olarak başlamaktadır. Hem eğilme kırılmaları hem de kesme kırılmaları delaminasyonu başlatabilir. Fakat kesme gerilmeleri nedeniyle oluşan delaminasyon, kararsız ve eğilme kırılması tarafından oluşan delaminasyon ise, kararlıdır ve uygulanan yük ile orantılıdır.

Kırılma mekaniği analizlerinde bir başlangıç çatlak ve kırılma boyutu tahmin etmek gerektiğinden, delaminasyonun başlaması ve büyümesine ilişkin bu analizleri uygulamak zordur. Bu amaçla, izotrop olarak kabul edilebilecek tabakalar için bir başlangıç çatlak boyutu tahmin etmeye gerek kalmadan eşik kuvvetinin bulunabileceği basit bir eşitlik aşağıdaki gibidir.

$$P_c^2 = \frac{8\pi^2 E h^3 G_{IIC}}{9(1 - \nu^2)} \quad (4.2)$$

Burada;

P_c = eşik (geçiş) yükü

G_{IIC} = kritik şekil değiştirme enerjisi azalma hızı,

ν = Poisson oranı,

h = tabaka kalınlığı

E = elastisite modülü.

5.4.3 Fiber kopması

Hasar modlarından bir diğeri olan fiber kopması, genellikle matriks kırılması ve delaminasyondan çok daha sonra meydana gelir. Fiber kopmasına neden olan en önemli iki faktör:

1. Yüksek lokal gerilmeler ve nüfuziyetin oluşturduğu 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.

Fiberlerin yorulması nüfuziyetin başlamasında en önemli etkiyi gösterir. Çarpma olayının olmadığı, fakat yüksek eğme gerilmelerinin olduğu arka yüzdeki fiberlerin yorulması için gerekli olan enerjiyi ifade eden eşitlik aşağıdaki şekildedir;

$$\text{Enerji} = \frac{\sigma^2 w t L}{18 E_f} \quad (4.3)$$

Burada;

σ = Eğme gerilmesi,

E_f = Elastisite modülü, w = Genişlik,

L = Desteklenmeyen uzunluk,

t = Numunenin kalınlığı.

5.4.4 Nüfuziyet

Nüfuziyet, hasarın makroskobik bir modudur ve çarpan cismin malzemeye tamamıyla nüfuz etmesine müsaade eden, fiberin kritik bir uzamaya ulaştığı zaman meydana gelir. Nüfuziyetin meydana geldiği darbeler esas olarak balistik ve üzeri hız düzeylerindeki darbeleri oluşturmaktadır. Delme için gerekli olan darbe enerjisi eşiği karbon-fiber takviyeli plastik kompozit malzemeler (CFRP) için kalınlığın artmasıyla hızlı bir şekilde artmaktadır. Balistik hızda meydana gelen darbe olayında kompozit malzemedeki nüfuziyetin olduğu bölgeden (genellikle çarpan cismin büyüklüğünde bir bölgedir) bir parça kesilip dışarı çıkar. Malzemedeki bu parçanın kopup dışarı çıkartılmasıyla soğurulan enerji, toplam olarak soğurulan enerjinin büyük bir kısmını oluşturur (tabaka kalınlığına bağlı olarak %50-60).

Balistik darbede fiber iyileştirmesi, delip geçmek için gerekli olan enerjiyi karşılamada matriks malzemesinden çok daha büyük bir öneme sahiptir. Tek yönlü

katmanlardan oluşan tabakalı bir kompozit malzemeyi delmek için gerekli olan soğurulan enerji aşağıdaki eşitlik yardımıyla bulunabilir.

$$\text{Enerji} = \pi \gamma t d \quad (4.4)$$

Burada,

γ = Kırılma enerjisi,

t = Tabaka kalınlığı,

d = Çarpın cismin çapı

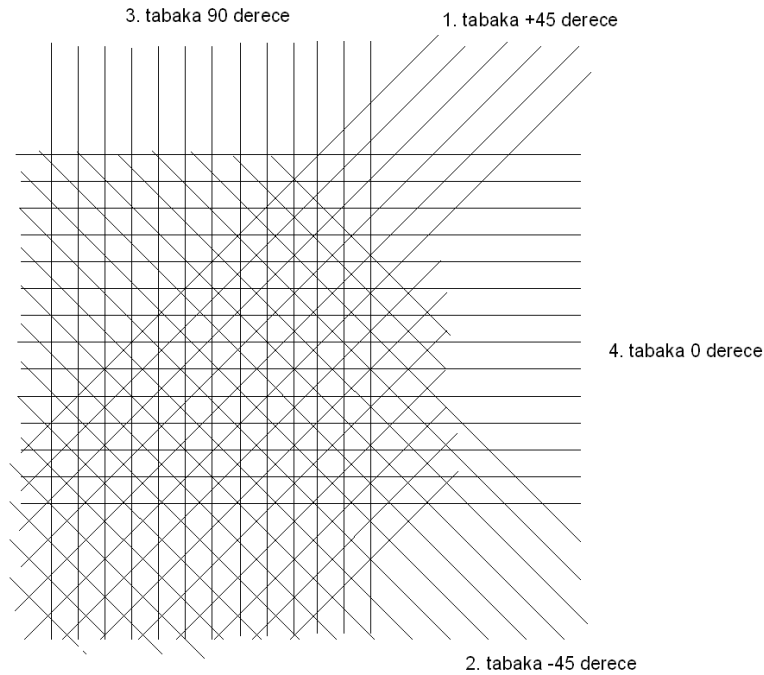
Fiberlerin tek yönlü olduğu katmanlarda matriks kırılmalarını tahmin etmek oldukça kolaydır. Fiberler gelişmiş güzel düzenlendikleri zaman, kırılma modellerini oluşturmak çok daha zordur.

6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

6.1 Deney Numunesinin Hazırlanması

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

Bu çalışmada kullanılan deney numuneleri ise 140×140 mm ebatlarında $[+45/-45/90/0]_s$ şeklinde dizilime sahip 8 ve 16 tabakalı numunelerdir. Numune kalınlıkları ise 8 ve 16 tabakalı numuneler için sırasıyla 1,6 ve 2,9 mm dir.



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

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

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

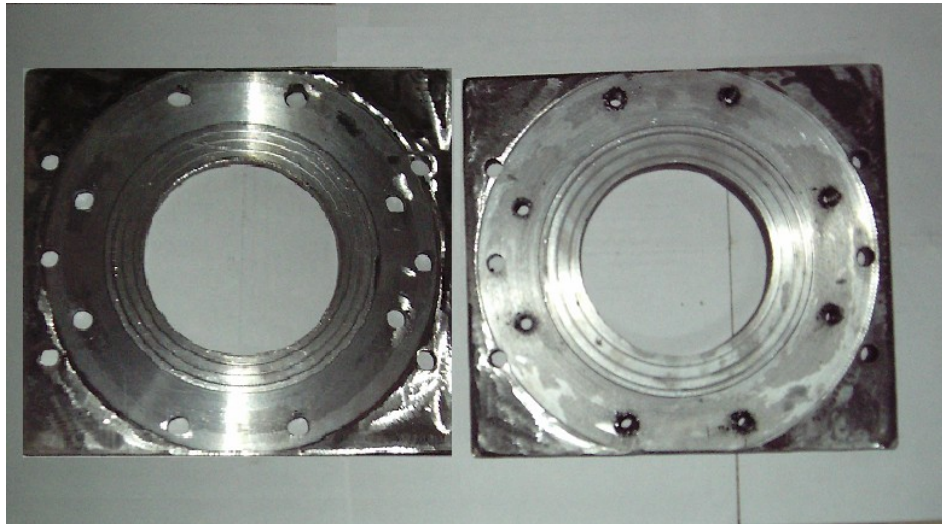
Çizelge 6.1 Epoksi/Cam kumaş bazlı levhaların kalite sınıflarının belirgin özellikleri

Özellikler	Test Metodu	Birim	Hgw 2372 Grade G10 Ep GC 201	Hgw 2372.1 Grade FR- 4 Ep GC 202	Hgw 2372.4 Grade G11 Ep GC 203
Mekanik Özellikler					
Çekme Mukavemeti	ISO 527	MPa	320	280	320
E Modülü	ISO 178	GPa	20	20	20
Eğilme Mukavemeti	ISO 178	MPa	400	350	450
Bası Mukavemeti	ISO 609	MPa	500	500	550
Fiziksel Özellikler					
Özgül ağırlık	ISO 1183-A	g/cm ³	1,8 - 2,0	1,8 – 2,0	1,8 – 2,0
Su emme	ISO 62/1	Mg	15	10	15
Sıcaklık dayanımı	IEC 216	T.I	150	180	180
Alevlenebilirlik	UL 94	-	-	FVO	-
Elektriksel Özellikler					
Elektriksel mukavemet (90°C yağda)	IEC 243-1	KV/m m	18	13	18
Dağılma faktörü, 50Hz	IEC 250		0,008	0,005	0,008
Geçirgenlik, 50Hz	IEC 250		5,0	4,5	5,0

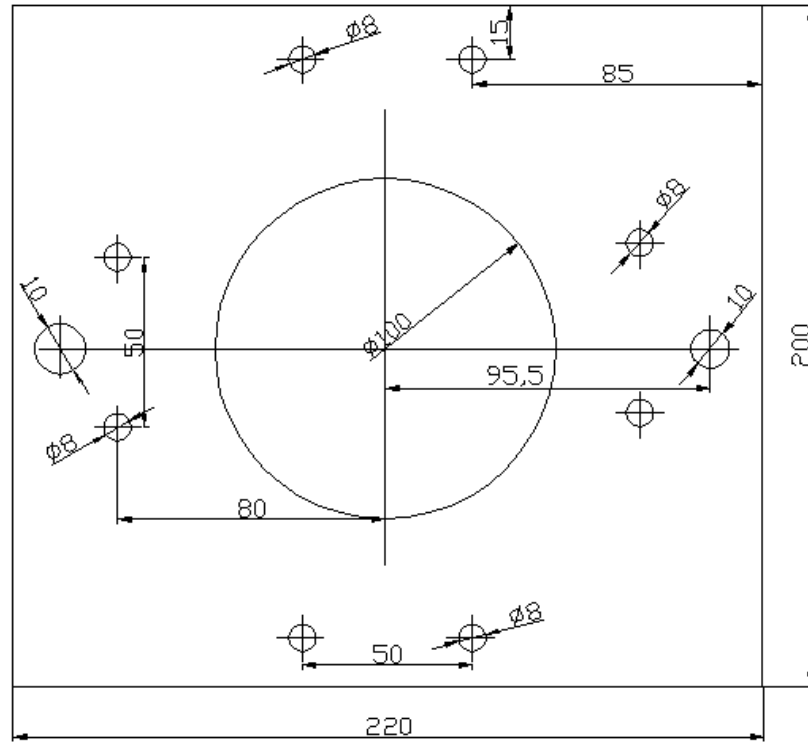
Bu çalışmada cam elyaf takviyeli epoksi levha olarak Hgw 2372 seçilmiştir.

Daha sonra yapısı ve çalışması açıklanacak olan cihaz üzerindeki vurucu 30 kg lık bir kütleye sahiptir. Tabaka sayısının belirlenmesinde bu kütle göz önünde tutulmuştur. Numunenin ebatları cihaz üzerindeki bağlama aparatına uygun olarak belirlenmiştir. Deney numunesi dairesel bir kalıp üzerinde cihaza bağlanmıştır. Numunenin 20 mm' lik kısmı kalıp içerisinde kalmakta, böylece 100 mm çapında bulunan kalıp aralığı içerisine darbe uygulanmıştır.

Numuneyi bağlamak için alt kalıp 15 mm, üst kalıp ise 10mm kalınlığındaki platinadan 200x220 mm ebatlarında üretilmiştir. Kalıpların orta kısmı kesilerek çıkarılmıştır. Kalıp iç yüzeylerinin numuneye temas edecek olan kısımları numuneye daha iyi temas etmesi için torna tezgahında işlenerek pürüzlülüğü artırılmış ve dairesel dişler oluşturulmuştur. Alt ve üst kalıba karşılıklı gelecek şekilde numuneyi tutmak için 8 adet 8 mm çapında, kalıbı cihaza bağlamak için de 2 adet 10 mm çapında delik açılmıştır. Numuneyi sıkıştıracak olan deliklerin alt kalıp kısımlarına M8 diş açılmıştır. Üst kalıp delikleri ise civataların kolay geçmesi için 9mm çapa genişletilmiştir.



Şekil 6.2 numunenin bağlanması için üretilen kalıbın alt ve üst parçası.



Şekil 6.3 Kalıbın teknik resimi.

6.2 Yakma Deneyi

Matriks malzemesi ile takviye malzemesi hacimsel oranları elde etmek için yakma deneyleri yapıldı. Bu oranlar, malzemenin tanımlanması ve teorik hesapların yapımında kullanılmaktadır.

16 ve 8 tabakalı numunelerden parçalar kesildi. Kesilen bu 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

$$V_f = \frac{W_f / \rho_f}{W_c / \rho_c} \quad (6.1)$$

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

6.3 Deney Cihazının Hazırlanması

6.3.1 Ağırlık Düşürme Test Cihazı

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

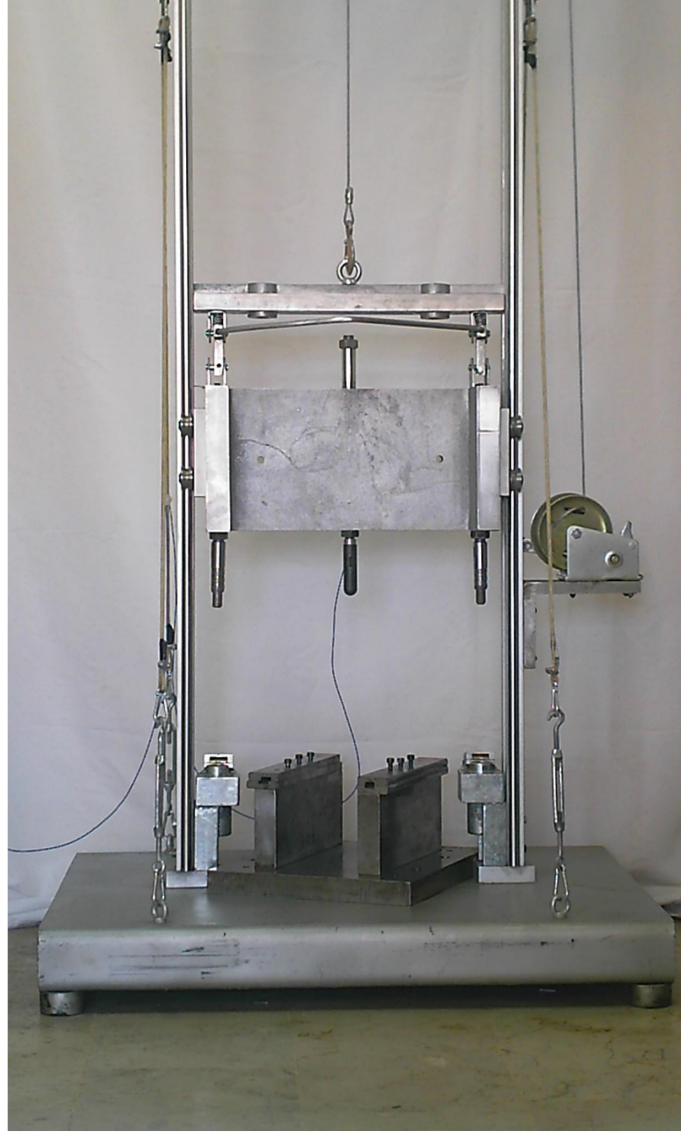
Cihaz 3.0 m yüksekliğindedir. Vurucu 30 kg kütleli olup 2.5 m den serbestçe düşebilmektedir. Ağırlığın istenilen mesafeden bırakılabilmesi için kilit mekanizması vardır. Böylece değişik darbe hızlarında deney yapılabilmektedir. Serbest düşme ile öngörülen en büyük teorik hız 7.0 m/s dir.

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

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

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

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



Şekil 6.4 Ağırlık düşürme test cihazı



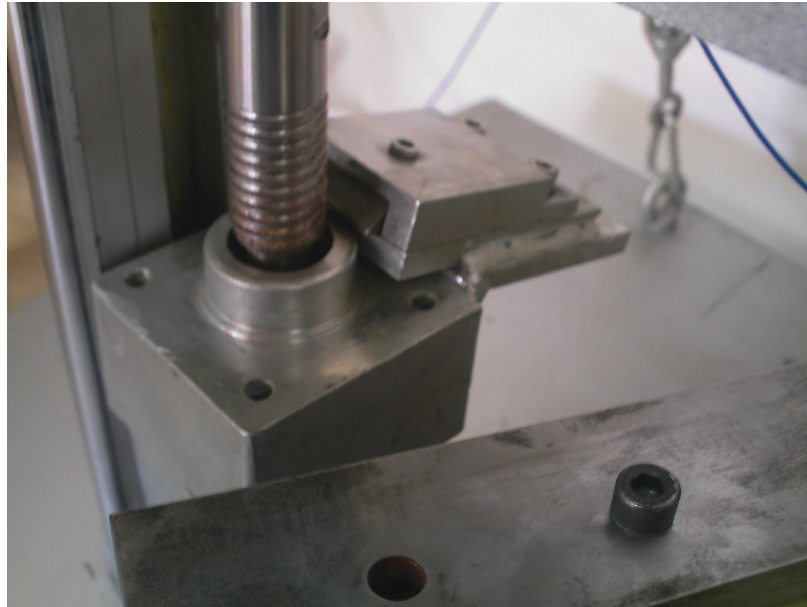
Şekil 6.5 TecnoLine lineer-yatak sistemi



Şekil 6.6 Vurucu

6.3.2 Vurucu Durdurma Mekanizması

Kuvvet uygulandıktan hemen sonra olası bir delinme veya vurucunun aşırı miktarda aşağıya doğru hareket etmesi durumunda vurucunun zarar görmesini engellemek için vurucuyu durduran mekanik kilit sistemi bulunmaktadır. Şekil 6.5'te vurucu durdurma mekanizması görülmektedir. Vurucu kütesinin her iki kenarına da kilit mekanizması yerleştirilmiştir. Vurucu numune üzerine ilk darbeyi yaptıktan sonra eğer çok fazla miktarda aşağıya inerse mekanik kilit sistemi vurucu kütesinin hareketini durdurmaktadır. Böylece vurucunun tabana çarparak zarar görmesi engellenmektedir.

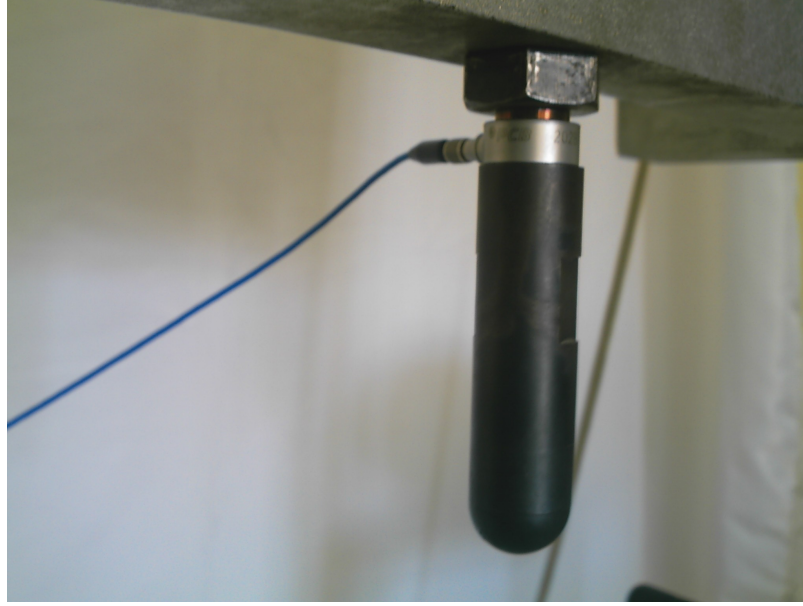


Şekil 6.7 Vurucu durdurma mekanizması

6.3.3 Vurucu Geometrisi ve Kuvvet Algılayıcı

Şekil 6.6'da vurucu ile kuvvet algılayıcı bağlantısı görülmektedir. Deneyde kullanılan vurucu 24 mm çapında, yarı küresel uçlu bir geometriye sahiptir. Deneyde kullanılan kuvvet algılayıcı PCB Quartz ICP Force Sensor (M202B04) modelidir. 22 kN ölçme kapasitesi vardır. Vurucu kütesi ile vurucu arasına monte

edilmiştir. Kuvvet algılayıcıya bağlı teflon kablo yardımı ile sinyal elektronik kontrol ünitesine iletilmektedir.



Şekil 6.8 Vurucu-Kuvvet algılayıcı bağlantısı

6.3.4 Elektronik Kontrol Ünitesi

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

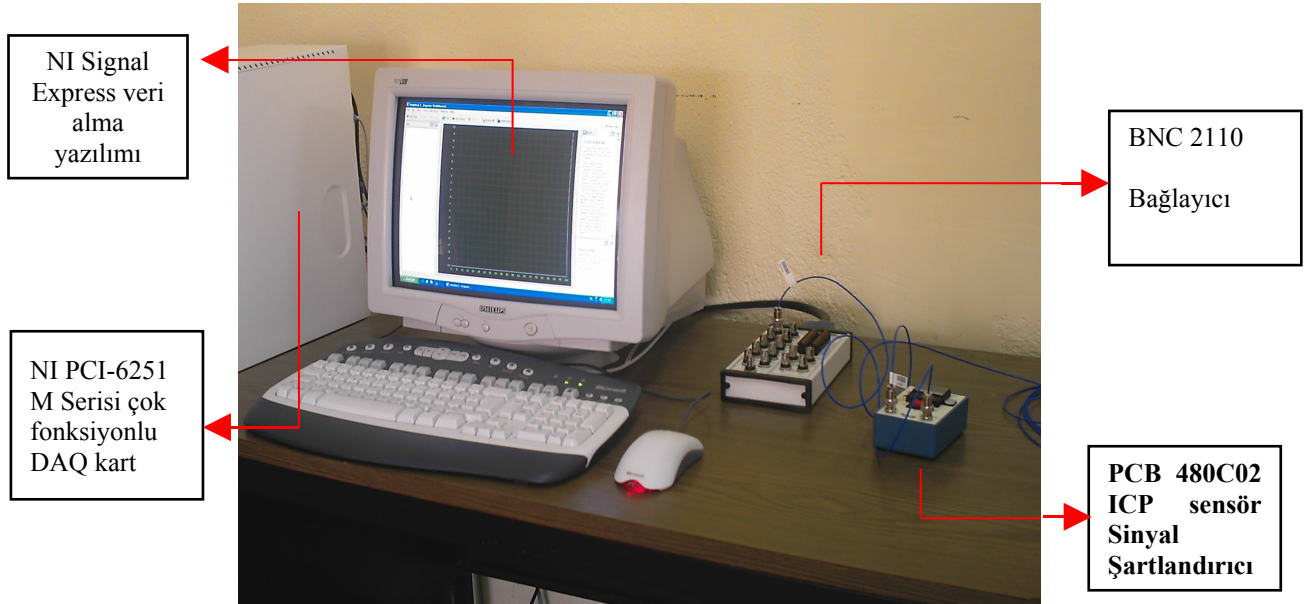
Sinyal şartlandırıcı' da yükseltilecek sinyali DAQ karta iletebilmesi için BNC bağlayıcı blok kullanılmıştır. Sinyalin doğrudan DAQ karta verilmesi risk taşımaktadır. Kartın yanmasına veya işlevini yitirmesine sebep olabilir. Bu yüzden yükseltilecek sinyal bir bağlayıcı blok üzerinden iletilmektedir. Sistemle uyumlu çalışabilmesi için BNC 2110 bağlayıcı blok kullanılmıştır. Bağlayıcı blok farklı verilerinde aktarılmasında kullanılabilir. Örneğin hız sensöründen alınan bir

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

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

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

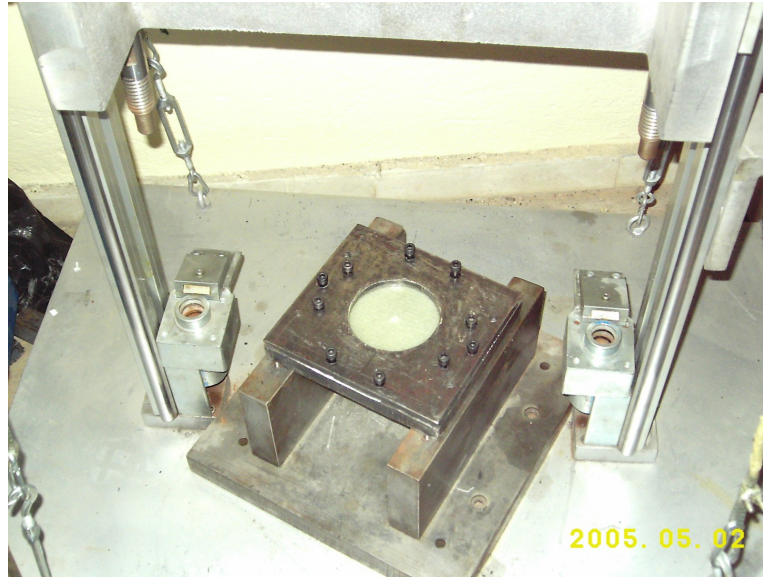
Şekil 6.7'de elektronik kontrol ünitesi görülmektedir.



Şekil 6.9 Elektronik kontrol ünitesi

6.4 Deneyin Yapılması

Şekil 6.10'da görüldüğü gibi deneyde kullanılan numuneler kalıp vasıtasıyla cihaza bağlanmıştır. Merkezi çarpmanın temini için önceden tüm numunelerin orta noktaları tespit edilerek kurşun kalemle işaretlenmiştir. Deney öncesi vurucunun işaretlenen bu orta noktaya darbe yapması için gerekli kontrol ve ayarlama yapıldıktan sonra civatalar kalıbın ve numunenin hareket etmesine ve kaymasına engel olacak şekilde sıkılmıştır.



Şekil 6.10 Dairesel kalıba bağlanmış deney numunesi

Deneyler 16 tabakalı numune için 1,0 m/s, 1,5 m/s, 2,0 m/s, 2,5 m/s ve 3,0 m/s'lik çarpma hızlarında yapılmıştır. 8 tabakalı numune 2,5 m/s hızda çok fazla hasarlandığı için 3 m/s hızda deneye tabi tutulmamıştır. Bu hızları elde edebilmek için vurucu kütlelerini bırakacağımız yükseklik teorik olarak hesaplanmıştır. Vurucunun bırakılacağı yükseklikler ve bu yükseklik değerlerindeki darbe enerjileri Çizelge 6.2'de verilmiştir. Vurucu Yarı küresel uçlu vurucu ile her bir numunenin merkezine darbe yapılmıştır. Vurucu ilk darbeyi yaptıktan sonra vurucu kütlesi tutularak tekrarlı darbeler engellenmiştir.

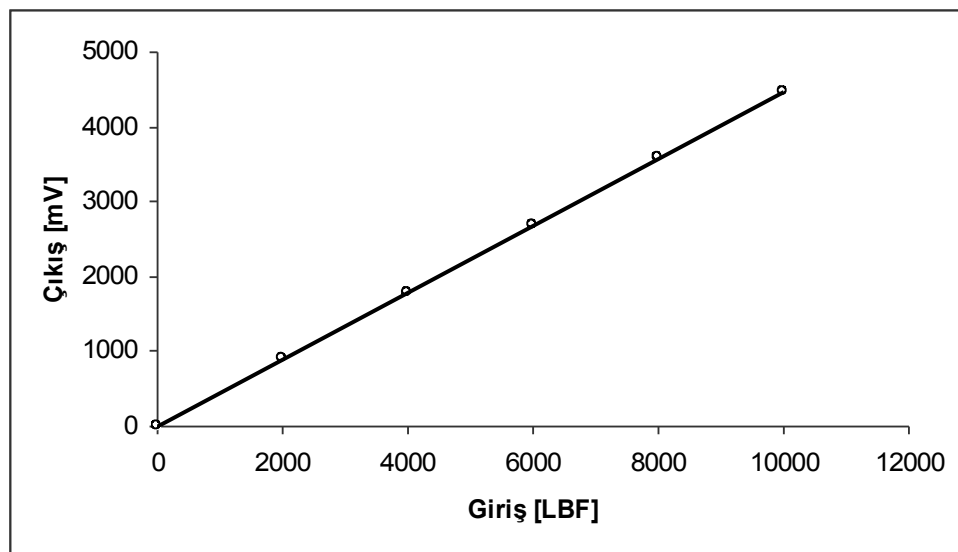
Çizelge 6.2 Numunelerin darbe hızlarına göre bırakıldıkları yükseklikler ve darbe enerjileri

Deney no:	Darbe hızı (m/s)	Yükseklik (cm)	Darbe enerjisi (J)
1	1	5,1	15,00
2	1,5	11,5	33,75
3	2	20,4	60,00
4	2,5	31,9	93,75
5	3	45,9	135,00

Darbenin ilk başlangıcından sonuna kadar bütün veriler kuvvet algılayıcı tarafından elektronik aksama iletilmiştir. Kullanılan programda saniyede kaydedilecek veri sayısı 10.000 olarak ayarlanmıştır. Bu veriler Signal Express yazılımı ile elde edilen kuvvetin zamana göre değişim grafiğinde gösterilmiştir.

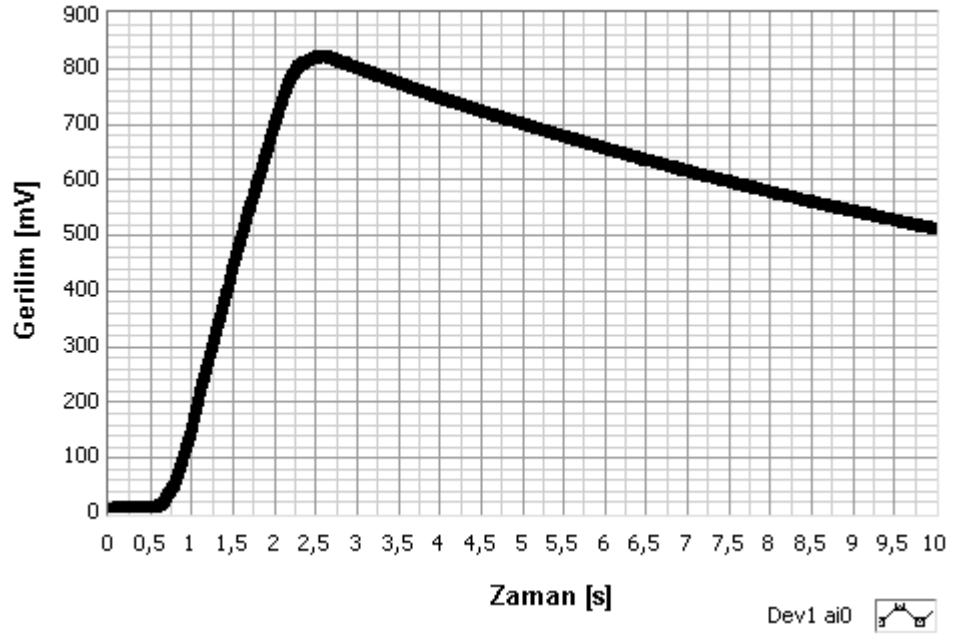
6.5 Kalibrasyon

Kuvvet sensörü PCB nin kalibrasyonu A2LA ISO/IEC 17025 belge numarası ile akredite edilmiştir. Garanti edilen değerlerin geçerli olması için kuvvet sensörü beraberinde verilen berilyum-bakır alaşımından yapılmış pulun kullanılması ve sensöre 2000 lb (8896.443 N) değerinde ön yükleme yapılması gerekmektedir. Cihaz ile beraber verilen kalibrasyon eğrisi Şekil 6.11 de görülmektedir.



Şekil 6.11 PCB Quartz ICP (M202B04) kuvvet sensörü kalibrasyon eğrisi

8896.443 N (2000lb) değerindeki bir n yükleme 898 mV luk bir gerilim çıkışına karşılık gelmektedir. Program tarafından bu ön gerilme kuvveti kısa zaman içerisinde sifira kadar dşrlerek referans noktası olarak kabul edilmekte ve daha sonra üzerine uygulanan kuvvet değerleri ekranda gösterilmektedir. Kuvvet sensörünün n yüklemesinde NI Signal Express yazılımından alınan n yükleme grafiği Şekil 6.12 de verilmiştir.

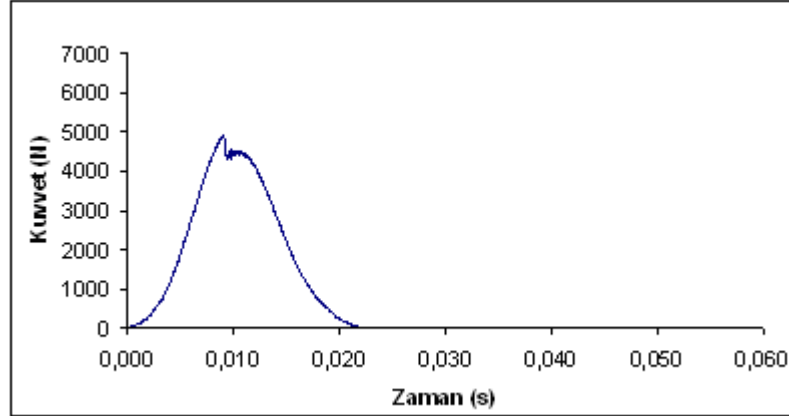


Şekil 6.12 PCB kuvvet sensörü n yüklemesi

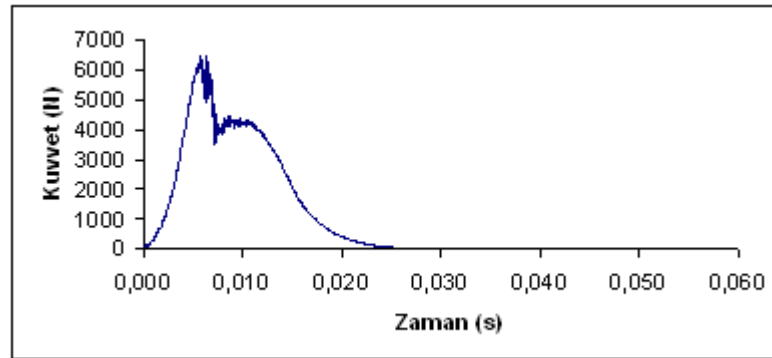
7 DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME

7.1 Vurucu ile numune arasındaki temas kuvvetleri

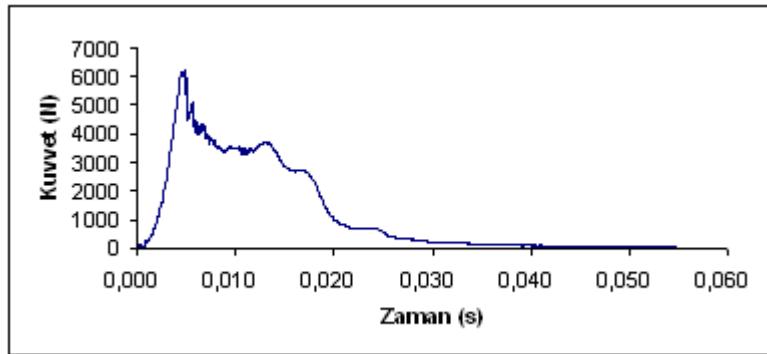
7.1.1.Çarpma Hızının Temas Kuvvetine Etkisi



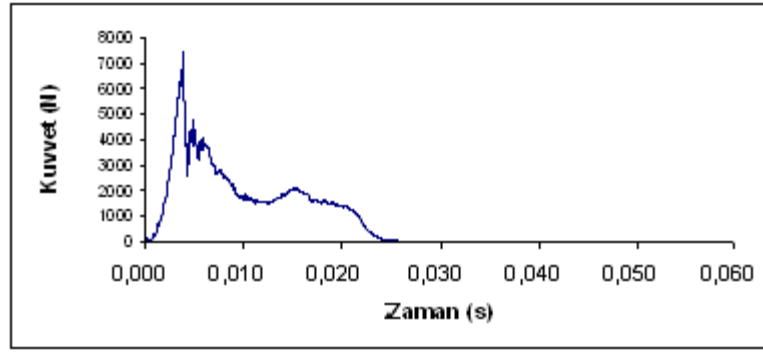
a)



b)

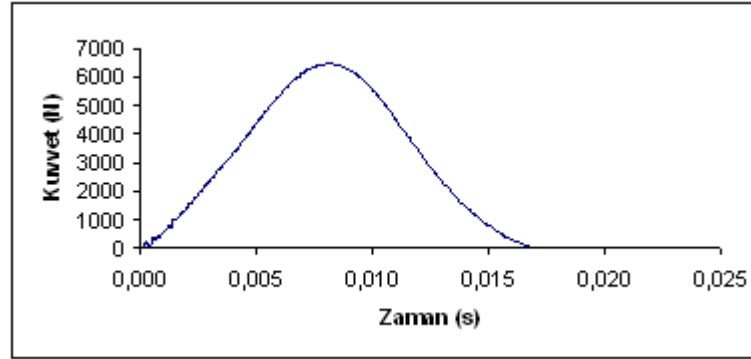


c)

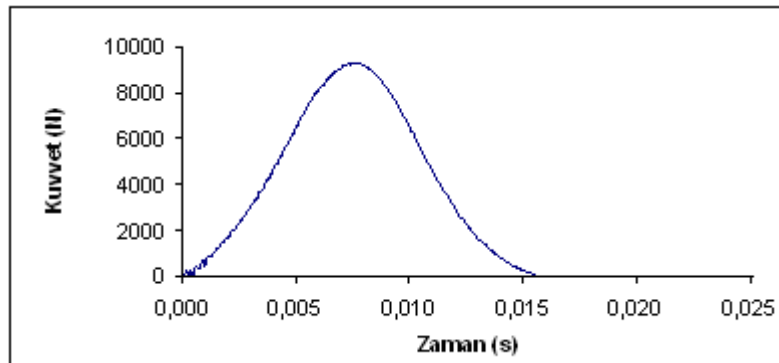


d)

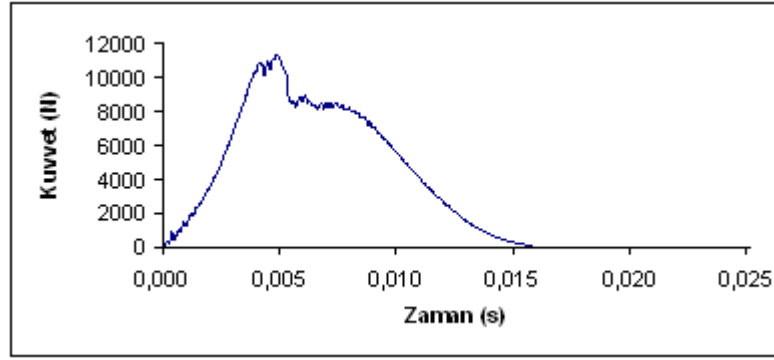
Şekil 7.1 8 tabakalı malzeme için a) 1m/s b) 1,5 m/s c) 2 m/s d) 2,5 m/s çarpma hızlarında kuvvet- zaman grafikleri.



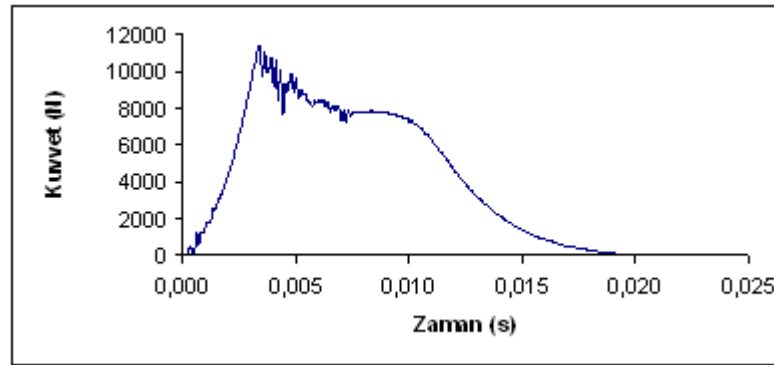
a)



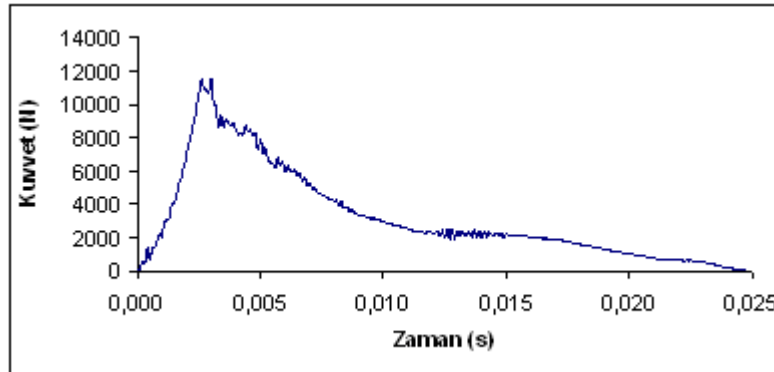
b)



c)

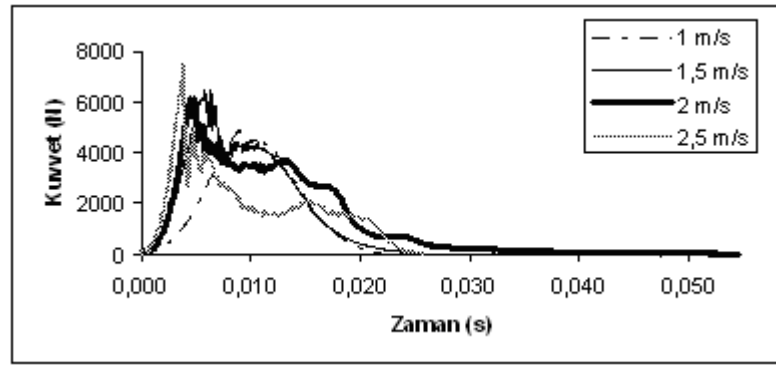


d)

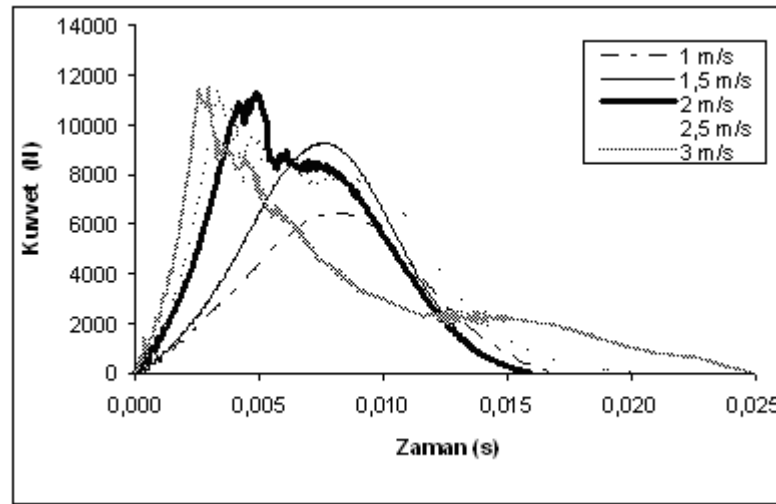


e)

Şekil 7.2 16 tabakalı malzeme için a) 1m/s b) 1,5 m/s c) 2 m/s d) 2,5 m/s ve e)3 m/s çarpma hızlarında kuvvet- zaman grafikleri.



a)



b)

Şekil 7.3 a) 8 tabakalı malzeme için; b)16 tabakalı malzeme için 1m/s, 1,5 m/s, 2 m/s, 2,5 m/s, 3m/s çarpma hızlarında kuvvet- zaman grafikleri.

Düşük Hızlı darbe sonucunda numune üzerinde oluşan temas kuvvetinin tespiti için deneylerden elde edilen veriler 8 ve 16 tabakalı numuneler için ayrı ayrı grafik haline getirilmiştir. Şekil 7.1 de 8 tabakalı numuneler için, şekil 7.2 de ise 16 tabakalı numunelerde farklı hızlardaki temas kuvvetinin zamanla değişimi gösterilmiştir. Şekil 7.3 de ise farklı kalınlıktaki numunelerde temas kuvveti- zaman değişimi farklı hızlar için birleştirilmiş grafik olarak verilmiştir.

Çizelge 7.1 de ise her bir deney için en büyük temas kuvveti ile temas süresi değerleri tablo olarak ifade edilmiştir.

8 tabakalı numunelerde temas süresin 16 tabakalı numunelerin temas süresinden daha uzun olduğu görülmektedir. Bunun bir sonucu olarak da kalın

numunelerde temas süresinin kısalmasıyla en büyük temas kuvveti daha büyük olmuştur.

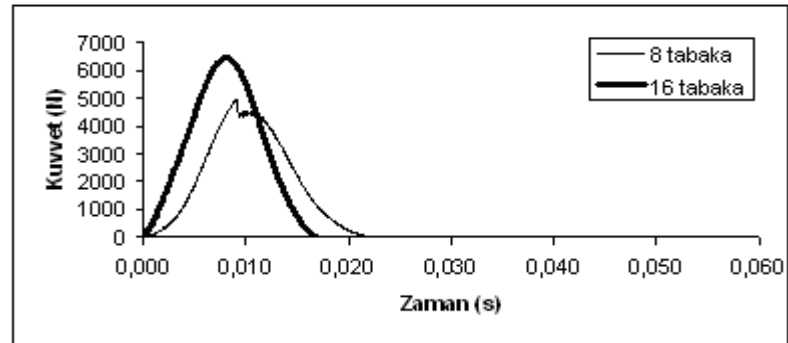
8 tabakalı numunede 1 m/s hızdan itibaren kuvvetin pik değere ulaşmasıyla numunede oluşan hasarlar nedeniyle temas kuvvetinde düşme olmuştur. Numunelerde yapılan muayenede hasarın delaminasyon ve numune arka yüzeyinde elyaf kopması şeklinde meydana geldiği görülmektedir. Çarpma hızı arttıkça hasar miktarı artmakta, böylece numunede hasara harcanan enerji miktarının da artmasıyla kuvvette daha büyük düşüşler meydana gelmektedir. 2 m/s hızdan itibaren nüfuziyet bölgesinde plastik şekil değişimleri ve numune ön yüzeyinde elyaf kopmaları belirgin olarak görülmektedir.

16 tabakalı malzemede ise 1m/s ve 1,5 m/s hızlarda sadece delaminasyon hasarı oluşmuş, fakat elyaf kopması meydana gelmemiştir. Temas kuvveti grafiklerinde de hasara harcama enerji miktarının az olması nedeniyle ânî düşüş meydana gelmemiştir. 2 m/s hızdan itibaren numune arka yüzeyinde çekme gerilmelerinden dolayı elyaf kopmaları oluşmaya başlamış ve hasar miktarı çarpma hızının artmasıyla beraber artmıştır. Bu sebeple grafikte salınımlar olmuştur.

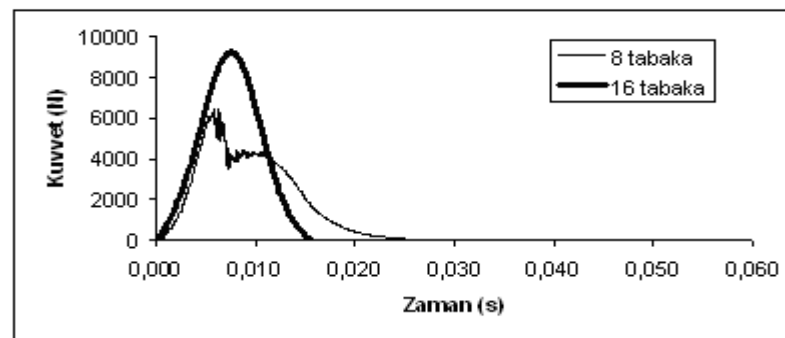
Çizelge7.1 Düşük hızlı darbe deneylerinde elde edilen her bir numune için en büyük temas kuvveti ve vurucu temas süresi değerleri

Numune	Çarpma Hızı m/s	En Büyük Temas Kuvveti (N)	Temas Süresi (s)
8 tabaka	1,0	4908	0,0225
	1,5	6487	0,0272
	2,0	6176	0,0546
	2,5	7422	0,0259
16 tabaka	1,0	6450	0,0169
	1,5	9263	0,0158
	2,0	11300	0,0160
	2,5	11396	0,0203
	3,0	11557	0,0249

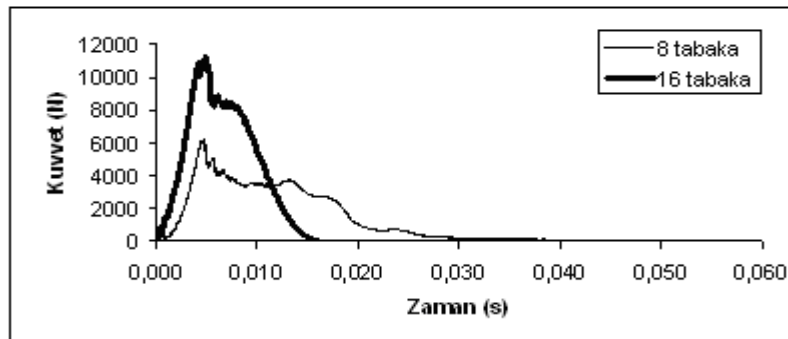
7.1.2. Malzeme Kalınlığının Temas Kuvvetine Etkisi



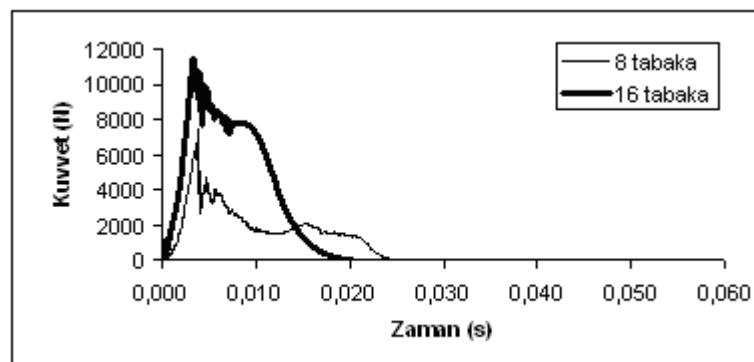
a)



b)



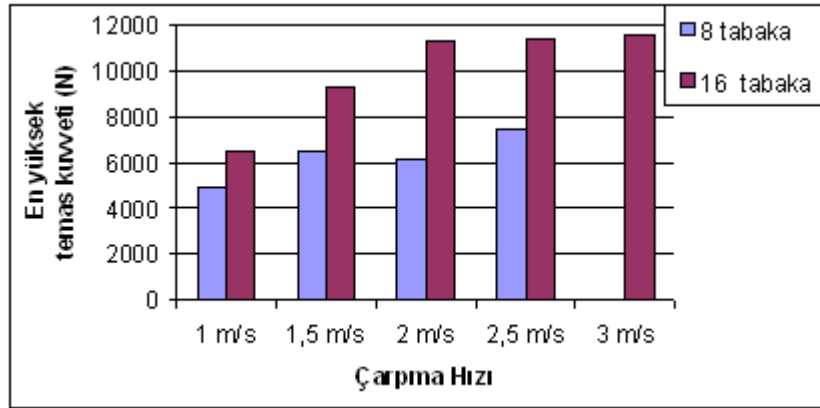
c)



d)

Şekil 7.4 Değişik numunelerde (a) 1.0 m/s, (b) 1.5 m/s ve (c) 2.0 m/s (d) 2,5 m/s çarpma hızlarında kuvvet–zaman değişimi
Çizelge 7.2 Düşük hızlı darbe deneylerinde elde edilen her bir numune için en büyük temas kuvveti ve vurucu temas süresi değerleri

Çarpma Hızı m/s	Numune	En Büyük Temas Kuvveti (N)	Temas Süresi (s)
1,0	8 tabaka	4908	0,0225
	16 tabaka	6450	0,0169
1,5	8 tabaka	6487	0,0272
	16 tabaka	9263	0,0158
2,0	8 tabaka	6176	0,0546
	16 tabaka	11300	0,0160
2,5	8 tabaka	7422	0,0259
	16 tabaka	11396	0,0203
3,0	16 tabaka	11557	0,0249



Şekil 7.5 Değişik numunelerde 1.0 m/s, 1.5 m/s, 2.0 m/s, 2.5 m/s ve 3.0 m/s çarpma hızları için en yüksek temas kuvvetleri

Sabit çarpma hızında yani eşit miktarda darbe enerjisine maruz numunelerde numune kalınlığının temas kuvvetine etkisini görebilmek için deney sonucunda elde edilen grafikler uygun bir şekilde her bir hız kademesinde her iki kalınlıktaki numuneyi de gösterecek şekilde gruplandırılmıştır. Şekil 7.4 te her iki numune çeşidi için de farklı hızlardaki kuvvet – zaman grafikleri verilmiştir. Çizelge 7.2 de ise farklı darbe hızlarında her bir numunenin en yüksek temas kuvveti ve temas süresi

tablo olarak verilmiştir. Şekil 7.5 ise en yüksek temas kuvvetlerinin darbe hızlarındaki değişimini göstermektedir.

Sonuçta 16 tabakalı numunede temas süresinin 8 tabakalı numunedekinden daha kısa, dolayısıyla temas kuvvetinin daha büyük olduğu görülmüştür. Ancak farklı hızlardaki sonuçlar birbiri ile de kıyaslanırsa çarpma hızı arttıkça 16 tabakalı numunenin temas kuvvetinin 8 tabakalı numunenin temas kuvvetine oranının da arttığı görülmektedir.

7.2. Kinetik Analiz Sonucunda Bulunan Değerler

7.2.1. Hız – Zaman Değişimi

Vurucunun numuneyle temasta olduğu süre içerisindeki hız değişimini değerlendirebilmek için fiziksel formüllere dayalı teorik hesaplamalar yapılmıştır.

Hesap, vurucunun belirlenmiş olan çarpma hızına göre numunenin tepki kuvveti tarafından durdurulması ve yine aynı kuvvetin etkisiyle belli bir sıçrama hızına ulaşması dikkate alınarak yapılmıştır. Vurucu ile numune temasının başladığı andan itibaren vurucu hızı düşmeye başlamaktadır. Yani başka bir deyişle vurucunun hızında negatif ivmelenme olmaktadır. Bu anlık ivmenin numunenin tepki kuvvetinden doğduğu dikkate alındığında, kütlesi belli olan vurucunun anlık ivmesi hesaplanabilmektedir. İlk hızı belli olan vurucunun anlık hız değişimleri her bir data için hesaplandığında, ölçülen son değerdeki hız teorik olarak bulunmaktadır.

Bu durumda numunenin belli bir hız değerinde darbeye maruz kaldıktan sonra vurucunun hızı önce sıfır olacak, daha sonra sıçrama nedeniyle negatif bir değer alacaktır.

Şekil 7.6 da 8 ve 16 tabakalı numunelerde farklı hızlarda hız değişimi, şekil 7.7 ise her bir hız kademesi için her iki numune tipine göre hız değişimi grafikleri verilmiştir.

Hesaplanan değerler dikkate alındığında deneylerin bir çoğu için bu sonucun gerçekleştiği görülmektedir. Ancak 8 tabakalı numunenin 2,5 m/s darbe hızındaki

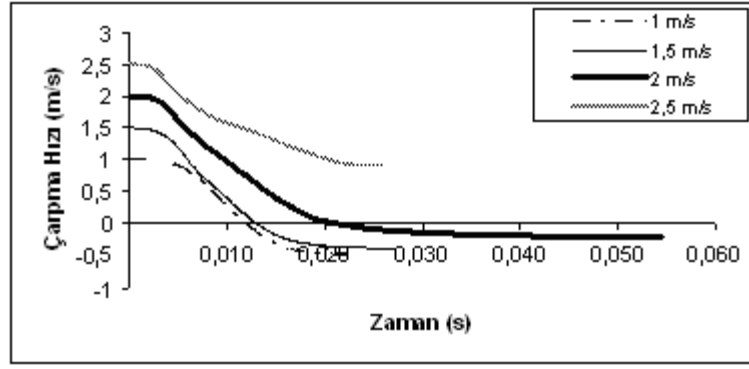
deneyde ve 16 tabakalı numunenin 3 m/s çarpma hızındaki deneyde vurucunun numuneden teması kesildikten sonra da teorik hızının hala pozitif olduğu görülmektedir. Bu farklı durum, numunede meydana gelen hasarın incelenmesiyle anlaşılabilmiştir. Çünkü bu hızlarda numunelerde çok fazla hasar meydana gelmiş ve numuneler vurucu tarafından delinmiştir.

Bu sebeple vurucu numuneyi deldikten sonra numunenin tepki kuvveti ile değil, deney cihazındaki fren mekanizması tarafından durdurulmuştur. Dolayısıyla vurucu tekrar zıplama imkanı bulamamış ve darbe enerjisinin tamamı diğer deneylerde olduğu gibi numunenin hasarlanması için harcanamamıştır. Hasardan artan enerji deney cihazı tarafından yutulduğu için sıçrama enerjisi miktarı, dolayısıyla dönüş hızı hesaplanamamıştır. Neticede ölçülen son değerdeki vurucu hızı, kütlelerin cihaz tarafından durdurulmadan önceki hızı imiş gibi görünmektedir.

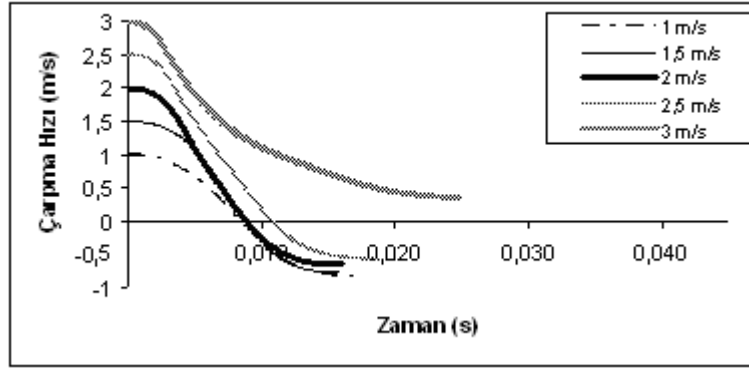
Tabaka kalınlığının vurucunun temas süresi içerisindeki hız değişimine bakıldığında ise 8 tabakalı malzemenin hızındaki düşmenin daha yavaş olduğu görülmektedir. Temas süresinin ince numunelerde daha uzun olduğu düşünüldüğünde bu durumun normal olduğu görülmektedir.

Sıçrama hızlarının da numune kalınlığına etkisine bakıldığında ise ince numunede geri dönüş hızının daha yavaş olduğu görülmektedir. Bu durum, ince numunede sıçrama enerjisinin daha düşük olması, bir başka deyişle darbe enerjisinin daha büyük kısmının hasara harcanmasından kaynaklanmaktadır.

16 tabakalı numunede 3m/s hızda deney sonucu bulunmasına rağmen 8 tabakalı numune için 2,5 m/s hızdaki darbeye delindiği için 3 m/s hızda deneme yapılamamıştır. Bu sebeple 3 m/s hızda her iki kalınlıktaki numuneyi mukayese etmek mümkün olamamıştır.

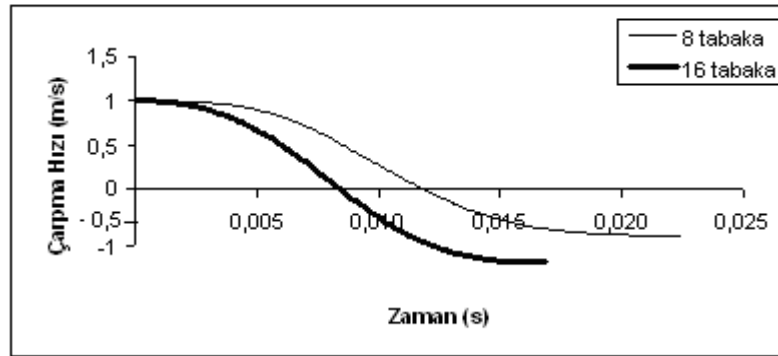


a)

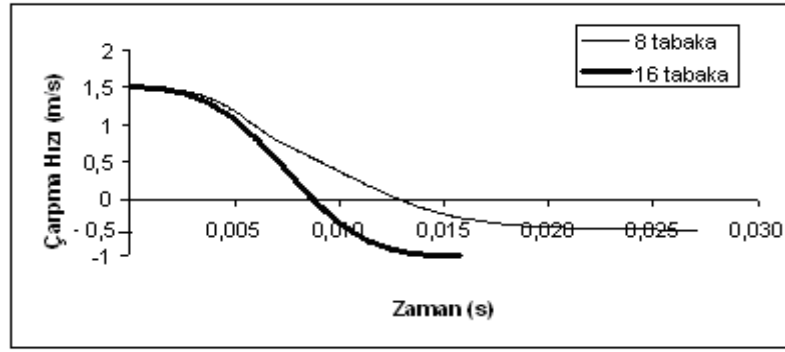


b)

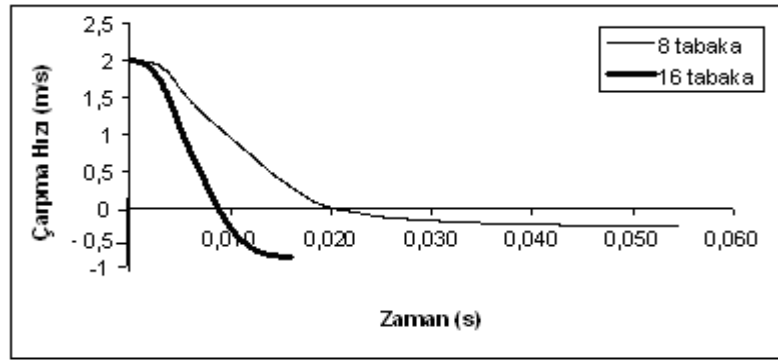
Şekil 7.6 Değişik çarpma hızlarında (a) 8 tabakalı, (b) 16 tabakalı numunelerde hız-zaman değişimi



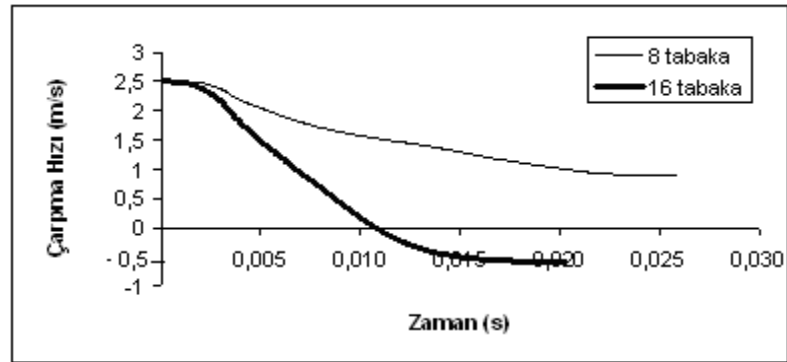
a)



b)



c)



d)

Şekil 7.7 Değişik numunelerde (a) 1.0 m/s, (b) 1.5 m/s, (c) 2.0 m/s, (d) 2,5 m/s çarpma hızlarında hız-zaman değişimi

7.2.2. Yer Değiştirme – Zaman Değişimi

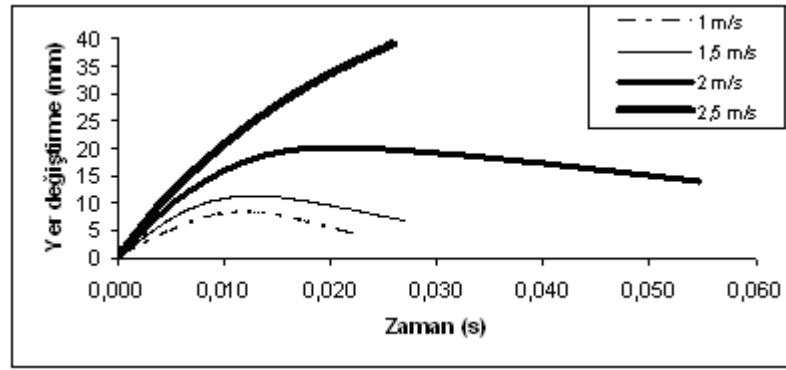
Zamana bağlı olarak vurucunun temas süresince yer değiştirmesinin belirlenebilmesi için fiziksel eşitlikler kullanılarak yer değiştirme-zaman grafikleri oluşturulmuştur. Vurucunun numuneye çarpma hızı ve temas esnasındaki kuvvet-zaman değişimi değerleri kullanılarak hız, ivme ve yer değiştirme değerleri hesaplanmıştır.

Şekil 7.8 de 8 ve 16 tabakalı numunelerin farklı hız kademelerindeki yer değiştirme- zaman değerleri malzeme kalınlığına göre bir arada verilmiştir. Şekil 7.9 da ise aynı değerler her hız kademesi için verilmiştir.

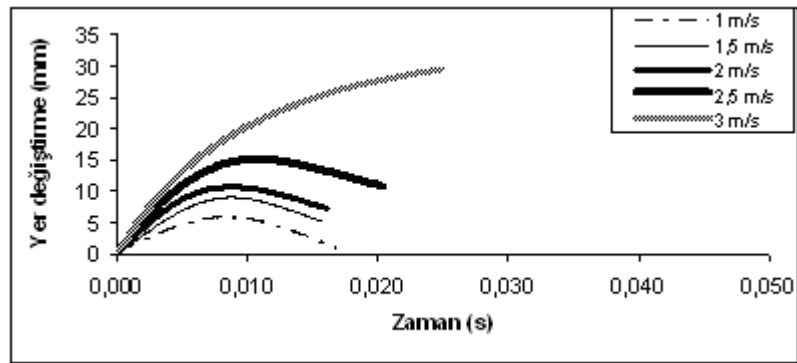
Genel olarak darbe esnasında numunede bir miktar çökme oluşmuş, fakat vurucunun numune üzerinden kalkmasıyla beraber elastik şekil değiştirme de ortadan kalkmıştır. Sonuçta geriye kalıcı şekil değişimi kalmaktadır.

Numunelerin kalınlık ve hız farklarına göre yer değiştirme değerleri incelendiğinde; darbe hızı arttıkça numunedeki şekil değişiminin de arttığı görülmektedir. 8 tabakalı numunede 2,5 m/s hızındaki değer istisna tutulursa, her iki tip numunede de yer değiştirme değişimlerinin genel olarak birbirine benzediği görülmektedir. 8 tabakalı numunenin 2,5 m/s hızdaki darbeye verdiği cevapta ise, numunede delinme meydana gelmesi sebebiyle delinmeden sonra tepki kuvveti uygulanamamış, bunun sonucunda ise sıçrama meydana gelmediği için yer değiştirme miktarında darbenin ikinci yarısında meydana gelmesi gereken düşüş oluşamamıştır. Bu husus grafiğe çok büyük yer değiştirme olmuş gibi yansımıştır.

Aynı durum şekil 7.8 (b) de de görüldüğü gibi 16 tabakalı numunenin 3m/ s hızdaki darbeye maruz kaldığı ve numunenin delindiği deney için de geçerlidir. 8 tabakalı numunede 3m/s hızda deney yapılamadığından şekil 7.9 daki grafikler gibi her iki numune için 3m/s hız değerindeki yer değiştirme- zaman değişimi grafik üzerinde mukayese edilememektedir.

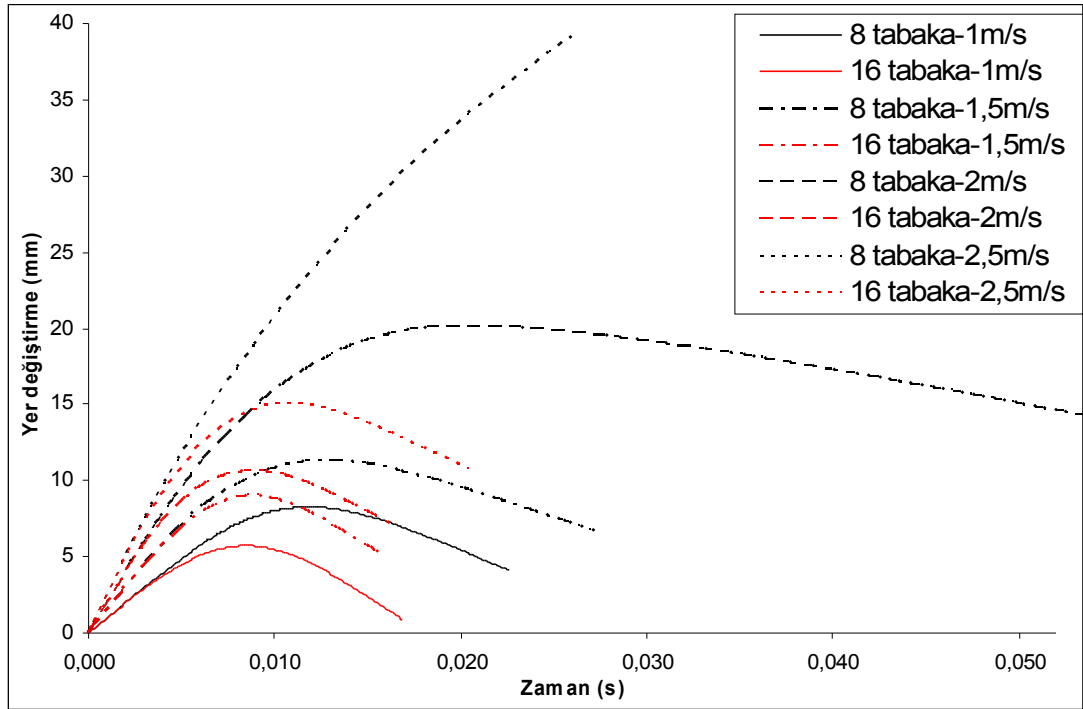


a)



b)

şekil 7.8 değişik çarpma hızlarında (a) 8 tabaka ve b)16 tabaka numunelerde yer değiştirme –zaman değişimi



Şekil 7.9 Numunelerde 1.0 m/s, 1.5 m/s, 2.0 m/s, 2,5 m/s çarpma hızlarında yer değiştirme –zaman değişimi

7.2.3. Kuvvet–Yer Değiştirme Değişimi

Malzemelerin elastik ve plastik şekil değişimlerinin değerlendirilmesinde kuvvet- yer değiştirme değerleri kullanılır. Bu çalışmada da numunelerin kalınlığına göre ve darbe hızına göre kuvvet- yer değiştirme değerleri tespit edilmiştir. Şekil 7.10 da tabaka kalınlığına göre her bir numune çeşidinin ; şekil 7.11 de ise darbe hızlarına göre numunelerin kuvvet- yer değiştirme değerleri grafik olarak verilmiştir.

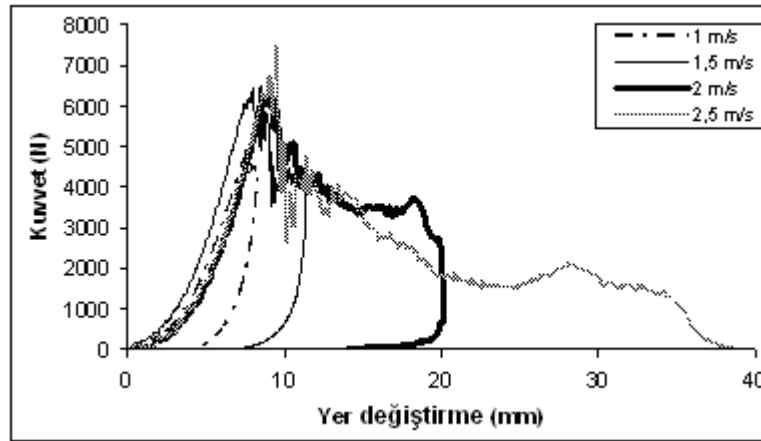
Önceki bölümlerde olduğu gibi 16 tabakalı numunelerin 3m/ darbe hızındaki deneyinde ve 8 tabakalı numunenin 2,5 m/s hızındaki deneyinde numunedeki delinme ve aşırı hasarlanmanın etkisiyle şekil değiştirme miktarı teorik hesaplamadan dolayı çok büyük olarak çıkmıştır.

Diğer grafiklerde darbe hızının artmasıyla hem temas kuvvetinin, hem de şekil değiştirme miktarının arttığı görülmektedir. Şekil 7.11 deki grafiklere

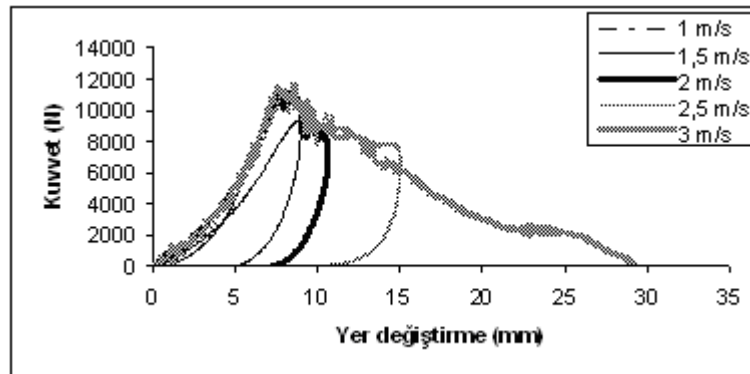
bakıldığında 8 tabakalı numunede aynı temas kuvvetine oranla 16 tabakalı numunedekinden daha fazla şekil değişimi olmaktadır. 16 tabakalı numunelerde düşük hızlardaki şekil değişiminin büyük kısmının elastik şekil değişimi olduğu ve darbe sonrasında bu şekil değişimini geri verdiği görülmüştür. Hızın artmasıyla beraber plastik şekil değişiminin toplam şekil değişimindeki oranı da artmaktadır.

8 tabakalı numunede ise yine hıza bağlı olarak plastik şekil değişimi oranı da artmaktadır.

Ayrıca numunelerde hızın artmasıyla birlikte temas esnasındaki deformasyonlar nedeniyle kuvvette düşüşler olmaktadır. Bu düşüşler grafikte salınımlara ve kırılmalara sebep olmaktadır.

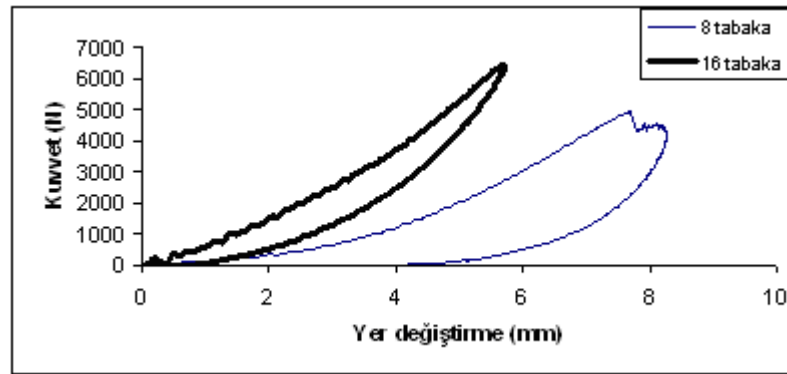


a)

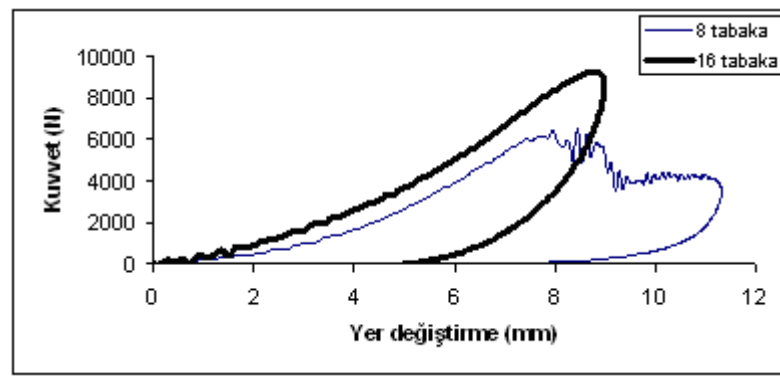


b)

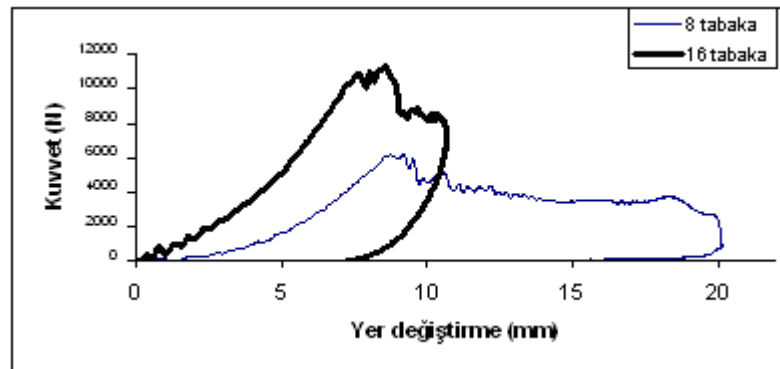
Şekil 7.10 Değişik çarpma hızlarında (a) 8 tabakalı ve (b) 16 tabakalı numunelerde kuvvet–yer değiştirme değişimi



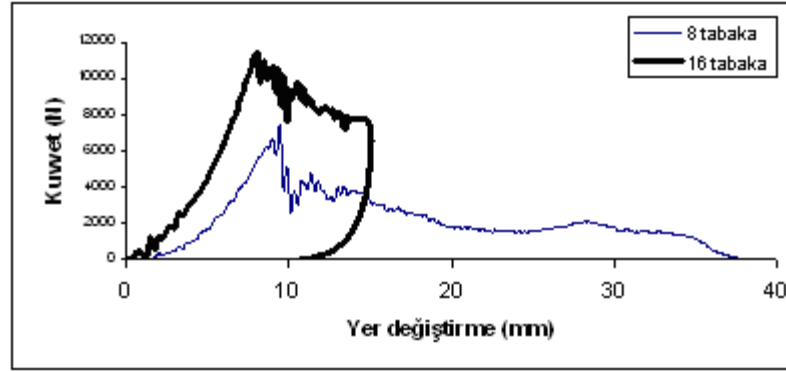
a)



b)



c)



d)

Şekil 7.11 Değişik numunelerde (a) 1.0 m/s, (b) 1.5 m/s (c) 2.0 m/s ve (d) 2,5 m/s çarpma hızlarında kuvvet–yer değiştirme değişimi

7.3. Düşük Hızlı Darbede Enerji Dağılımı

Ağırlık düşürme yöntemiyle yapılan düşük hızlı darbede enerji, vurucu kütesinin belirli bir yükseklikten bırakılması nedeniyle elde edilen potansiyel enerjiden sağlanır. Kütlein serbest bırakılmasıyla beraber potansiyel enerjiye dönüşür ve vurucu önceden belirlenmiş olan hızda numuneye çarpar. Ağırlığın serbest bırakıldığı andan darbe sonuçlanıncaya kadar geçen zaman içerisinde bu potansiyel enerjinin aşağıdaki şekillerde harcandığı düşünülebilir:

- Mesnet sisteminde harcanan enerji
- Vurucuda harcama enerji
- Kuvvet algılayıcıda tüketilen enerji
- Numune bağlama noktasında harcanan kayma enerjisi
- Parçaya aktarılan enerji
- Sıçrama enerjisi

Parça üzerine aktarılan enerji de *elastik enerji* ve *plastik hasar enerjisi* olarak iki gruba ayrılabilir.

Numune, kalıp vasıtasıyla cihaza yeterli sıklıkta bağlanmış ve kaymaları önlenmiştir. Vurucu kütesinin hareket ettiği ray ve lineer yatak sistemi çok hassas

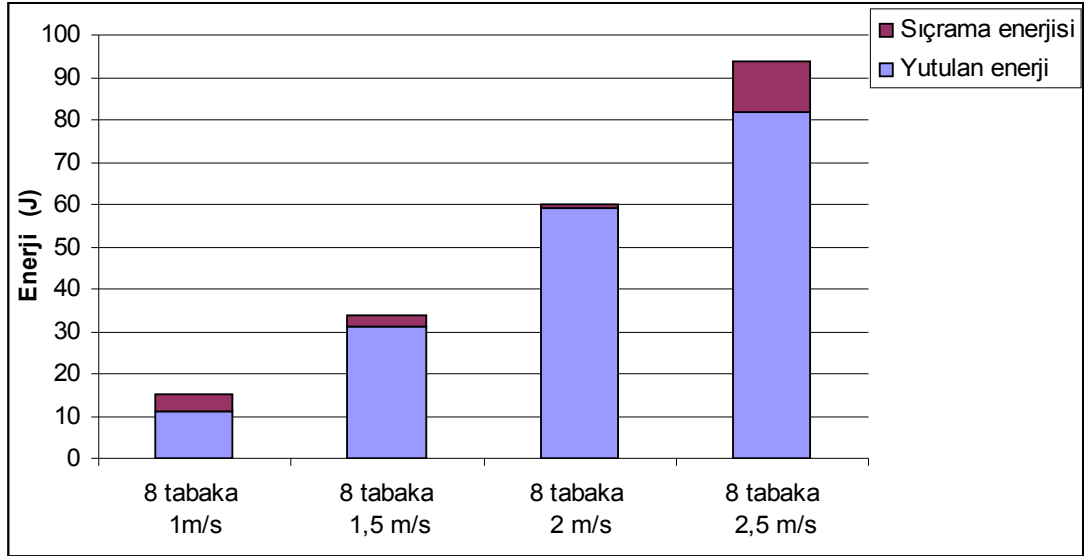
olarak bağlanmıştır. Lineer yatak sisteminde tekerlekler yuvarlanarak hareket ettiğinden meydana gelen sürtünme kuvveti ihmal edilebilecek düzeydedir. Kuvvet algılayıcı kullanım el kitabında tarif edildiği gibi bağlanmış ve ön yükleme yapılmıştır. Bu sebeple kuvvet algılayıcıda harcanan enerji de ihmal edilmiştir. Vurucu uç Ç4140 malzemeden yapılıp sertleştirildiği için de üzerinde meydana gelmiş olan elastik şekil değiştirme de numunedekine oranla çok küçük olduğundan burada harcanan enerji de ihmal edilmiştir. Bu nedenle toplam enerjinin parçaya aktarılan ve sıçramaya harcanan enerjiden ibaret olduğu kabul edilmiştir.

Kinetik analiz sonucunda elde edilen kuvvet- yer değiştirme grafiklerinde grafik altında kalan alan numune üzerinde yapılan işi (numune tarafından yutulan enerjiyi) göstermektedir. Vurucu darbe sonrasında tekrar sıçrayarak bir miktar yükselmektedir. Yutulmamış olan enerji vurucu üzerinde kinetik enerji olarak kalmış ve sıçramada kullanılmıştır.

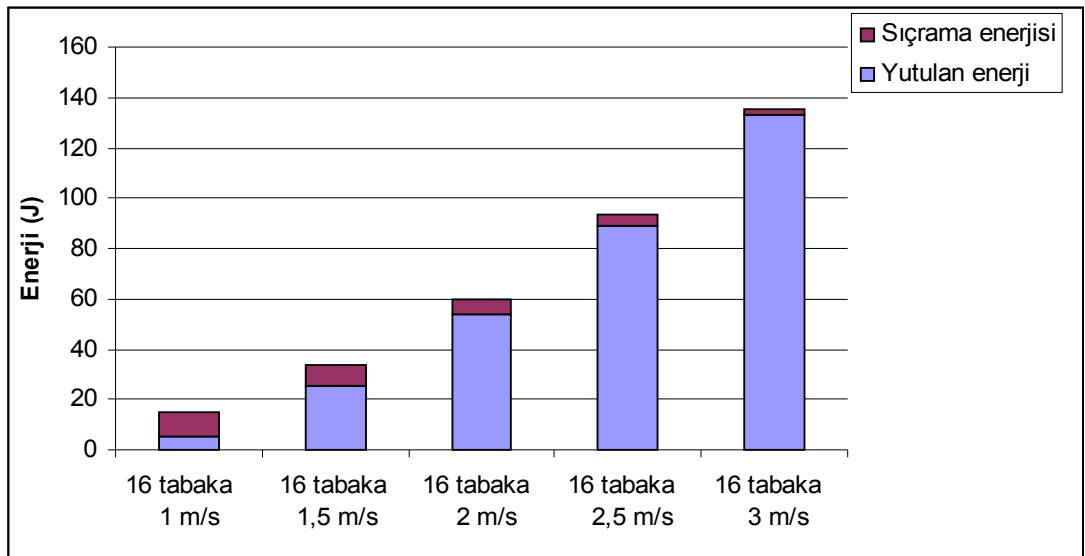
Vurucu kütesinin başlangıçtaki enerjisi bilindiğinden, yutulan enerjinin toplam enerjiden çıkarılması ile sıçrama enerjisi bulunmuştur. Bulunan enerji değerleri şekil 7.12' deki grafiklerle ifade edilmiştir. Buna göre yutulan enerji miktarının 8 tabakalı numunede 16 tabakalı numuneye oranla daha fazla olduğu görülmüştür. Darbe hızının artmasıyla numunelerde harcanan enerji oranının da arttığı dikkat çekmektedir. Bu oran artışı 16 tabakalı numunelerde darbe hızıyla beraber daha hızlı olarak gerçekleşmiştir.

Şekil 7.12 (a)' daki grafiğe bakıldığında 8 tabakalı numunede 2,5 m/s darbe hızındaki yutulan enerji oranının düştüğü görülmektedir. Bu düşüş, 8 tabakalı numunenin o deneyde delinmesi ve vurucunun deney cihazı tarafından durdurulmasından kaynaklanmaktadır. Numunenin delinmesinden sonra kalan enerji sıçramada kullanılamamış, deney cihazı tarafından yutularak vurucu durdurulmuştur. Ancak grafikte, numunenin kuvvet- yer değiştirme grafiğinden elde edilen yutulan enerji miktarı görünmektedir.

Burada dikkat çekici diğer bir husus da 16 tabakalı numunede 1m/s hızda yutulan enerjinin oranı %33 kadar iken 1,5 m/s hızdaki darbeye %74 oranına ulaşmasıdır. Bu artış numunedeki kalıcı şekil değişiminden kaynaklanmaktadır.



a)



b)

Şekil 7.12 Değişik çarpma hızlarında (a) 8 tabakalı numunelerde, (b) 16 tabakalı numunelerde enerji dağılımı

7.4 Hasar Bölgeleri

Düşük hızlı darbeye maruz kalan cam elyafı malzemelerde hasar bölgesi arkasına ışık tutularak belirlenebilmektedir. Çünkü cam elyaflar ve reçinelerin bir ışık geçirgenliği vardır. Hasarlı bölgelerde elyaf ve matris yapılarında fizikî olarak meydana gelen değişim, malzemenin ışık geçirgenliğini etkilemekte ve böylece ışık altında farklı renkte görüntü oluşturmaktadır. Bu görüntüler, numunede meydana gelen delaminasyon, elyaf kopmaları, matris hasarları veya nüfuziyet bölgelerinde meydana gelen ezilme ve çökmelerin büyüklükleri hakkında bilgi vermektedir.

Darbeye maruz bölgelerdeki hasarların miktarını ve hasar modlarını belirleyebilmek için hasarlı numunelerin ışık altında fotoğrafları çekildi. Fotoğraflar Autocad programına aktarılarak ölçeklendirildi ve hasarlı bölgelerin etrafı çizilerek belirlendikten sonra çizili olan bölgenin alanı aynı program yardımıyla hesaplandı.

Ayrıca nüfuziyetten kaynaklanan hasar alanının da görülebilmesi için önden görünüş resimlerinde bu bölge ayrıca bir çizgiyle çevrelendi.

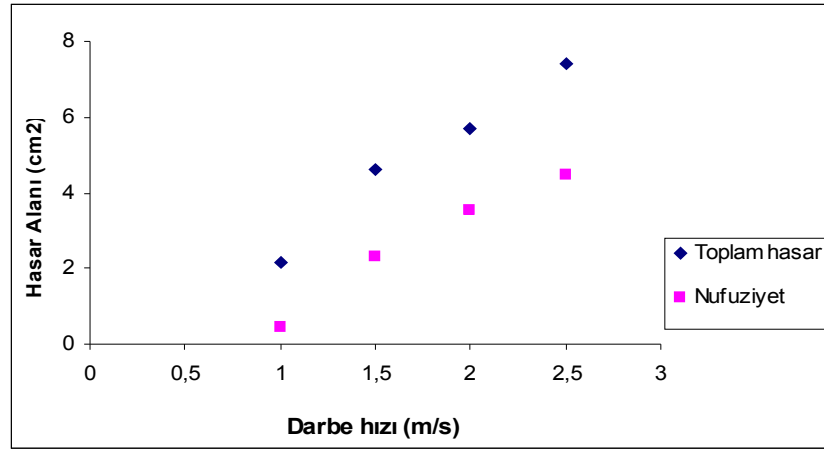
Numunelerin her bir deney numunesi için hesaplanmış hasar alanları cm^2 olarak Çizelge 7.3 de verilmiştir. Numunelerin ön yüzünde bulunan nüfuziyet bölgeleri de ayrıca hesaplanmıştır. Hesaplanan bu değerler Şekil 7.13 te grafik olarak 8 tabaklı ve 16 tabakalı numuneler için ayrı ayrı olarak verilmiştir.

Şekil 7. 14 (a) da 8 tabakalı numune için, (b) de ise 16 tabakalı numune için 2 m/s darbe hızında teste tabi tutulan numunenin ışıklı fotoğrafı görülmektedir.

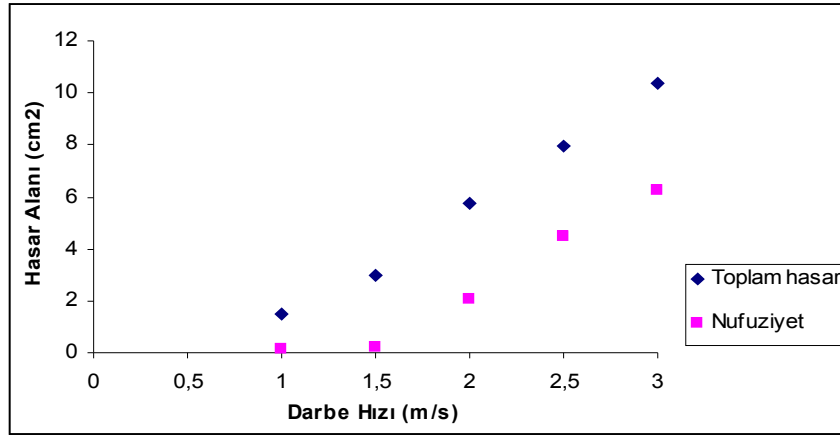
Şekil 7.15' de 8 tabakalı numunelerin; Şekil 7.16' da ise 16 tabakalı numunelerin hasar bölgeleri çizilmiş resimleri görülmektedir.

Çizelge 7.3 Numunelerde meydana gelen nüfuziyet hasarı ve toplam hasar alanı

Tabaka Sayısı	Darbe Hızı (m/s)	Toplam Hasar (cm^2)	Nüfuziyet Hasarı (cm^2)
8 tabaka	1	2,16	0,43
	1,5	4,61	2,30
	2	5,70	3,55
	2,5	7,41	4,48
16 tabaka	1	1,47	0,12
	1,5	3,02	0,18
	2	5,74	2,07
	2,5	7,92	4,51
	3	10,35	6,28

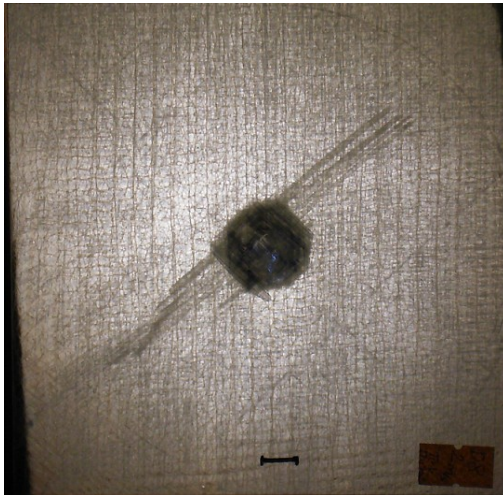


a)

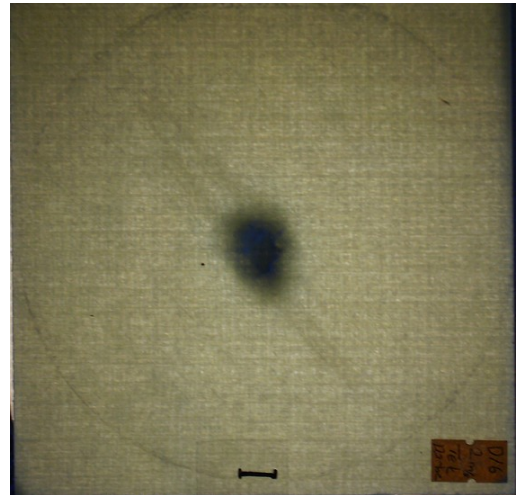


b)

Şekil 7.13 Farklı darbe hızlarına göre a) 8 tabakalı numunede; b)16 tabakalı numunede nufuziyet bölgesinde ve toplam hasar alanı değişimi.

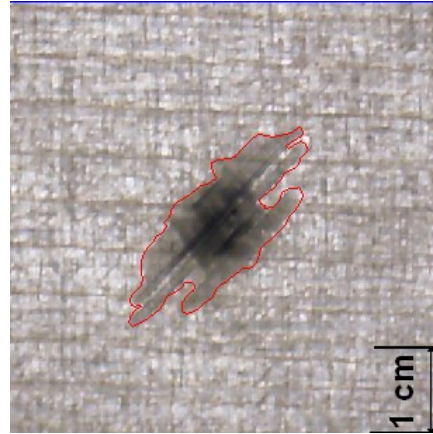
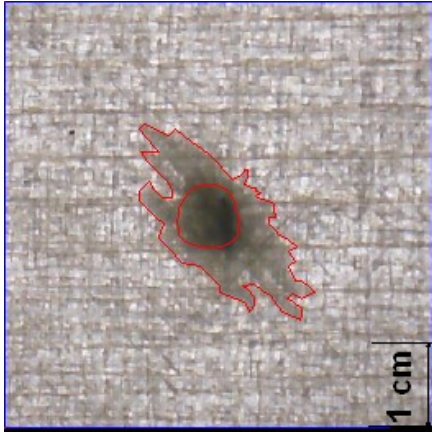


a)

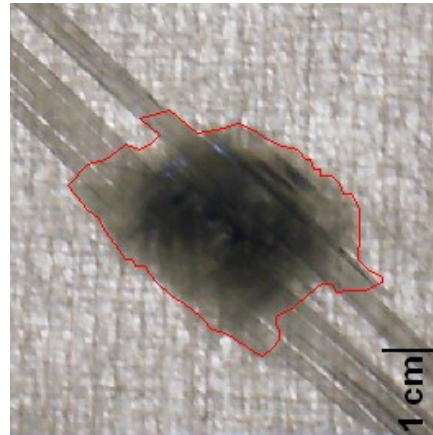
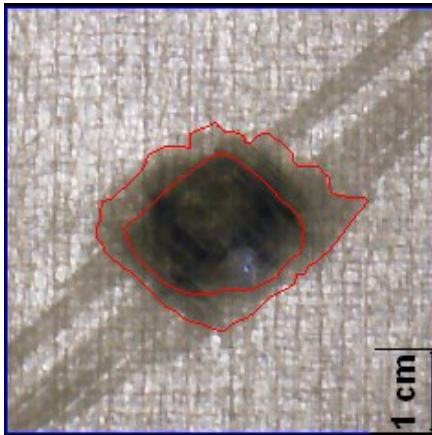


b)

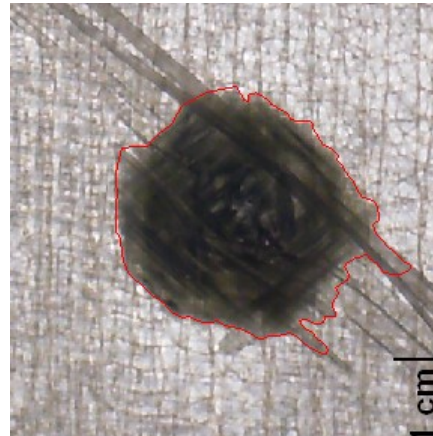
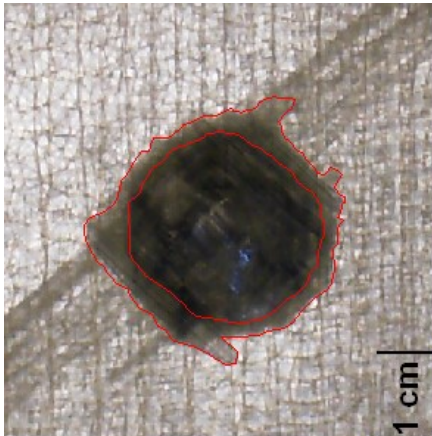
Şekil 7.14 2m/s hızında darbeye maruz bırakılan a) 8 tabakalı numunenin; b)16 tabakalı numunenin ışıklı fotoğraf



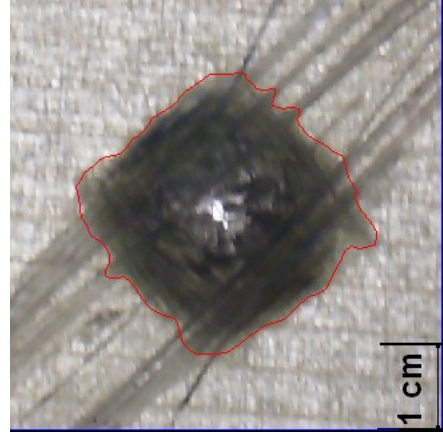
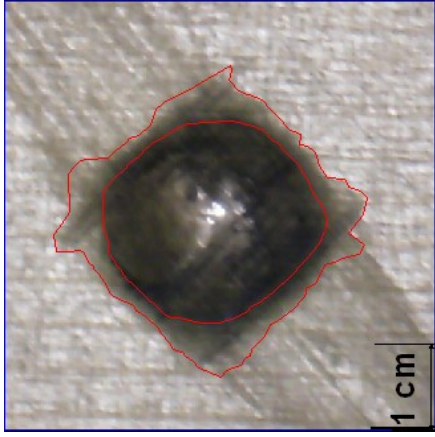
a)



b)

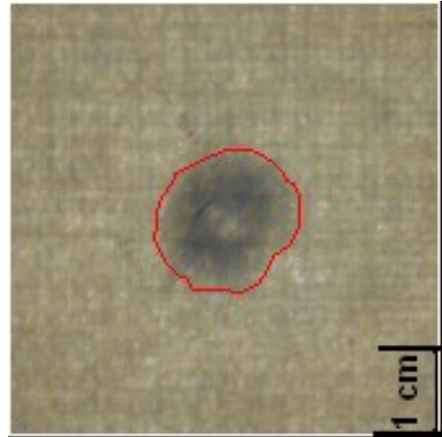
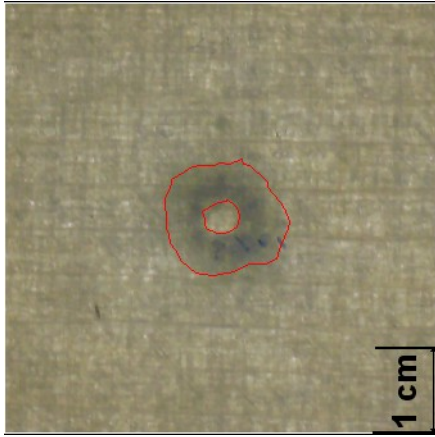


c)

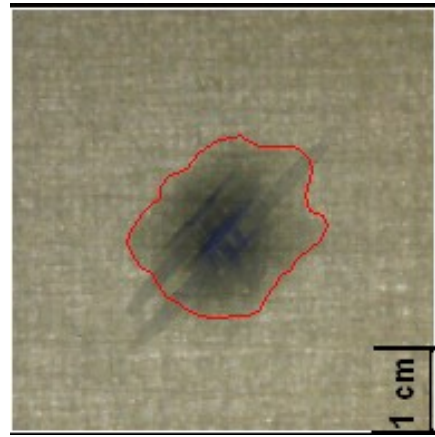
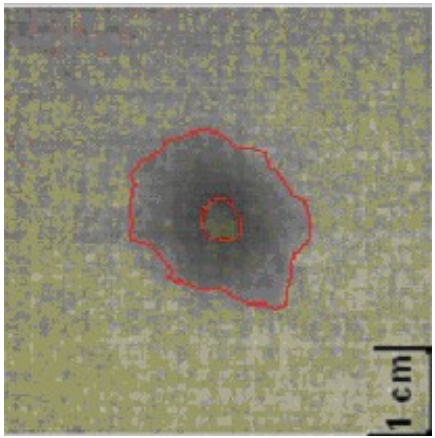


d)

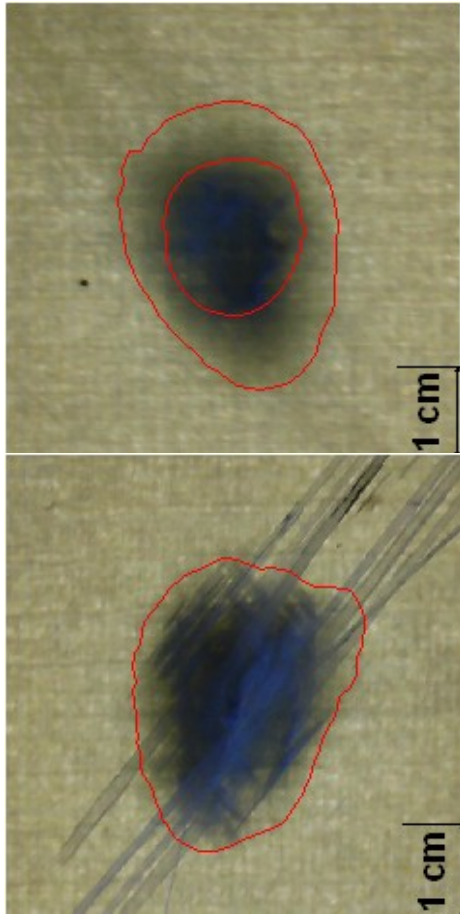
Şekil 7.15 8 tabakalı malzeme için a) 1m/s, b) 1,5 m/s, c) 2 m/s, d) 2,5 m/s çarpma hızlarında oluşan hasar bölgelerinin ön (soldaki resimler) ve arkadan (sağdaki resimler) görünümü.



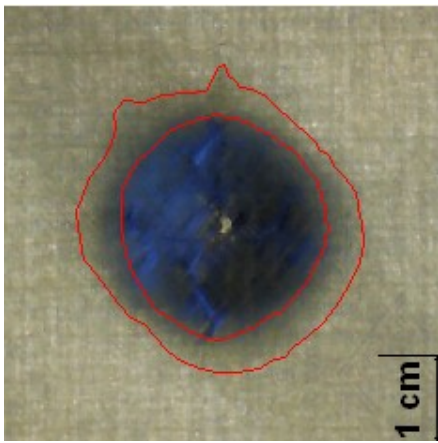
a)



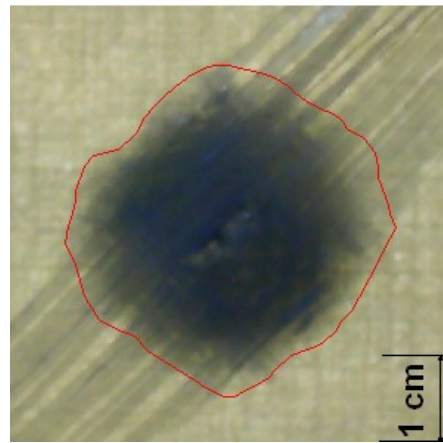
b)

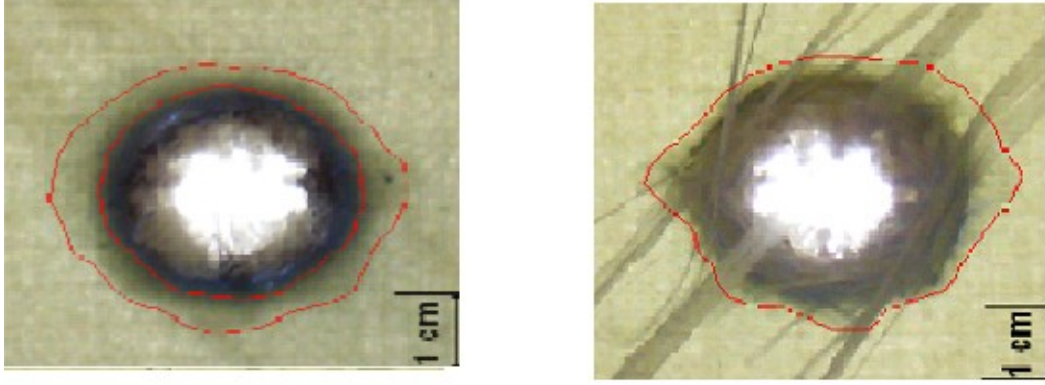


c)



d)





e)

Şekil 7.16 16 tabakalı malzeme için a) 1m/s, b) 1,5 m/s, c) 2 m/s, d) 2,5 m/s, e)3m/s çarpma hızlarında oluşan hasar bölgelerinin ön (soldaki resimler) ve arkadan (sağdaki resimler) görünümü.

7.5 İmpuls Kuvvetleri

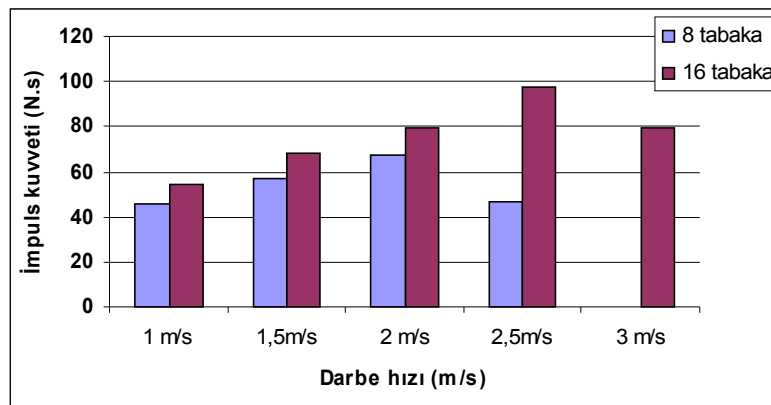
Momentumdaki değişim, impuls kuvveti olarak ifade edilir. Aynı zamanda kuvvet-zaman eğrisi altında kalan alan, impuls kuvvetini verir. Çarpışma olayında etkin olan kuvvet, çok kısa süre tesirlidir. Bu kısa süre içerisindeki impuls kuvvetinin tespiti için kuvvet-zaman grafiği altındaki alan yamuklar metodu ile bulunarak hesaplanmıştır. Bulunan sonuçlarla oluşturulan grafik, Şekil 7.17 te gösterilmektedir. İmpuls kuvveti, kuvvet ile zamanın çarpımına eşit olduğundan kuvvetin büyüklüğünü bu iki faktör doğrudan etkilemektedir. Temas kuvveti ile zamanı etkileyen diğer faktörler ise impuls kuvvetini dolaylı olarak etkilemektedir. Kalınlık, darbe hızı gibi faktörlere daha önceki bölümlerde değinilmiştir.

Malzeme kalınlığı arttıkça impuls kuvveti de artmaktadır. Kalınlık ile temas kuvveti de artmakta, fakat temas süresi biraz azalmaktadır. Bu durum 16 tabakalı malzemede kuvvet-zaman grafiği altında kalan alanın da artmasına sebep olmaktadır.

Darbe hızında ise hız artmasına rağmen temas süresinin fazla değişmediği, buna rağmen temas kuvvetinin arttığı görülmektedir.

İmpuls kuvvetleri grafiği incelendiğinde 8 tabakalı numunede darbe hızının artmasıyla impuls kuvvetinin de arttığı, ancak 2,5 m/s darbe hızındaki impuls kuvvetinin 2 m/s darbe hızındaki impuls kuvvetinden daha düşük olduğu görülmektedir. 2,5 m/s darbe hızında numunenin çok fazla hasarlanması ve anlık temas kuvvetindeki düşüşlerden dolayı impuls kuvvetinin, darbe hızının artmasına rağmen düştüğü gözlemlenmektedir.

Aynı durum, 16 tabakalı numunede 2,5 m/s hız ile 3 m/s darbe hızında yapılan deneylerde de görülmektedir. Numunede artan hasar nedeniyle verilen tepki kuvvetindeki düşüş, impuls kuvvetinin daha düşük çıkmasına sebep olmuştur.



Şekil 7.17 8 ve 16 tabakalı numune için her bir darbe hızında oluşan impuls kuvvetleri.

8. SONUÇLAR

Bu çalışmada Ağırlık düşürme test cihazı ile 140x140 mm ebatlarında hazırlanmış olan [+45/-45/90/0]_s şeklinde dizilmiş 8 tabakalı ve [+45/-45/90/0]_{2s} şeklindeki dizilimden oluşan 16 tabakalı, tek yönlü cam elyaf takviyeli kompozit malzemelerin darbe hasarı incelenmiştir. Farklı darbe hızlarına verdiği cevap ve malzemede oluşan hasar durumunu incelemek üzere 1m/s, 1,5 m/s, 2 m/s, 2,5 m/s, ve 3 m/s darbe hızlarında deneyler yapılmıştır.

Numuneler, önceden hazırlanmış olan ve orta kısmında 100mm dairesel boşluğu bulunan metal kalıplar içerisine çevreden ankastre olarak cıvatarla sıkılarak rijitlik sağlanmıştır.

8 tabakalı numunede 2,5m/s darbe hızına kadar, 16 tabakalı numunede ise 3m/s darbe hızına kadar darbe yapılmıştır. Her bir numune belirtilen bu üst hız sınırında yüksek miktarda hasarlandığı için darbe hızı daha fazla artırılmamıştır.

Deney, 24 mm çapında küresel uçlu bir vurucu kullanılarak yapılmış, sonuçlar kuvvet sensörü tarafından bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Bu çalışmadan elde edilen veriler değerlendirildiğinde elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir:

1. Numune kalınlığı darbe esnasında oluşan en büyük temas kuvvetini büyük ölçüde etkilemektedir. Numune kalınlığı arttıkça oluşan temas kuvveti de artmaktadır.
2. Temas süresi, aynı darbe hızlarında numune kalınlığı ile ters orantılı olarak gelişmektedir. İnce numunede temas süresinin daha uzun olduğu görülmüştür.
3. Aynı kalınlıktaki numuneler için darbe hızı arttıkça en büyük temas kuvveti de artmakta, ancak temas süresi çok fazla değişmemektedir.
4. Darbe enerjisi arttıkça numunede yutulan enerjinin toplam enerjiye oranı da artmakta, bunun sonucu olarak da meydana gelen hasar miktarı artmaktadır.
5. Numune kalınlığı arttıkça numune tarafından yutulan enerjinin toplam darbe enerjisine oranının azaldığı görülmüştür. Bu durum, ince numunede hasarın daha fazla olmasından kaynaklanmaktadır.
6. Malzeme kalınlığının artması ile sıçrama enerjisi de artmaktadır. Bu durum, kalın malzemede oluşan hasar miktarının daha az olması nedeniyle darbe enerjisinin yutulmayıp sıçramaya harcanmasının bir sonucudur.

7. Malzemede hasar miktarının artmasıyla darbe kuvvetine verilen tepki kuvveti de artmaktadır. Ancak hasar boyutu, elyafların büyük kısmının koptuğu bir seviyede gerçekleşirse darbe esnasında temas kuvvetinde anî düşmeler meydana gelmekte, bunun sonucu olarak da impuls kuvvetleri düşmektedir.

9. KAYNAKLAR

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Metin M. 2005 Yüksek Lisans Semineri Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya

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

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

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

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

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

Şahin, Y., *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