

DÜŞÜK HIZLI DARBE ETKİSİ ALTINDAKİ
KOMPOZİT PLAKLARDA ÖNGERİLME
ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Ali KURŞUN

Yüksek Lisans Tezi

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Temmuz – 2009

**DÜŞÜK HIZLI DARBE ETKİSİ ALTINDAKİ KOMPOZİT PLAKLARDA
ÖN GERİLME ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

Ali KURŞUN

Dumlupınar Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca
Makine Mühendisliği Anabilim Dalında
YÜKSEK LİSANS TEZİ
Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Mehmet ŞENEL

Temmuz - 2009

KABUL VE ONAY SAYFASI

Ali KURŞUN'un YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı "DÜŞÜK HIZLI DARBE ETKİSİ ALTINDAKİ KOMPOZİT PLAKLARDA ÖNGERİLME ETKİSİNİN İNCELENMESİ" başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

...../...../2009

Üye : Doç. Dr. Rahmi ÜNAL

Üye : Yrd. Doç. Dr. Mehmet ŞENEL (Danışman)

Üye : Yrd. Doç. Dr. Ö. Fatih Yalçın

Fen Bilimleri Enstitüsün Yönetim Kurulu'nun/...../..... gün ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Atalay KÜÇÜKBURSA
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

DÜŞÜK HIZLI DARBE ETKİSİ ALTINDAKİ KOMPOZİT PLAKLARDA ÖNGERİLME ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Ali KURŞUN

Makine Mühendisliği, Yüksek Lisans Tezi, 2009

Danışman Yrd. Doç. Dr. Mehmet ŞENEL

ÖZET

Bu tezin amacı, düşük hızlı darbe etkisi altındaki kompozit plaklardaki öngerilme etkisini incelemektir. Mühendislik uygulamalarında özellikle imalat, montaj, bakım ve kullanım aşamasında dışarıdan gelebilecek herhangi bir darbeye karşı beklenmedik sonuçlar ortaya çıkabilir. Bunu engellemek için malzemenin bu tip etkiler karşısında davranışının nasıl olacağı, yapılan darbe testleri ile tahmin edilebilir. Tahminlerin yapılabilmesi için olayın laboratuarda modellenmesi gerekmektedir. Bu amaçla, Deneyler makine laboratuvarında TÜBİTAK kariyer projesi kapsamında imalatı yapılmış düşük hızlı darbe test cihazında yapılmıştır. Numune Epoxy- Cam Elyaf takviyeli $[0/90]_{2s}$ oryantasyon açılı 8 kat simetrik tabakalı kompozit plak olarak hazırlanmış olup ortalama kalınlığı 2mm dir. Boyutları 140x140mm olarak alınmıştır. Numunelere; yüksüz ve öngerilmeli olarak 2kN, 4kN ve 6kN'luk (Çeki-Çeki, Çeki-Bası, Bası-Bası) kuvvetleri uygulandıktan sonra 23,6J'lük enerjide darbe testleri yapılmıştır. Veriler ağırlık ile vurucu uç arasına yerleştirilmiş bir piezoelektrik sensör yardımıyla bilgisayar ortamına aktarılarak grafiksel sonuçlar oluşturulmuştur.

Sonuç olarak, düşük hızlı darbe etkisi altındaki kompozit plaklarda ön gerilmenin etkisiyle, maksimum kuvvet, çökme ve apsorbe edilen enerjideki değişim deneysel olarak belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Düşük hızlı darbe, Öngerilme, Kompozit plak.

INVESTIGATIONS OF PRE-STRESS EFFECTS ON COMPOSITE PLATES UNDER THE LOW-VELOCITY IMPACT

Ali KURŞUN

Mechanical Engineering, MSc Thesis, 2009

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Mehmet ŞENEL

SUMMARY

The purpose of this thesis is to evaluate pre-stress effects of composite plates under the low-velocity impact. In engineering applications, especially during manufacturing, installation, maintenance and usage processes, an unexpected results may occur against any outside impact. To prevent this, the behavior of the material against these effects can be estimated by impact tests. To estimate these effects, event has to be modelled in laboratory. For this pupose, the experiments were made in the machine laboratory by the low-velocity impact test device which is manufactured in TUBITAK career project. The sample was prepared as a Epoxy-Glass fiber reinforced composite $[0 / 90]_{2s}$ orientated, 8 layered symmetric composite plate and it's average thickness is 2mm. The size of the samples are taken as 140x140mm. After applying 2kN, 4kN and 6kN of unloaded and pre-stressed (tension-tension, tension-compression, compression-compression) forces, impact tests were made under 23.6 Joule energy. The graphical results were created by transferring the data to the computer with a piezoelectric sensor which is placed between the end shooters and the weight

As a result, the change maximum force, in the absorbed energy and collapse of the pre-stress on the composite plate under low-velocity impact.

Key Words: Low-velocity impact, Pre-stress, Composite plates.

TEŞEKKÜR

Bu tezin hazırlanmasında değerli katkılarını esirgemeyen tez danıőmanım sayın Yrd. Doç. Dr. Mehmet ŞENEL'e , Dumlupınar Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü tüm sayın hocalarıma ve test düzeneğinin oluşmasında katkıda buluna TUBITAK'a teşekkürü bir borç bilirim. Aynı zamanda bana sabırla katlanan yakınlarıma ve aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	iv
SUMMARY	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
ÇİZELGELER DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR	3
2.1 Darbe ve Darbe Testleri.....	3
2.2. Yapılan Çalışmalar	4
3. KOMPOZİT MALZEMELER.....	8
3.1. Kompozit Malzemelerin Tanıtımı	8
3.2. Matris Malzemeleri.....	9
3.2.1. Plastik Matrisler	10
3.2.2. Termoset Matrisler.....	10
3.2.3. Epoxy Reçine Matriks Malzemesi	10
3.3. Takviye Malzemeleri.....	11
3.3.1. Cam Elyaf Takviyeli Malzemeler	11
3.4. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması	12
3.4.1. Fiber Takviyeli Kompozitler.....	13
3.4.2. Partikül Takviyeli Kompozitler.....	13
3.4.3. Pul Kompozitler	13
3.4.4. Dolgu Kompozitleri	14
3.4.5. Tabakalı Kompozitler	14
3.5. Kompozit Malzemelerin Kullanım Yerleri.....	14
4. DARBE TEST YÖNTEMLERİ.....	17
4.1. Çentik Darbe Testleri.....	17
4.1.1. Charpy Darbe Testi	19
4.1.2. İzod Darbe Testi.....	20

İÇİNDEKİLER DEVAM

	<u>Sayfa</u>
4.2. Ağırlık Düşürme testleri	20
4.2.1. Yüksek Hızlı Darbe.....	21
4.2.2. Düşük Hızlı Darbe	22
4.3. Tabakalı Kompozit Malzemede Darbe Sonucu Oluşan Hasar Modları	22
4.3.1. Matris Hasarı.....	23
4.3.2. Delaminasyon.....	25
4.3.3. Elyaf Kopması.....	25
4.3.4. Nüfuziyet.....	26
4.4. Darbe Mekanığı	26
4.4.1. Düşük Hızlı Darbenin Mekanığı	26
4.4.2. Düşük Hızlı Darbenin Kinematik Analizi	27
4.4.3. Katı Cisim Darbesi.....	29
4.4.4. Katı Cisim Darbe Mekanığının Esasları	30
4.5. Dinamik Yükler	31
4.5.1. Atalet Kuvvetlerinden Doğan Gerilmeler	32
4.5.2. Dinamik Yüke Maruz Kalma Durumları	32
4.5.3. Ani Yükleme	35
4.6. Darbe Test Hesaplamaları	37
4.6.1. $F(t)$, Ölçülen Kuvvet	38
4.6.2. $E(t)$, Apsorbe Edilen Enerji.....	38
4.6.3. $\delta(t)$ Çarpma ile Oluşan Yerdeğiştirme	39
4.7. Kompozit Malzemelerde Burkulma	41
4.7.1. Eksenel Burkulma	42
4.7.2. Kayma Burkulması	44
5. DENEYSEL YÖNTEM	45
5.1. Deney Numunesi	45
5.2. Test Düzeneği	45
5.3. Deney Metodolojisi	46
5.4. Grafikselleştirilmenin Çıkarılması.....	48
6. DENEYSEL SONUÇLAR.....	50
6.1. Düşük Hızlı Darbe Test Grafiklerinin Yorumlanması.....	50
6.1.1. Batma ve Batma Başlangıcı	50
6.1.2. Temas (kontakt) Kuvveti-Zaman Grafik Yorumu.....	50
6.1.3. Hız-Zaman Grafik Yorumu.....	51
6.1.4. Kuvvet-Çökme Grafik Yorumu	52
6.1.5. Enerji-Zaman Grafik Yorumu.....	53

İÇİNDEKİLER DEVAM

	<u>Sayfa</u>
6.2. Deneysel Sonuçlar	54
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	70
7.1. Sonuçlar	70
7.2. Öneriler.....	71
KAYNAKLAR DİZİNİ	72

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
3.1. En genel kullanımlı takviye elemanlı kompozitler	13
3.2. Askeri uçaklarda kullanılan kompozit yapılar	15
3.3. Ticari uçaklarda kullanılan kompozit yapılar.....	15
3.4. Uydu bileşenleri olarak kullanılan kompozit yapılar	16
4.1. Çentik darbe deneyinin şematik çalışma prensibi.....	18
4.2. Charpy deneyinde numune ve çekiç konum şeması.....	19
4.3. İzod deneyinde numune ve çekiç konum şeması	20
4.4. Ağırlık düşürme test düzeneği şematik gösterilimi.....	21
4.5. Gaz tabancası deney düzeneği şeması.....	22
4.6. Darbe sonucu kompozit malzemede oluşan hasar çeşitleri	23
4.7. Matris çatlakları	24
4.8. Ters çevrilmiş çam ağacı görünümlü hasar örnekleri	24
4.9. Darbe başlangıç anı	27
4.10. Düşük hızlı darbenin kuvvet-zaman grafiği	27
4.11. İvme-zaman grafiği	28
4.12. Atalet kuvvetleri.....	32
4.13. Elastik bir sistemin dinamik yüklenme durumu.....	33
4.14. F kuvvetinin zamanla değişimi	33
4.15. Çarpışma öncesi ve sonrası elastik sistem davranışı.....	35
4.16. Kirişin dinamik yer değiştirmesi.....	39
4.17. Burkulma	41
5.1. [0/90] _{4s} Epoxy/Cam elyaf takviyeli kompozit deney numunesi.....	45
5.2. Darbe test düzeneği	46
5.3. Grafik hesapları yapılan excel dosyası.....	49
6.1. Kalın ve ince numunelerde batma ve delinme olayı	50
6.2. Kuvvet zaman grafiği.....	51
6.3. Hız zaman grafiği.....	52
6.4. Oluşan iki tip kuvvet- çökme eğrileri.....	53
6.5. İki tip enerji-zaman eğrisi	53
6.6. Enerji diyagramı hesap algoritması.....	54

ŞEKİLLER DİZİNİ (devamı)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
6.7. [0/90] _s kompozit plak için yüksüz durumda oluşan; kuvvet-zaman, hız-zaman, kuvvet çökme, enerji-zaman eğrileri	55
6.8. [0/90] _s kompozit plak için yüksüz durumda oluşan; numune önü, numune arkası hasar durumu	55
6.9. [0/90] _s kompozit plak için çeki-çeki öngerilmeli 2kN'da oluşan; kuvvet-zaman, hız-zaman, kuvvet-çökme, enerji-zaman eğrileri.....	56
6.10. [0/90] _s kompozit plak için çeki-çeki öngerilmeli 2kN'da oluşan; numune önü, numune arkası hasar durumu	56
6.11. [0/90] _s kompozit plak için çeki-çeki öngerilmeli 4kN'da oluşan; kuvvet-zaman, hız-zaman, kuvvet-çökme, enerji-zaman eğrileri.....	57
6.12. [0/90] _s kompozit plak için çeki-çeki öngerilmeli 4kN'da oluşan; numune önü, numune arkası hasar durumu	57
6.13. [0/90] _s kompozit plak için çeki-çeki öngerilmeli 6kN'da oluşan; kuvvet-zaman, hız-zaman, kuvvet-çökme, enerji-zaman eğrileri.....	58
6.14. [0/90] _s kompozit plak için çeki-çeki öngerilmeli 6kN'da oluşan; numune önü, numune arkası hasar durumu	58
6.15. [0/90] _s kompozit plak için bası-bası öngerilmeli 2kN'da oluşan; kuvvet-zaman, hız-zaman, kuvvet-çökme, enerji-zaman eğrileri.....	59
6.16. [0/90] _s kompozit plak için bası-bası öngerilmeli 2kN'da oluşan; numune önü, numune arkası hasar durumu	59
6.17. [0/90] _s kompozit plak için bası-bası öngerilmeli 4kN'da oluşan; kuvvet-zaman, hız-zaman, kuvvet-çökme, enerji-zaman eğrileri	60
6.18. [0/90] _s kompozit plak için bası-bası öngerilmeli 4kN'da oluşan; numune önü, numune arkası hasar durumu	60
6.19. [0/90] _s kompozit plak için bası-bası öngerilmeli 6kN'da oluşan; numune önü, numune arkası hasar durumu	61
6.20. [0/90] _s kompozit plak için bası-bası öngerilmeli 6kN'da oluşan; numune önü, numune arkası hasar durumu	61
6.21. [0/90] _s kompozit plak için çeki-bası öngerilmeli 2kN'da oluşan; kuvvet-zaman, hız-zaman, kuvvet-çökme, enerji-zaman eğrileri	62
6.22. [0/90] _s kompozit plak için çeki-bası öngerilmeli 2kN'da oluşan; numune önü, numune arkası hasar durumu	62

ŞEKİLLER DİZİNİ (devamı)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
6.23. [0/90] _s kompozit plak için çeki-bası öngerilmeli 4kN’da oluşan; kuvvet-zaman, hız-zaman, kuvvet-çökme, enerji-zaman eğrileri.....	63
6.24. [0/90] _s kompozit plak için çeki-bası öngerilmeli 4kN’da oluşan; numune önü, numune arkası hasar durumu	63
6.25. [0/90] _s kompozit plak için çeki-bası öngerilmeli 6kN’da oluşan; kuvvet-zaman, hız-zaman, kuvvet-çökme, enerji-zaman eğrileri	64
6.26. [0/90] _s kompozit plak için çeki-bası öngerilmeli 6kN’da oluşan; numune önü, numune arkası hasar durumu	64
6.27. [0/90] _s kompozit plak için çeki-çeki öngerilmeli ve yüksüz durumda oluşan; kuvvet-zaman,hız-zaman, kuvvet-çökme, enerji-zaman eğrileri	65
6.28. [0/90] _s kompozit plak için bası-bası öngerilmeli ve yüksüz durumda oluşan; kuvvet-zaman,hız-zaman, kuvvet-çökme, enerji-zaman eğrileri	66
6.29. [0/90] _s kompozit plak için çeki-bası öngerilmeli ve yüksüz durumda oluşan; kuvvet-zaman,hız-zaman, kuvvet-çökme, enerji-zaman eğrileri	67
6.30. [0/90] _s kompozit plak için; maksimum kuvvet karşılaştırması	68
6.31. [0/90] _s kompozit plak için; apsorbe edilen enerji miktarları	68
6.32. [0/90] _s kompozit plak için; deformasyon karşılaştırmaları	69

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
3.1. Camı elyaflarının özellikleri	12
5.1. Deney Kodlaması	47
5.2. Numune bağlantı kodlaması	47
5.3. Uygulanan kuvvet kodlaması	47

1. GİRİŞ

Modern teknolojinin malzemeye olan gereksinimi gittikçe artmaktadır. Bu gereksinime yalnız yüksek mukavemetin değil, aynı zamanda düşük bir ağırlığın da istenildiği dinamik yapılarda daha fazla ihtiyaç duyulmaktadır. Yüksek hızla üretim yapan makineler, uçaklar, uzay araçları ve diğer ulaşım araçları için mukavemet/ağırlık oranı yüksek olan yapı malzemelerinin geliştirilmesi büyük önem kazanmaktadır. Kuşkusuz bütün bu özelliklerin aynı malzemede aynı zamanda bulunması mümkün değildir. Bunun için, birbirlerinin zayıf yönlerini düzelterek üstün özellikler elde etmek amacıyla bir araya getirilen birden fazla malzemenin makro yapıda birleşimi ile kompozit malzemeler elde edilir. Kompozitler yüksek mekanik özelliklerinden dolayı günümüzde birçok mühendislik alanlarında kullanılmaktadırlar. Günümüzde yaygın bir kullanım alanına sahip olan bu malzemeler uzay endüstrisinin yanında, gemi, havacılık, inşaat, makine, spor ve diğer dallarda da isteğe göre tasarlanabilmesi yönüyle geniş bir kullanım alanına sahiptir.

Darbe testleri genellikle günlük yaşamda karşılaştığımız çivi çakmak, çekiçle dövmek, otomobil çarpışmaları, araçların küçük tampon darbeleri, hareket halinde araca sıçrayan taş, yoldaki çukura hızla ve aniden düşen bir araba tekerleği ve kompozit bir kanat yapı üzerine bakım esnasında düşürülen bir aletin darbe etkileri gibi gerçek olaylarla bir benzeşim yapılarak oluşturulmaktadır. Özellikle mühendislik uygulamalarında imalat, montaj ve kullanım aşamasında dışarıdan gelebilecek herhangi bir darbeye karşı beklenmedik sonuçlar ortaya çıkabilir. Bunu engellemek için malzemenin bu tip etkiler karşısında davranışının nasıl olacağını bilmesi istenir. Bu sebeple darbe testleri malzemelerin hasar modlarının ve dinamik deformasyonlarının ölçülmesinde kullanılmaktadır. Darbe direnci, darbeye maruz kalan parçalarda tasarımcının göz önüne alması gereken en önemli faktörlerden biridir. Darbe direnci ile malzeme ömrü belirlenirken aynı zamanda malzeme güvenliğinin de belirlenmesi sağlanmaktadır.

Bu çalışmada amaç; gerçekte malzemeler çok yönlü karmaşık yüklerin etkisi altında kaldığından dolayı öngerilme etkisini incelenmiştir. Örneğin; En basitinden havaalanı pistleri kompozit kafesler üzerine inşa edilirler. Pist üzerinde sabit duran uçak bile kompozit kafeste bir öngerilme oluşturur. Oluşan bu öngerilme daha sonraki yüklerde kompozit yapının mukavemetinde düşmelere ve piste çökmelere sebep olacaktır. Kompozit malzemelerde, çarpmanın türüne göre darbeye maruz kalan ve/veya kalmayan bölgede de genellikle gözle görülemeyen veya çok zayıf şekilde görülebilen hasarlar meydana gelebilir. Bu tür hasarlar daha sonra malzemenin dinamik yük etkisi altında çalışma durumunda büyüyerek daha geniş çaplı

hasarlara meydan verebilir. Tabakalı kompozit malzemede, eğer kalınlık boyunca bir takviye söz konusu değil ise, en büyük darbe hasarı enine doğrultuda oluşacaktır. Bunun en önemli nedenlerinden birisi, enine doğrultudaki malzeme elastik özelliğinin düşük olmasıdır. Bu nedenle bir kompozit malzemenin enine hasar direnci nispeten zayıftır. Tabakalar arası gerilmeler (kesme ve normal), tabakalar arası mukavemetin düşük olmasından dolayı ilk kopmalara sebep olan gerilmelerdir. Bu nedenle enine doğrultuda gelebilecek darbeler beklenmedik sonuçlar ortaya çıkabilir. Bunu engellemek için malzemenin bu tip darbeler karşısında davranışının nasıl olacağını bilmesi istenir. Böylece malzemelerin hasar modlarının ve dinamik deformasyonlarının ölçülmesi, malzeme güvenliği, malzemenin darbeye karşı direnci, malzeme ömrü belirlenmiş olacaktır.

Bu çalışmada düşük hızlı darbe etkisi altındaki kompozit plaklarda öngerilme etkisi incelenmiştir. Çalışmada deneyler Dumlupınar üniversitesi mühendislik fakültesi makine mühendisliği bölümü makine imalat ve konstrüksiyon laboratuvarında bulunan TÜBİTAK kariyer projesi kapsamında imalatı yapılmış düşük hızlı darbe test cihazında yapılmıştır. Numune $[0/90]_{2s}$ oryantasyon açılı 8 kat simetrik tabaka olarak hazırlanmış olup ortalama kalınlığı 2mm dir. Boyutları 140x140mm olarak alınmıştır. Numuneler İzmir’ de bulunan İzoreel firması tarafından çalışmanın isteğine göre imal ettirilmiştir. Veriler ağırlık ile vurucu uç arasına yerleştirilmiş bir piezoelektrik sensör yardımıyla bilgisayar ortamına aktarılarak grafiksel sonuçlar oluşturulmuştur.

2. LİTERATÜR

2.1. Darbe ve Darbe Testleri

Literatüre bakıldığında 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 darbelerdir. 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 kabul edilmektedir. [1,2].

Düşük hızlı darbeler, oluşan hasar bakımından matris kırılması, delaminasyon (tabakalar arası ayrılma) oluşumu ve fiber kırılmalarının görüldüğü darbelerdir. Çarpma hızı ve absorbe edilen enerji miktarı düşük düzeylerde (1 ila 10 m/s) oluşmaktadır (bu değerler serbest düşen kütlenin ağırlık ve düşme yüksekliğine göre değişebilir) fakat bu konuda literatürde bu yöntem için kesinleşmiş ölçüler ve değerler bulunmamaktadır [3]. Çalışan elemanlarda çalışma ömrünü azaltan dinamik yükler (özellikle darbe yükü) kompozit yapılarda da ciddi problemlere sebep olmaktadır [4]. Bu alanda yapılan çalışmalara baktığımızda; Dinamik kuvvetlerin statik kuvvetlerden en önemli farklılığı etkidikleri cisim üzerinde, oluşturdukları gerilimlere ve şekil değişimlerine statik kuvvetler gibi kademeli olarak artarak değil, kendi koşullarının oluşturduğu karakterde bir etki göstermesidir. Bu nedenle dinamik gerilim ve şekil değişimi hesaplarında da başka prensipler uygulanır [4]. Birçok araştırmacı kompozit malzemelerin darbe hasarını değerlendirmek için deneysel ve nümerik yaklaşımlar kullanmışlardır [5–10].

Düşük hızlı darbeye en basit örnek olarak kompozit malzeme üzerine imalat veya bakım esnasında kaza sonucu bir parçanın düşmesi verilebilir. Düşük hızlı darbeler normal olarak çarpışma temas anında malzeme içyapısında deformasyon oluşturan darbelerdir. Bazen düşük hızlı darbe, düşük enerjili darbe olarak da kullanılır. Düşük hızlı darbede, malzemenin içyapısında darbeye karşı cevap verebilmek için gerekli olan temas süresi yeterlidir ve sonuç olarak daha fazla enerji elastik olarak absorbe edilir. Bu nedenle hedefin dinamik yapısal cevabı çok büyük bir öneme sahiptir. Yüksek hızlı darbe tepkisi 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.

Özellikle hava taşıtlarında kullanılan kompozit malzemeler üzerindeki araştırmalar bu malzemelerin eksene dik doğrultulardaki darbe yüklerine (imalat, bakım ve onarım esnasındaki küçük çaplı çarpma, alet düşürme vb.) karşı çok hassas olduklarını ortaya koymuştur. Bunun

sebebi enine doğrultuda takviye elemanı olmayan tabakalı kompozitlerde (plak vb yapılarda), malzemenin elastik özelliğinin enine doğrultuda düşük olmasıdır. Düşük hızlı darbeler genel olarak tabakalar arası ayrılma (delaminasyon), elemanlarda oluşan artık gerilmeler ve malzeme performansının düşmesi gibi belirli konularla ilgilidir [11–13; 13–18].

Tabakalı kompozit yapılar üzerinde de düşük hızlı darbe testleri yapılmıştır. E-cam/epoxy kompozit tabakalar (0/90/0/90/0)_s olarak istiflenerek üretimi gerçekleştirilip mekanik özellikleri öncelikle çıkarılmıştır. Arslan ve diğerleri [19] 3DIMPACT programı kullanarak nümerik simülasyon sonucu malzemede oluşan gerilmeleri ve darbe yüklerini zamana bağlı olarak hesaplamışlardır.

2.2. Yapılan Çalışmalar

Çalışmaların büyük çoğunluğu kompozitlerin darbe yükü etkilerinin incelenmesi şeklinde özetlenebilir. Kompozit yapılarda düşük hızlı darbe üzerine yapılan çalışmaların hemen hemen hepsi deneyseldir ve genel olarak gerilmesiz veya tek yönlü gerilme uygulanarak yapılmış çalışmalardır. Gerçekte malzemeler çok yönlü kompleks yüklerin etkisi altında kaldığından dolayı bu tür çalışmalar tam olarak yeterli değildirler. En basitinden havaalanı pistleri kompozit kafesler üzerine inşa edilirler. Pist üzerinde sabit duran uçak bile kompozit kafeste bir öngerilme oluşturur. Oluşan bu öngerilme daha sonraki yüklerde kompozit yapının mukavemetinde düşmelere ve piste çökmelere sebep olacaktır. Bu açıdan düşünülürse gerilmesiz ve tek yönde gerilmeli malzemeler üzerine yapılan çalışmaların ne denli yetersiz kaldığı görülmüş olacaktır [11–13]. Çalışmaların az da olsa bir kısmı tek yönde ön yüklemeli olarak yapılmıştır [20–25].

Ön yüklemeli çalışmalara bakılacak olursa, cam takviyeli plastik (GRP) kompozit tabakaların hasar toleransı [26] göz önüne alınarak ± 2000 , ± 4000 ve $\pm 6000 \mu\epsilon$ 'a eşdeğer tek ve çift yönlü öngerilme altında darbe yükü uygulanmıştır. Kuvvet-zaman grafiğinde absorbe edilen enerji ve hasar boyutu değişik öngerilme durumları için bulunmuştur. Numune üzerinde öngerilmelinin en önemli etkileri sadece yüksek öngerilmelinin ($6000 \mu\epsilon$) olduğu durumda tespit edilmiştir. Aynı zamanda kayma yükü işlem esnasında en büyük hasar durumunda bulunmuştur

Sun ve Chattopadhyay [27] öngerilmeli anizotropik plaklar üzerine darbe etkilerini analitik olarak incelemişlerdir. Bu çalışmada dikdörtgen şeklinde simetrik cross-play kompozit plak kullanılmıştır. Plaka iki ekseninde uniform şekilde çekme etkisi altında öngerilme uygulanmıştır. Darbe yükü ve dinamik tepkiler lineer olmayan integrasyon denkleminin çözümü ile bulunmuştur. Çalışmada tespit edilen diğer bir özellik, toplam etki eden kuvvet değerleri

azalırken ilk gerilme değerinin artmasıdır. Bu durum ilk gerilme değerinin plakta sertleşme etkisine sebep olduğunu göstermektedir. Eğer plak öngerilme etkisi altında ise düşük enerji absorbe edilmektedir. Plak tarafından absorbe edilen enerji miktarı plak boyutu ile ilgilidir.

Sun ve Chen [28] çekme/çekme, bası/bası ve yüksüz plak durumlarını sonlu elemanlar yöntemi ile çalışmışlardır. Tabakaların random bir şekilde modellenmesi ile oluşturulan plak üzerine çekmede 3 x kritik burkulma yükü, basmada ise 0.75 x kritik burkulma yükü uygulanmıştır. Bu çalışma önemli bulguları göstermenin yanı sıra ileride yapılacak olan teorik ve deneysel çalışmalara, kompozit plaklarda öngerilmenin oluşan hasarlara etkisi açısından ışık tutmaktadır.

T. Mitrevski ve diğerleri [29] polyester malzemenin çift eksenli yük altında vurucu ucun şekline bağlı olarak düşük hızlı darbe sonuçlarında incelemelerde bulunmuşlardır 12mm çapında olan dairesel, küresel, oval ve konik şeklindeki vurucu uçların 4J ve 6J enerjilerindeki ve 500 ve 1000 microstrain gerilimi numunelere uygulayarak darbe sonuçlarını araştırmışlardır. Çift eksenli geriliminin sertleştirme etkisi sebebiyle, temas yüzeyinde sapmalar ön yüklemenin artırılıp azaltılmasıyla elde edilen sonuçlar incelenmiştir. Bulunan bu sonuçlara bağlı kalınarak malzeme üzerinde ön yüklemenin absorbe edilen enerji ve zarar alanını önemli derecede etki ettiği anlaşılmıştır. 4J de konik biçimindeki vurucu ucun ön yüklemeye bağlı olarak girinti büyüklüğünün değiştiği gözlenmiştir .

B. Whittingham ve diğerleri [30] öngerilmenin tabaklı carbon-fibre/epoxy plakaların üzerindeki etkisi ve düşük hızlı darbeye karşı cevabı incelenmişlerdir. Etki testi tek ve çift eksenli gerilim ile iki etki enerjisinde, makaslamasız ve öngerilmesiz durumda gerçekleştirildi. Öngerilmenin kalıcı çentik derinliği üzerindeki etkisi, absorbe edilen enerji ve yük etki pikleri tecrübe ederek ölçülmüşlerdir. Sonuçlarda gösterilmiştir ki penetrasyon/delme derinliği, yük piki ve absorbe edilen enerji, Öngerilmenin doğal ve büyüklüğünün düşük seviyedeki etki enerjisinde (6J) aslında bağımsızdır, yüksek seviyedeki etki enerjilerde (10J) öngerilmenin etkisi daha fazla olduğu gözlenmiştir.

Kelkar et al.[31] tek eksenli yüzey geriliminde oluşan darbe zararının daha erken belirti gösterildiği anlaşılmıştır. Daha yüksek gerilim kuvveti ve daha yüksek darbe enerjisi sonucunda etkinin süresinin daha azaldığı anlaşılmıştır. [32] Herszberg, ve Herszberg et al.[33]. Karbon epoxy malzemeye gerilme ve sıkıştırmalar oluşturularak düşük hızlı darbe testi uygulamışlardır. Uygulanan 35kN gerilim altında yüksek bozulma görülmüştür. Bu gerilim altında ön yüklemenin artırıldığında hızda azalma görülmüştür. Bozulma biçiminin ön yükleme ile değiştirildiği anlaşılmıştır.

Tüm kompozit yapılar, darbe etkisi altında birtakım öngerilme etkisi altında kalmakta, bu durum malzemenin kalıcı hasar mekanizmasında göz ardı edilemeyecek değişikliklere sebep olmaktadır [11–13; 20–28].

Belingardi [34] darbe esnasında hasar oluştuğunda hasarlı malzemenin mekanik özelliklerinde belirli seviyede bir düşüş olduğunu kabul etmişlerdir. Fakat yaptıkları deneyler sonucunda ise bu hasarın belirli seviyede kalmadığı ve ilk başlangıçtan sonra hasarın devam ettiğini tespit etmişlerdir.

Jih ve Sun [35] tabakalı kompozitlerin düşük hızlı darbe yükü altında delaminasyonunu deneysel olarak tespit etmek için çalışma yapmışlardır. Ağırlık düşürme darbe testleri sonucunda düşük hızlı darbenin delaminasyona sebep olduğunu statik tabakalar arası kırılma tokluk değerlerini kullanarak bulmuşlardır.

Guan Z ve Yang C. [36] tabakalı kompozitlerin hasar simülasyonu üzerine çalışma yapmışlardır. Hasarlı malzemenin mekanik özelliklerini değiştirmek için sürekli hasar mekanizması yöntemi uygulamışlardır. Simülasyon hesaplamalarında değişken malzeme katsayıları hasar durumuna göre elemanlara uygulanmıştır. Simülasyonlarını, matriks kırılması, delaminasyon ve fiber kırılmaları üzerine uygulamışlardır.

Caprino G. [37] 2024T3 alüminyum tabaka ve S2-glass/epoxy den oluşmuş fibreglas-alüminyum tabakalı kompozitlerin mekanik özellikleri üzerine deneysel çalışma yapmışlardır. Test için çarpıcı uç kütlesi sabit tutulup düşme yüksekliği 1,7–5,7 m/sn aralığında çarpma hızı verecek şekilde alınmıştır. Ayrıca test durumunu elektronik ortamda uygulayabilmek için basit modelleme yapılmış ikinci mertebe polinomları sonuçlar için kullanılmıştır. Sonuçta; darbeden sonra oluşan şekil değişimi, darbe enerjisine bağlı olarak ve alüminyumun plastik deformasyonu içerisinde lineer olarak oluşmuştur. Oluşturulan model ile yeterli doğrulukta kuvvet-şekil değişimi, kuvvet-zaman, temas süresi ve enerji dağılımı gibi ana darbe parametreleri elde edilip grafik olarak göstermiştir.

Kompozit malzemeler ve/veya yapılar çalışma esnasında değişik yüklemelere maruz kalırlar. Bu yüklemelerden en kritiği yapının tabakalı olmasından dolayı darbe yükleridir. Luo'ya göre [38] kompozit yapılarda darbeden dolayı oluşan hasar, tasarım ve uygulamada göz önüne alınması gereken en önemli etkidir. Darbe olayı, darbe hızına göre düşük hızlı ve yüksek hızlı darbe olarak sınıflandırılır. Buna bağlı olarak Hu [39] düşük hızlı darbeler ile kompozit tabakanın kalınlığı boyunca oluşan tabakalar arası yırtılmaları incelemiştir. Bu incelemelerde, iç tabakalar da oluşan hataların tabakaların mukavemetini ve dayanıklılığını

düşürdüğünü göstermiştir. Böylece hasar mekanizmasının nasıl çalıştığının önceden tahmin edilmesi ile malzeme performansının artışı sağlanmıştır.

Belingardi ve Vadori [40] karbon fiber-epoxy matris tabakalı kompozitlerin düşük hızlı darbe etkisi altında deneysel kütle düşürme testi çalışmışlardır. Çalışmalarında farklı istifleme şekillerinde kompozit tabakalar göz önüne alınmıştır. Tabakalı plak üç ayrı kalınlıkta statik ve dinamik yük için deney yapmışlardır. Deney sonuçlarında oluşturulan yer değiştirme-kuvvet eğrileri, ilk hasar kuvvetinin ve maksimum kuvvetin anlaşılmasına olanak sağlar. Bunun yanında enerji değerlerinin incelenmesi tasarımcılar için ilginç parametrelerin bilinmesini sağlamaktadır, bunlar doymuş darbe enerjisi ve hasar derecesidir.

3. KOMPOZİT MALZEMELER

3.1. Kompozit Malzemelerin Tanıtımı

En geniş anlamda, bir kompozit malzeme iki veya daha fazla bileşenden meydana gelen malzemedir. Bu bileşenler makroskobik seviyede bir araya getirilirler ve birbirleri içinde çözünmezler. Takviye eleman olarak adlandırılan bileşen; fiber, partikül veya ince levha şeklinde olabilir. Diğer bileşen ise matris fazıdır. Bu malzemelerin bir araya getirilmesi, bir takım çalışma karakteristiklerinin bu bileşenler tek olarak değerlendirildiği durumdakinden daha iyi olmasına müsaade eder. Kompozit malzeme üretilmesiyle aşağıda verilen bazı özellikler sağlanabilmektedir [41].

- 1) Yüksek dayanım
- 2) Yüksek rijitlik
- 3) Yüksek yorulma dayanımı
- 4) Mükemmel aşınma direnci
- 5) Yüksek sıcaklık kapasitesi
- 6) İyi korozyon direnci
- 7) İyi termal ve ısı iletkenliği
- 8) Düşük ağırlık
- 9) Çekicilik ve estetik görünüm vb.

Yukarıda belirtilen bu özellikler için gerekli şartlar, uygun matris ve takviye eleman çifti, üretim tekniği, bileşenlerin mukavemet özellikleri ve diğer faktörler göz önüne alınarak üretim yapılırsa istenilen özelliği elde etmek mümkündür. Kompozit malzemeler, mukavemet, rijitlik ve hafiflikleri nedeniyle metallerin yerini almaktadır. Bugün, uçaklar, uzay araçları, denizaltı araçları ve malzeme özellikleri kritik olan birçok makine elemanı kompozit malzemelerden üretilmektedir.

Kompozit malzemelerin kullanılmasındaki bir diğer önemli noktada ekonomikliktir. Kimya endüstrisinde çeşitli reaktif veya çözeltilerin depolanmasında, taşınmasında çözeltilere karşı inert davranan, reaksiyon vermeyen malzemelerin seçilmesi gerekir. Bu iş için en uygun malzemeler paslanmaz çelikler ve plastiklerdir. Tamamen plastik bir malzeme mukavemetsiz, tamamen paslanmaz çelikten yapı ise çok pahalıdır. Paslanmaz

çeliğe göre çok daha ucuz olan düşük karbonlu çeliğin kimyasal maddeyle temas yüzeyinin plastik malzeme ile kaplanması hem yüksek mukavemetli hem de ucuz bir çözüm olacaktır.

Zırhlı araçlar gibi bazı uygulamalarda, malzemenin yüksek bir sertliği yanı sıra yüksek tokluk özelliğine de sahip olması ve darbe enerjilerini absorbe etmesi istenebilir. Klasik mühendislik malzemelerinde bu özelliklerin birlikte kazanılması oldukça zordur. Yüksek sertlikteki malzemelerle, yumuşak, sünek malzemelerin kompozit şeklinde tasarımlar bu tür uygulamalar için de bir çözüm yolu olabilir. Yüksek sertlik ve mukavemetteki çelik saçlarla yumuşak, sünek özelliğe sahip saçlar kaynakla birleştirildiğinde, dıştaki sert tabaka zırhın delinmesini önlerken, içerideki yumuşak tabaka deforme olarak darbe enerjisini absorbe eder. Buna benzer bir örnek emniyet camlarıdır.

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

3.2. Matris Malzemeleri

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

Kompozit yapılarda yükü taşıyan elyafların fonksiyonlarını yerine getirmeleri açısından matrisin mekanik özelliklerinin rolü çok büyüktür. Matris malzemesi olmadan bir elyaf demeti yükü bir veya birkaç elyaf taşıyacaktı fakat matris malzemesi elyaflara eşit yük dağılımını sağlamaktadır. Elyaf yönlenmelerine dik doğrultuda, matrisin mekanik özellikleri ve elyaf ile matris arasındaki bağ kuvvetleri, kompozit yapının mukavemetini belirleyici önemli hususlardır. Matris elyafa göre zayıf ve daha esnektir. Bu özellik kompozit yapıların tasarımında dikkat edilmesi gereken bir husustur.

3.2.1. Plastik Matrisler

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

3.2.2. Termoset Matrisler

Termosetler en çok kullanılan matris malzemeleridir. Termoset plastikler sıvı halde bulunurlar, ısıtılarak ve kimyasal tepkimelerle sertleşir ve sağlamlaşırlar. Termosetler termoplastiklerden farklı olarak geri dönüşü olmayan matris malzemeleridir. Yüksek sıcaklıklarda dahi yumuşamazlar. Çoğu termoset matris sertleşmemeleri için dondurulmuş olarak depolanmak zorundadır. Polyester, epoksi reçine, fenolik reçine ve silikon gibi termoset polimerler, elyaf takviyeli kompozit malzemelerde yaygın olarak kullanılan matris malzemelerdir.

3.2.3. Epoxy Reçine Matriks Malzemesi

Epoxy Reçine, gelişmiş kompozitlerde genellikle tercih edilen ve her tür elyaf ile kullanılabilen bir reçinedir. Epoksi reçine, epoksit grubunun polimerizasyonu ile elde edilir. Farklı formüller kullanılarak özelliklerini büyük ölçüde değiştirmek mümkündür. Epoxy reçinenin genel başlangıç malzemesi Bis-fenol A Diglisidil Eter' dir. Diğer malzemeler başlangıç çözeltilisine karıştırılabilir. Reçinenin homojen olarak sertleşmemesi, özellikle gerilmeli korozyon olayında reçinenin çok farklı tepkiler vermesine sebep olur.

Epoxy reçineler, reçine türüne ve son kullanım yerine göre sıvı veya katı olarak temin edilebilir. Bu reçineler çeşitli ajanlar varlığında, oda sıcaklığında veya yüksek sıcaklıkta kür edilerek termoset son ürün haline dönüştürülür. Epoxy reçineler termoset formunda mükemmel mekanik dayanıklılığa, yüksek dielektrik direncine, iyi boyutsal kararlılığa, kimyasal ve ısı dirence sahiptirler. Sertleşme sırasında kendini çekme sorunu yoktur. Birçok elyaf ile iyi bağ oluşturur ve ayrıca kimyasal dayanımları da yüksektir. Bu özelliklerin yanı sıra sahip olabilecekleri formülasyonların çeşitliliği ve çok yönlü işlenebilirlik özellikleri nedeniyle Epoxy termosetler, birçok uygulama alanı bulmuştur. Çok değişik Epoxyler geliştirilmiştir. Uygun bir seçim yapmak çok önemlidir. Kullanılan sertleştiricinin türü, ortaya çıkan kompozit malzemenin özelliklerini büyük ölçüde etkiler. Sertleşme süresi 1 saat dolayında olup, 127 °C ve 177 °C sıcaklıklarda ve genellikle basınç altında gerçekleştirilir. Ayrıca Epoxylerin 250 °C' ye kadar ısı kararlı türleri de geliştirilmiştir [4]. Sertleşme sırasında kendini çekme sorunu yoktur.

Dayanımları yüksektir, birçok elyaf ile iyi bir bağ oluşturur ve ayrıca kimyasal dayanımları da yüksektir.

3.3. Takviye Malzemeleri

Kompozit malzemelerdeki elyafların en önemli fonksiyonu yükü taşımaktır. Elyaflar, kompozit malzemeye dayanım sağlarken rijitlik te sağlar. Kompozit malzemedeki sürekli elyaflara filaman, metalik filamanlara ise tel adı verilir. Eğer elyafların şekli dikdörtgen prizması şeklinde ise yani kesit alanı dikdörtgense ve dikdörtgen kenarlarından biri diğerinin 4 katından fazla olursa bu tür elyaflara şerit adı verilir.

Elyaf takviyeler, kompozit yapının temel mukavemet elemanlarıdır. Düşük yoğunluklarının yanı sıra yüksek elastik modüle ve sertliğe sahip olan elyaflar kimyasal korozyona da dirençlidirler. Günümüzde kompozitlerin donatılmasında boyutsal ve şekilsel özellikleri çok farklı lifler (elyaflar) kullanılmaktadır.

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

3.3.1. Cam Elyaf Takviyeli Malzemeler

Cam elyaflar, kompozitlerde takviye malzemesi olarak en çok kullanılan ve en ucuz olanıdır. Cam elyafların genellikle dayanım/ağırlık oranı yüksektir. Alüminyum alaşımlara göre elastik modülü büyük olurken, grafit ve aramid elyaflara göre daha düşüktür. Cam elyafların içyapıları amorf değildir. Cam elyafla kuvvetlendirilmiş plastiklerin rijitlik/yoğunluk oranları, metallerin rijitlik/yoğunluk oranına göre daha düşüktür. Cam elyaflar çok yüksek kimyasal dirence sahiptirler. Su absorbe etmezler. Fakat çekme dayanımları nemli ortamda azalır. Cam elyafların sürünmeye karşı direnci ve rijitliği sıcaklık arttıkça azalır. Bununla birlikte faydalı kullanım sıcaklık aralığı oldukça büyüktür. Cam 500°C'ye kadar yumuşamaz.

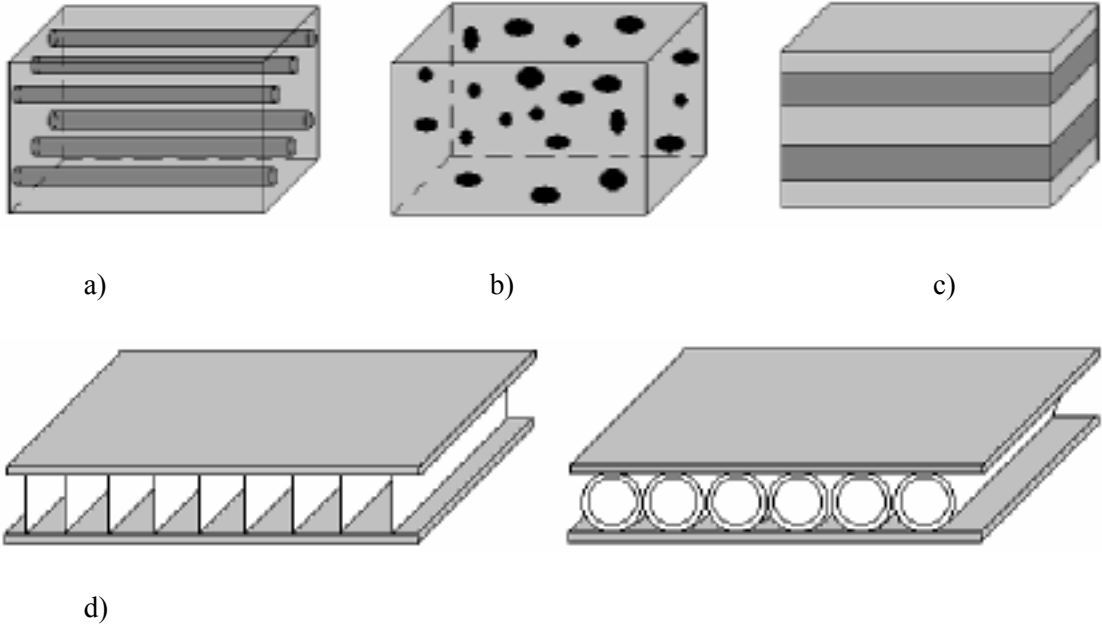
Kimyasal bileşimlerine göre cam elyaflar, E, C, D ve S camı olarak adlandırılırlar. Bunlardan S camı, yüksek dayanımlı olduğu için önceleri askeri sahalarda kullanılmıştır. Elastisite modülü E camına göre % 20 daha büyüktür ve 1/3 daha dayanıklıdır. Çizelge 3.1'de E camı ile S ve D cam elyaflarının özellikleri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

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

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

3.4. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozit malzemeleri değişik şekilde sınıflandırmak mümkündür. Matris malzemesinin türüne göre metalik kompozitler, polimerik kompozitler, seramik kompozitler vb. gibi gruplandırma yapılabildiği gibi yapı bileşenlerinin şekillerine göre de sınıflandırma şu şekilde yapılabilir; fiber kompozitler, partikül kompozitler, pul kompozitler, dolgu kompozitler, ve tabakalı kompozitler şekil 3.1.



Şekil 3.1. En genel kullanımlı takviye elemanlı kompozitler; a) fiber takviyeli, b) partikül takviyeli, c) tabakalı kompozitler, d) dolgu kompozitler

3.4.1. Fiber Takviyeli Kompozitler

Mühendislikte kullanılan malzemelerin pek çoğu fiber şeklinde üretildiklerinde mukavemet ve rijitlikleri kütle hallerindeki değerlerinden çok üstünde olabilmektedir. Birçok özelliklerde artış sağlayan, yüksek etkinliği olan liflerin ilavesiyle elde edilir. Karbon fiberlerin çekme mukavemeti kütle halindeki grafitten 50 kat, rijitliği 3 kat daha yüksektir.

3.4.2. Partikül Takviyeli Kompozitler

Rijitlik ve mukavemete artışı sağlayan küçük granül dolgu maddesi ilavesiyle şekillendirilerek üretilir. Bir veya iki boyutlu makroskobik partiküllerin veya sıfır boyutlu olarak kabul edilen çok küçük mikroskobik partiküllerin matris fazı ile oluşturdukları malzemelerdir. Makroskobik veya mikroskobik boyutlu partiküller kompozit malzeme özelliklerini farklı şekilde etkilerler. Partikül kompozitler; dispersiyonla sertleştirilmiş kompozit malzemeler ve büyük ölçekli partikül kompozit malzemeler olarak iki gruba ayrılabilir.

3.4.3. Pul Kompozitler

Yüksek yük taşıma kabiliyeti olan büyük uzunluk/çap oranında dolgu maddesi ilave edilerek üretilir. Matris içinde yer alan pulların konsantrasyonu düşük olabileceği gibi birbiri ile

temas etmelerini sağlayacak derecede yüksek değerlerde olabilir. Düzlemsel yapıya sahip pullarla sıkı bir paketlenme elde edilebilir. Pul esaslı sistemin maliyeti biraz daha fazla, ancak mukavemet özellikleri iyidir.

3.4.4. Dolgu Kompozitleri

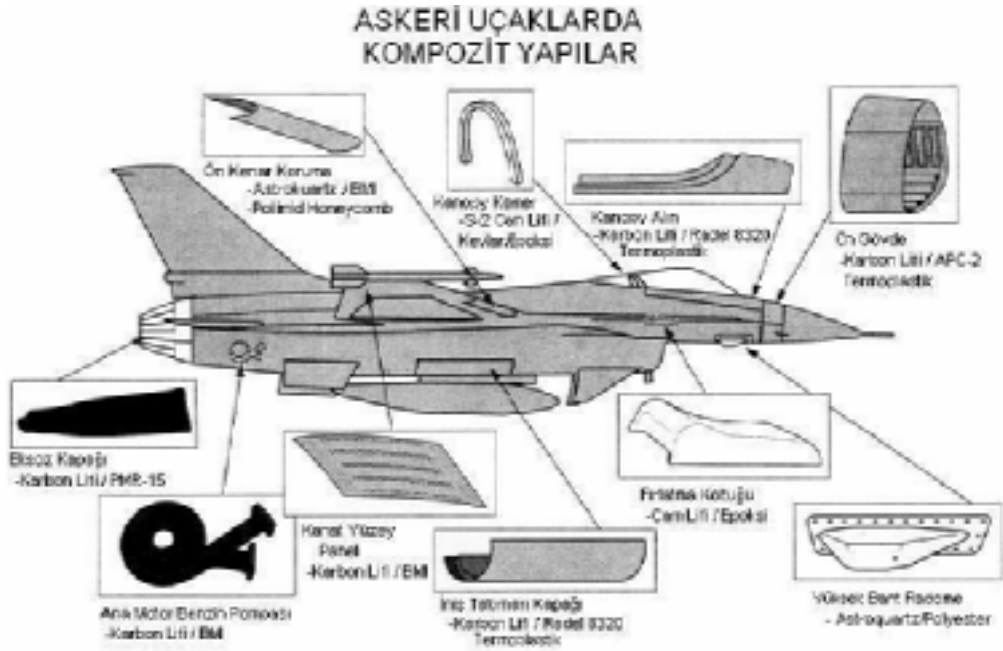
Üç boyutlu sürekli bir matris malzemesinin yine üç boyutlu dolgu maddesi ile doldurulması veya emprenye edilmesi ile oluşan malzemelerdir. Düzgün petekler, hücreler veya süngere benzeyen gözenekli yapılar arasında metalik, organik veya seramik esaslı dolgu maddeleri yer alabilir. Optimum özelliklere sahip olabilmesi için birbiri içinde çözünmeyen, kimyasal reaksiyon vermeyen bileşenlerin seçilmesi gerekir. Bu tür kompozitler sandviç kompozitleri olarak da bilinir.

3.4.5. Tabakalı Kompozitler

Tabakalı kompozitler bilinen en eski kompozit malzeme şeklidir. En az iki değişik levha malzemenin tabakalar halinde dizilerek oluşturduğu malzemelere tabakalı kompozit malzemeler denir. Farklı özelliklere sahip en az iki tabakanın kombinasyonundan oluşur. Korozyon direnci zayıf metaller üzerine, daha yüksek dirençli metallerin veya plastiklerin kaplanmasıyla korozyon özelliğinin, yumuşak metallerin sert malzemelerle birleştirilmesiyle sertlik ve aşınma direncinin, farklı fiber yönlenmesine sahip tek tabakaların birleştirilmesiyle çok yönlü yük taşıma özelliğinin geliştirilmesi mümkün olmaktadır.

3.5 Kompozit Malzemelerin Kullanım Yerleri

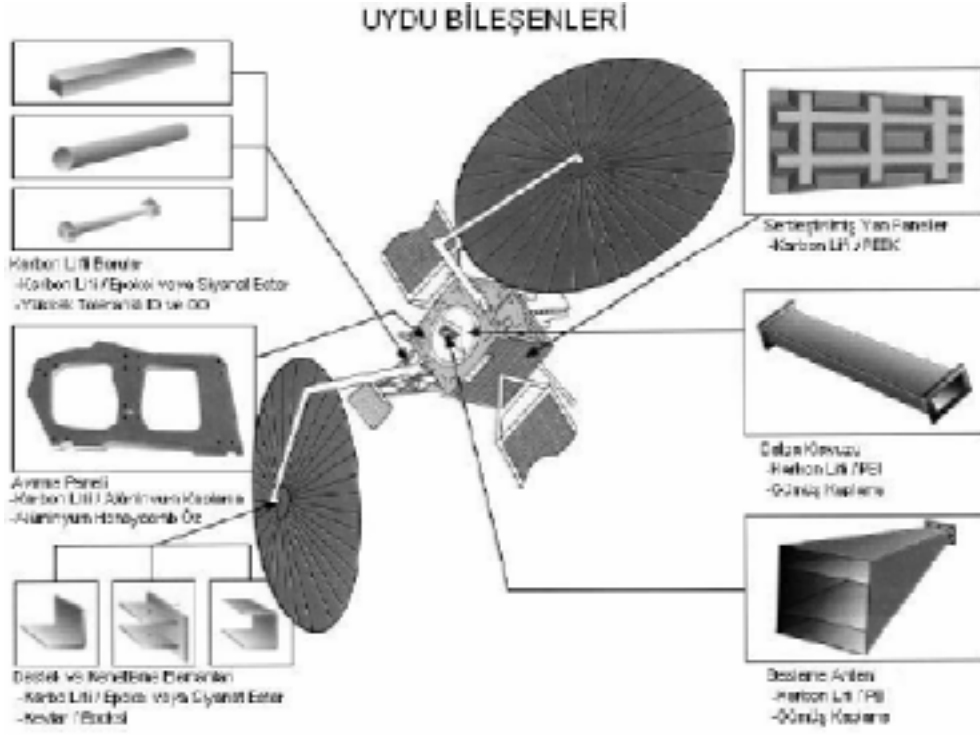
Ağırlık kazancının çok önemli olduğu yerlerde, mekanik özelliklerin yüksek olduğu yerlerde v.b. gibi bir çok yerde kompozitler kullanılmaktadır. Kullanımyerlerine örnek olarak uydu bileşenlerinde, askeri uçaklarda, ticari uçaklarda, helikopter pervanelerinde, otomobil dreksiyonlarında, inşaat, makina, v.b gibi verilebilir. Şekil 3.2, Sekil 3.3. ve Şekil 3.4.' de, ağırlık kazancının çok önemli olduğu bazı uygulama alanları görülmektedir.



Şekil 3.2. Askeri uçaklarda kullanılan kompozit yapılar [42].



Şekil 3.3. Ticari uçaklarda kullanılan kompozit yapılar [42].



Şekil 3.4. Uydu bileşenleri olarak kullanılan kompozit yapılar [42].

4. DARBE TEST YÖNTEMLERİ

Darbe testleri genel olarak iki şekilde yapılır; bunlar, çentik darbe ve ağırlık düşürme testleridir. Çentik darbe testleri Charpy ve İzod darbe testleri, ağırlık düşürme testleride düşük hızlı ve yüksek hızlı darbe testleri olarak yapılmaktadır.

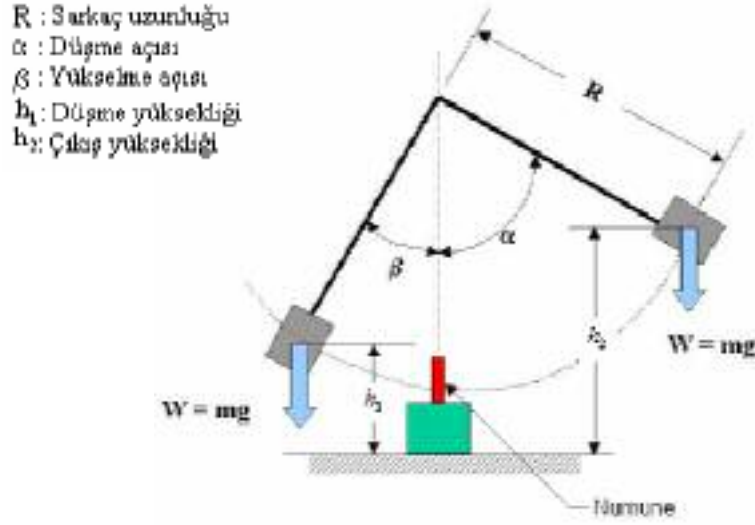
4.1. Çentik Darbe Testleri

Çentik darbe deneyinde amaç, malzemenin bünyesinde muhtemel bulunacak bir gerilim konsantrasyonunun (gerilim birikiminin) darbe esnasında çentik tabanında suni olarak teşkil ettirilip, malzemenin bu durumda dinamik zorlamalara karşı göstereceği direnci tayin etmektir. Bazı durumlarda örneğin, gri dökme demir numunelerinde, malzemenin bünyesindeki grafit levhacıklar çentik gibi etki yapacaklarından, ayrıca çentik açmağa lüzum yoktur.

Çentikli bir numune zorlandığı zaman, çentiğin tabanına dik bir gerilim meydana gelir. Kırılmanın başlaması, bu gerilimin etkisi ile olur. Numunenin kırılabilmesi için bu dik (normal) gerilimin, kristalleri bir arada tutan veya kristallerin kaymasına karşı koyan kohezif dayanımdan fazla olması gerekir. Numune, plastik biçim değiştirmeye fırsat bulamadan bu hal meydana gelirse, buna gevrek kırılma denir. Burada kırılan yüzey, düz bir ayrılma yüzeyidir.

Deney esnasında, numune kırılmadan önce çoğu zaman plastik biçim değiştirme meydana gelir. Uygulanan kuvvet etkisi ile normal (dik) gerilime ilaveten, bununla yaklaşık olarak 45° farklı bir kayma gerilimi etki etmeye başlar. Kayma gerilimi, kayma dayanımını (kritik kayma gerilimi) aştığı an, elastik (esnek) özellik sona erer ve plastik biçim değiştirme başlar. Bu durumda önce plastik biçim değiştirme, daha sonra kırılma meydana gelir. Buna sünek kırılma hali denir ve kırılma yüzeyi girintili çıkıntılı bir görünüştür.

Darbe deneyinde, numunenin dinamik bir zorlama altında kırılması için gereken enerji miktarı tayin edilir. Bulunan değer, malzemenin darbe direnci (darbe mukavemeti) olarak tanımlanır. Bu deneylerde, Şekil 4.1'de şematik olarak gösterilen sarkaç tipi cihazlardan faydalanılır.



Şekil 4.1. Çentik darbe deneyinin şematik çalışma prensibi

Ağırlığı G olan sarkaç, h yüksekliğine çıkarıldığında potansiyel enerjisi ($G \times h$) mertebesindedir. Sarkaç bu yükseklikten serbest bırakıldığında, düşey bir düzlem içinde hareket ederek numuneyi kırar ve aksi istikamette h_1 yüksekliğine kadar çıkar. Böylece, numunenin kırılmasından sonra sarkaçta kalan potansiyel enerji ($G \times h_1$) mertebesinde demektir.

Sarkacın, numune ile temas haline geldiği andaki potansiyel enerji ile numune kırıldıktan sonra sarkaçta kalan potansiyel enerji farkı, o numunenin kırılması için gereken enerjiyi başka bir deyimle, darbe direncini verir. Bu enerji aşağıdaki formülle de gösterilebilir:

$$\text{Kırılma enerjisi} = G (h - h_1) = G.R. (\cos\beta - \cos\alpha) \quad (4.1)$$

G = Sarkacın ağırlığı (kg)

R = Sarkacın ağırlık merkezinin, sarkacın salınım merkezine uzaklığı (m),

h = Sarkacın ağırlık merkezinin düşme yüksekliği (m),

h_1 = Sarkacın ağırlık merkezinin çıkış yüksekliği (m),

α = Düşme açısı (derece),

β = Yükseliş açısı (derece),

Darbe direnci (kg-m) veya (kg-m/cm^2) cinsinden ifade edilmektedir.

Bu deney tamamen ampirik olduğu ve şartlar değiştikçe malzeme farklı özellik gösterdiği için numunelerin cihaza uygun bir şekilde yerleştirilmesi, doğru sonuç alma yönünden önemlidir.

Deney esnasında önce sarkaç, daha önce tespit edilen potansiyel enerjiye sahip olabileceği bir yüksekliğe çıkarılır. Daha sonra numune, uygun bir şekilde yerleştirilir. Örneğin, en çok uygulanan Charpy deneyinde numune, mesnetlere tam yaslanacak şekilde ve çekicinin salınım düzlemi ile çentigin simetri düzlemi 0,5 mm içinde birbirine çakışacak şekilde yerleştirilir. Bu durum cihaza bağlı, yardımcı bir aletle sağlanabilir. Numune uygun şekilde yerleştirildikten sonra, okumaların yapıldığı kadranın göstergesi başlangıç durumuna getirilir ve sarkaç düzgün bir şekilde serbest bırakılır. Sonuç, deneyden sonra kadrandan okunur.

4.1.1. Charpy Darbe Testi

Charpy darbe deneyi, yatay ve basit kiriş halinde iki mesnete yaslanan numunenin çentik tabanına, bir sarkacın ucundaki çekiçle darbe yapılması ve çentik tabanında meydana gelen çok eksenli gerilmeler etkisi ile numunenin kırılması için harcanan enerjiyi tespit etme işlemidir, şekil 4.2.



şekil 4.2. Charpy deneyinde numune ve çekiç konum şeması

4.1.2. İzod Darbe Testi

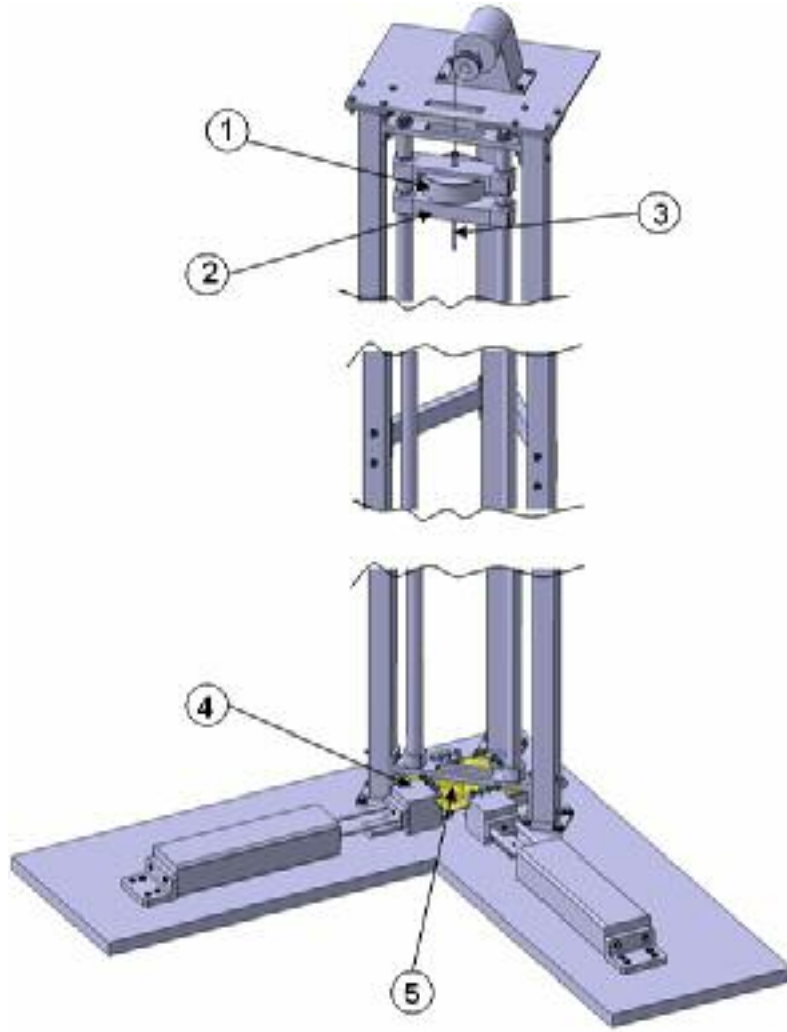
İzot darbe testi, dikey ve konsol kiriş halinde bir kavrama çenesine tespit edilen numunenin yüzeyine, kavrama çenesinden belirli yükseklikte, bir sarkacın ucundaki çekiçle darbe yapılması ve çentik tabanında meydana gelen çok eksenli gerilimler etkisi ile numunenin kırılması için sarf edilen enerjiyi tayin işlemidir, şekil 4.3.



Şekil 4.3. İzod deneyinde numune ve çekiç konum şeması

4.2. Ağırlık Düşürme testleri

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 edilmediğini göstermektedir. Standart olarak bulunan darbe cihazları olduğu gibi özel amaçlı tasarlanmış darbe cihazları da olabilir. Şekil 4.4 de Ağırlık düşürme test düzeneği şematik gösterilimi verilmiştir.

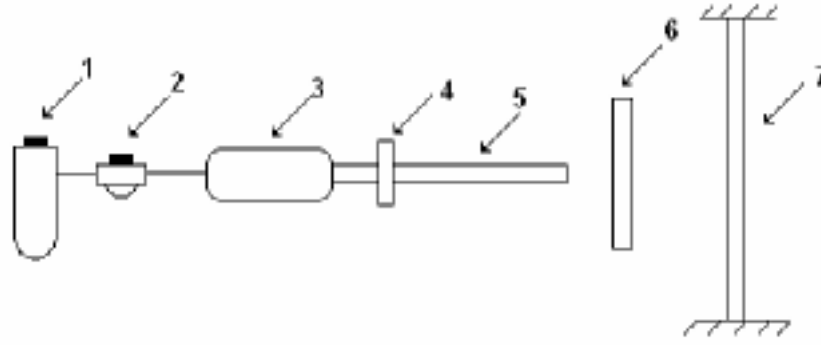


Şekil 4.4. Ağırlık düşürme test düzeneği şematik gösterilimi

- 1) Elektro mıknatıs, 2) vurucu uç ağırlığı, 3) vurucu uç, 4) Çene (4 adet) numune tutucu, 5) numune

4.2.1. Yüksek Hızlı Darbe

Yüksek hızlı darbelerde yukarıda belirtilen 10m/s nin üzerindeki hızlar için sınıflandırılabilir. Genellikle balistik deneylerde mermi kullanılarak deneyler yapılmaktadır. Özellikle askeri alanda bu çalışmalar yapılmış olup, çelik yelekler ve zırhlı araç malzemeleri üzerinde testler gerçekleştirilmektedir. Bunun yanında uçakların iniş ve kalkışı esnasında pist üzerinde bulunan küçük taş vb maddelerin tekerleklerden fırlayarak uçak gövdesine veya kanatlarına çarpması da hasar oluşturacağından bu şekilde modellemeler yapılabilir. Bu deneyler gaz tabancası kullanılarak yapılmaktadır, şekil 4.5.



Şekil 4.5. Gaz tabancası deney düzeneği şeması; 1)hava filtresi, 2) basınç regülatörü, 3)hava tankı, 4)vana, 5) boru, 6) hız ölçüm cihazı, 7) örnek

4.2.2. Düşük hızlı darbe

Düşük hızlı darbeye en basit örnek olarak kompozit malzeme üzerine imalat veya bakım esnasında kaza sonucu bir parçanın düşmesi verilebilir. Düşük hızlı darbeler normal olarak çarpışma temas anında malzeme içyapısında deformasyon oluşturan darbelerdir. Bazen düşük hızlı darbe düşük enerjili darbe olarak ta tanımlanır. Düşük hızlı darbeye malzemenin içyapısında darbeye karşı cevap verebilmek için gerekli olan temas süresi yeterlidir ve sonuç olarak daha fazla enerji elastik olarak absorbe edilir. Bu nedenle hedefin dinamik yapısal cevabı çok büyük bir öneme sahiptir.

Düşük hızlı darbeler, oluşan hasar bakımından matris kırılması, delaminasyon (tabakalar arası ayrılma) oluşumu ve fiber kırılmalarının görüldüğü darbelerdir, çarpma hızı ve absorbe edilen enerji miktarı düşük düzeylerde oluşmaktadır (bu değerler serbest düşen kütlenin ağırlık ve düşme yüksekliğine göre değişebilir) fakat bu konuda literatürde bu yöntem için kesinleşmiş ölçüler ve değerler bulunmamaktadır [3].

4.3. Tabakalı Kompozit Malzemedeki Darbe Sonucu Oluşan Hasar Modları

Elyaf takviyeli plastik tabakalar, anizotropik ve heterojen yapılarından dolayı dört değişik önemli darbe hasar modunun ortaya çıkmasına müsaittirler (bunların dışında daha birçok hasar modundan bahsetmek mümkündür). Bu modların tabakalı bir kompozit üzerindeki modeli Şekil 4.6'da görüldüğü gibidir [3].

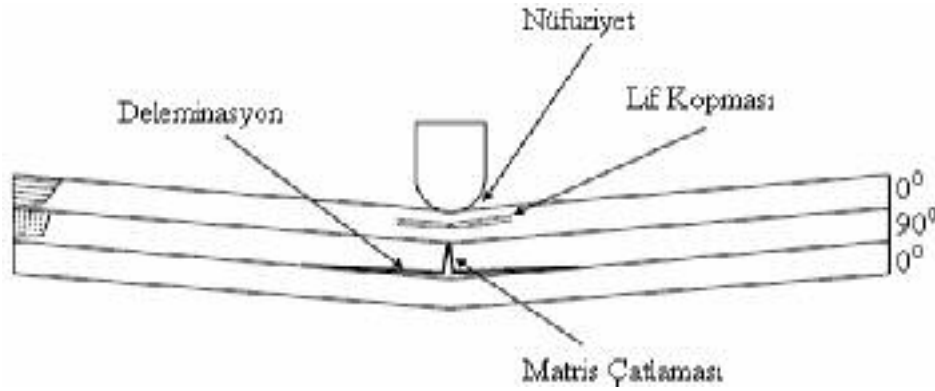
1. Matris modu: Çatlama liflere paralel meydana gelir. Bunun nedeni bası gerilmesi ve kesme gerilmeleridir.

2. Delaminasyon modu: Tabakalar arası eğilme cevabı uyumsuzluğundan ortaya çıkar.

3. Elyaf modu: Gerilme altındaki lif kopar, sıkıştırma altındaki lif eğilir.

4. Nüfuziyet: Çarpan cisim kompozit malzemeye tamamıyla nüfuz eder.

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



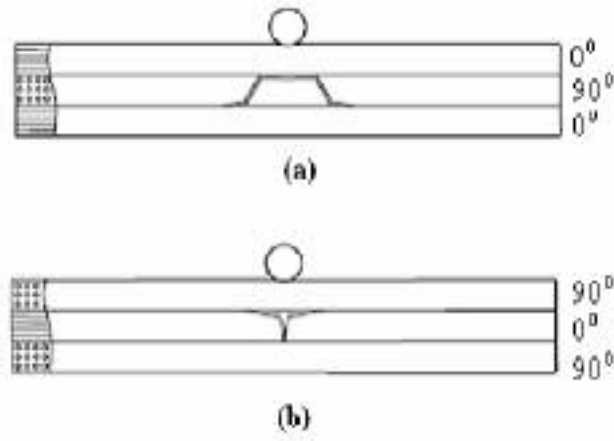
Şekil 4.6. Darbe sonucu kompozit malzemede oluşan hasar çeşitleri

4.3.1. Matris Hasarı

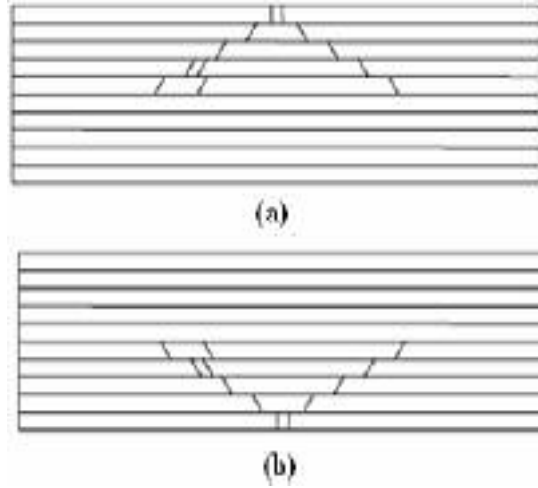
Literatürde rapor edilen darbe testlerinin çoğunluğu, düşük enerjili testleri içerir. Matris hasarı, düşük hızlı enine darbenin oluşturduğu hasarın ilk tipidir ve genellikle matris çatlama şeklinde meydana gelir. Matris hasarı ayrıca lif ve matris ara yüzeyi arasındaki bağın kopması şeklinde de oluşur.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

Darbeden sonra, tahmin edilmesi çok zor olan ve karmaşık bir düzende bulunan matris çatlakları vardır. Tabakalı kompozitin darbe sonrası özelliklerinde matris çatlaklarının çok büyük etkisi olmadığından bunların belirlenmesi çok ta gerekli değildir. Ama, hasar süreci matris çatlakları ile başlar ve arkasından bu çatlaklar tabaka ara yüzlerinde tabaka ayrılmasına (delaminasyon) neden olur. İki tür matris çatlağı gözlenir: çekme çatlakları ve kayma çatlakları (Şekil 4.7). Çekme çatlakları, düzlem için normal gerilmelerin tabakacığın enine kayma mukavemetini aştığı zaman ortaya çıkar. Kayma çatlakları orta düzlemden belli bir açıda bulunurlar ki bu durum enine kayma gerilmelerin bu tür çatlakların oluşumunda önemli rolü oynadığını göstermektedir. Kalın tabakalı kompozitlerde yüksek yerel gerilmeler nedeniyle

matris çatlakları vurucunun çarptığı ilk katmanda meydana gelir. Hasar, yukarıdan aşağıya doğru bir çam ağacı görüntüsü oluşturacak şekilde ilerler (Şekil 4.8a). İnce tabakalı kompozitler için, kompozitin arka yüzündeki eğilme gerilmeleri en alt katmanda matris çatlağına neden olur. Bu da matris çatlakları ve delaminasyonları başlatarak ters çevrilmiş çam ağacı şeklinde bir hasar görüntüsü verir (Şekil 4.8b).



Şekil 4.7. Matris çatlakları (a) çekme çatlağı (b) kayma çatlağı



Şekil 4.8. (a) Çam ağacı (b) ters çevrilmiş çam ağacı görünümlü hasar örnekleri

4.3.2. Delaminasyon

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

Matris çatlama delaminasyonun başlaması açısından gerekli bir faktördür. Matris çatlama ve delaminasyon arasında sıkı sıkıya bir ilişki mevcuttur. Delaminasyonlar, tabakalar arası ara yüzey bölgesinde meydana gelirler. Enine darbeye maruz $0^\circ/90^\circ/0^\circ$ tabakaları için delaminasyon ve matris çatlama etkileşmesi göz önüne alındığında; üst katmanlardaki eğilimlenmiş çatlaklar ara yüzeye ulaştığı zaman durdurulur ve katmanlar arasında delaminasyon olarak ilerler. Oluşan çatlakların ara yüzeye ulaşınca durdurulması; elyaf yönlendirmelerindeki değişimden dolayıdır. Bu delaminasyon, ortadaki enine çatlama tarafından zorlanır. Düşey eğilme çatlak büyümesi, zorlanmayan en alt ara yüzey delaminasyonunu başlatır. Delaminasyona önderlik eden matris çatlamları, kritik matris çatlamlarıdır. Delaminasyon, matris çatlamlarından dolayı meydana gelen yüksek mertebedeki düzlem dışı gerilmeler ve ara yüzey boyunca tabakalar arasındaki kesme gerilmelerinden dolayı Mod I ayrılma olarak başlamaktadır.

4.3.3. Elyaf Kopması

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

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

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

4.3.4. Nüfuziyet

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

4.4. Darbe Mekanîği

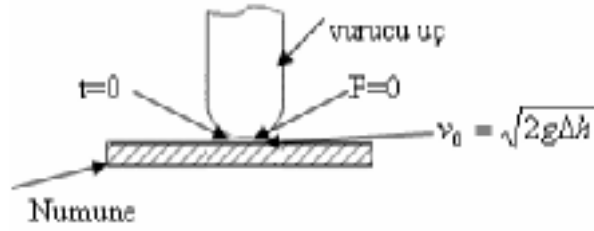
Darbe mekanîği (impact mechanics), bir çarpışma esnasında ortaya çıkan tepki kuvvetleri ile yapıların bu tepki kuvvetlerine olan dinamik cevabıyla ilgilenmektedir. Bu konu, otomobillerin çarpışma dayanımını geliştirmeden spor aletlerinin tasarımına kadar geniş aralıktaki birçok mühendislik uygulamalarını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

4.4.1. Düşük Hızlı Darbenin Mekanîği

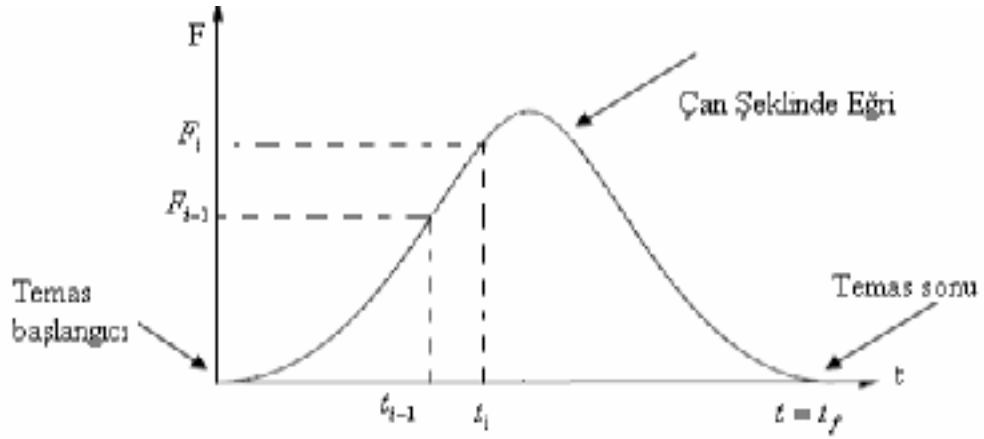
Çarpışan iki cismin yüzeyleri bir araya geldiğinde küçük bir temas alanında basınç yükselir. Temas süresince her bir anda, temas alanındaki basınç yerel bir deformasyon ve akabinde bir nüfuziyet (indentation) doğurur. Darbe sırasında her bir anda, arayüz veya temas basıncı çarpışan iki cisimde zıt doğrultularda etki eden bir etki veya tepki bileşke kuvvetine sahiptir, böylece cisimlerin birbirine geçmesine karşı direnme oluşur. Başlangıçta nüfuziyetin artmasıyla kuvvet de artar ve bu kuvvet birbirine yaklaşan cisimlerin süratini azaltır. Darbe olayında belli bir anda temas kuvvetlerinin yaptığı iş her iki cismin süratini sıfır olmasını sağlar ve neticede sıkışma sırasında biriktirilen enerji iki cismi birbirinden ayırmaya zorlar, sonunda bu cisimler birbirlerinden belli bir izafi hızla ayrılırlar. Katı cisimlerin arasındaki darbede, çarpışma süresince etki eden temas kuvveti, iki cisim yüzeylerinin bir temas alanı oluşturması için gerekli yerel deformasyonların bir neticesidir. Darbe esnasında ortaya çıkan yerel deformasyonlar çarpışan cisimlerin sertliliğine olduğu kadar temas başlangıcındaki izafi çarpma hızına bağlı olarak ta değişir. Düşük hızlı çarpışmalar sadece küçük deformasyonlara neden olan temas basınçlarını doğurur. Bunlar temas alanının yakınlarındaki küçük bir bölgede önemlidir. Yüksek hızlarda temas alanının yakınlarında plastik akmadan kaynaklanan büyük deformasyonlar (birim şekil değiştirmeler) vardır. Bu büyük yerel deformasyonlar, krater oluşturma (cratering) ve dalma (penetration) şeklinde büyük belirginlikte olup kolaylıkla gözlenebilir. Her bir durumda deformasyonlar, çarpışan cisimlerde hız değişimine neden olan temas kuvvetlerinin bir parçasıdır. Büyük plastik deformasyonlara neden olacak çarpma hızı $102 \times V_y$ ile $103 \times V_y$ 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) [43].

4.4.2. Düşük Hızlı Darbenin Kinematik Analizi

Darbe başlangıç şartları şekil 4.9’da verilmiştir. Şekil 4.10 tipik bir düşük hızlı darbe testinin kuvvet zaman grafiği görülmektedir. Benzer şekilde şekil 4.11 de ivmenin zamanla değişimini gösteren grafik verilmiştir.



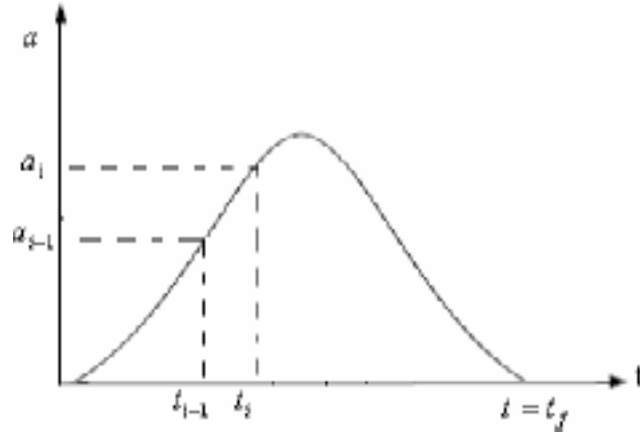
Şekil 4.9. Darbe başlangıç anı



Şekil 4.10. Düşük hızlı darbenin kuvvet-zaman grafiği

Merkezi çarpma için Newton’un ikinci yasası kullanılarak $t = t_i$ ’de ivme hesaplanmıştır. Burada, $t = t_i$ ’de F_i değerleri kuvvet sensorundan elde edilmiştir.

$$a_i = \frac{F_i}{m} \quad (4.2)$$



Şekil 4.11. İvme-zaman grafiği

Şekil 4.11 de görüldüğü gibi ivme zaman arasındaki ilişki doğrusal olmamasına rağmen Δt çok küçük olmasından ($1 \times 10^{-5} s$) dolayı doğrusal olarak kabul edilmiştir [45].

$$a(t) = kt + c \quad (4.3)$$

Burada k ve c;

$$k = \frac{a_i - a_{i-1}}{t_i - t_{i-1}}, \quad c = \frac{t_i a_{i-1} - t_{i-1} a_i}{t_i - t_{i-1}} \quad (4.4)$$

$$a(t) = \frac{dv}{dt}, \quad dv = a(t)dt. \quad (4.5)$$

Denklem 4.5 deki hız yerine;

$$v = v_0 + \frac{1}{2}k(t^2 - t_0^2) + c(t - t_0) \quad (4.6)$$

Eğer denklem 4.6 (t_{i-1}, t_i) için düzenlenirse;

$$v_i = v_{i-1} + \frac{1}{2}k_i(t_i^2 - t_{i-1}^2) + c_i(t_i - t_{i-1}) \quad (4.7)$$

$$ds = vdt \quad (4.8)$$

Eğer denklem denklem 4.6 denklem 4.8'de yerine konulursa;

$$s = s_0 + \frac{1}{6}k(t^3 - t_0^3) + \frac{1}{2}c(t^2 - t_0^2) - \left(v_0 + ct_0 + \frac{1}{2}kt_0^2 \right) (t - t_0) \quad (4.9)$$

Denklem 4.9 (t_{i-1}, t_i) aralığı için düzenlenirse denklem 4.10 elde edilir.

$$s_i = s_{i-1} + \frac{1}{6}k_i(t_i^3 - t_{i-1}^3) + \frac{1}{2}c_i(t_i^2 - t_{i-1}^2) - \left(v_{i-1} + c_i t_{i-1} + \frac{1}{2}k_i t_{i-1}^2 \right) (t_i - t_{i-1}) \quad (4.10)$$

Böylece (F_i, t_i) değerlerinden (F_i, s_i) değerleri elde edilmiş olur.

4.4.2. Katı Cisim Darbesi

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

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

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

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

4.4.3. Katı Cisim Darbe Mekanizmasının Esasları

- (a) Çarpışan cisimlerin her birinde temas alanı her iki cismin kesit ölçüleri ve normal doğrultudaki cisim derinliğine nazaran küçük kalmaktadır.
- (b) Temas esnasındaki yer değiştirmeler ihmal edilebilecek kadar temas süresi yeterince kısa olmakta ve böylece sistem durumunda bir değişiklik meydana gelmemektedir.

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

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

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

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

Katı cisim teorisini kurarak çarpışan iki cismi sonsuz küçük Őekil değiştirebilen bir parçacıkla ayırabileceğimizi dūřunebiliriz. Őekil değiştirebilen parçacık, her ne kadar bu iki nokta ũst ũste akışsa da, çarpışan cisimlerin ilk temas noktaları arasında yer almaktadır. Temas noktasında cisimleri birbirinden ayıran sonsuz küçük tamamlayıcı elemanın fiziksel yapısı, darbe sırasındaki hızdaki değişimleri, impulsun normal bileşenin bir fonksiyonu olarak ayrılabilmesine mũsaade eder. Bu impulsun normal bileşeni, çarpışma sonunda normal temas kuvvetinin temas periyodu ũzerindeki entegraline eşdeğerdir. Yapışkan olmayan temas yũzeyli cisimler arasındaki çarpışmalar sadece deforme edilen parçanın sıkışmasıyla ve çekilmesiyle değil, vuku bulduğundan impulsun normal bileşeni çarpışmadan sonra zamanın monoton artan bir fonksiyonu olur. Bu nedenle ani çarpışmada, hızdaki değişimler, zaman yerine impulsun normal bileşeni olan bir bağımsız bileşene ayrılabilir. Bu da bize impulsun sũrekli (dũzgũn) bir fonksiyonu olan hız değişimini verir.

4.5. Dinamik Yũkler

İvmeli hareketlerden doğan atalet kuvvetleri, dinamik çarpışmalardan doğan kuvvetler ve zamanla değişen kuvvetler daima dinamik yũkler olarak kabul edilmektedir. Dinamik etkenlerden doğan kuvvetler ve Şekil değiştirmeler ile statik yũklemeden oluşan kuvvet ve Şekil değiştirmeler birbirinden farklıdır ve dinamik etkenlerden Őařırtıcı sonuçlar elde edilmektedir.

Dinamik etkiler Şu Şekilde sınıflandırılabilirler:

- 1) İvmeli hareketteki atalet kuvvetleri
- 2) Ani yũkleme ve çarpışma problemleri
- 3) Elastik titreşim problemleri

Elastik sistemlerin dinamik etkiler altındaki davranışlarına elasto-kinetik denir. Dinamik etkilerden doğan gerilmeler ve Şekil değiştirmelerle, statik etkilerden doğan gerilme ve Şekil değiştirmeler karşılaştırıldığında nũmerik bir çarpan elde edilir, buna ‘‘ dinamik çarpan’’ veya ‘‘arpma katsayısı’’ adı verilir ve Şu Şekilde tanımlanır;

$$\frac{\sigma_{\text{dinamik}}}{\sigma_{\text{statik}}} = \phi \quad \text{veya} \quad \sigma_{\text{dinamik}} = \phi \cdot \sigma_{\text{statik}} \quad (4.11)$$

4.5.1. Atalet Kuvvetlerinden Doğan Gerilmeler

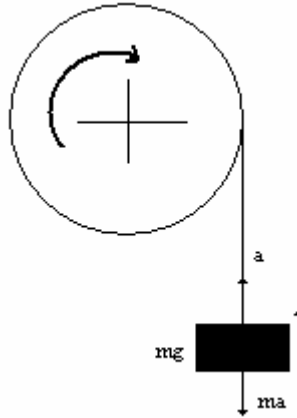
Şekil 4.12 de görülen cisim V hızıyla düşerken bir iple bağlı olduğu makaranın dönmesi engellenirse ipteki bir S kuvveti doğar ve bu da aslında statik olarak ele alınırsa sadece cismin ağırlığına eşit olmalıdır. Ama cismin ilk halini koruma isteğinden kaynaklanan ataleti sebebiyle bu kuvvet " $mg+(mg/g)a$ " ifadesine eşittir. Dinamik kuvvet ile statik kuvvet arasındaki ilişki ϕ dinamik çarpan ile gösterilir. Burada $G=mg$ ağırlık, g de yerçekimi ivmesi, m kütledir. Buna göre dinamik çarpan;

$$\begin{aligned} \text{(dinamik kuvvet)} \quad F_{\text{dinamik}} &= mg + ma, \\ \text{(statik kuvvet)} \quad F_{\text{statik}} &= mg \end{aligned} \quad (4.12)$$

olacak şekilde;

$$\text{(dinamik çarpan)} \quad \phi = \frac{F_{\text{dinamik}}}{F_{\text{statik}}} = \frac{mg + ma}{mg} = 1 + \frac{a}{g} \quad (4.13)$$

Bu formülden anlaşılacağı üzere yük ne kadar hızlı düşerse ivme değeri o kadar artacaktır. Bu durumda cisme etkiyen dinamik kuvvette artmış olur.



Şekil 4.12. Atalet kuvvetleri

4.5.2. Dinamik Yüke Maruz Kalma Durumları

Bir sistem statik ve dinamik olarak yüklendiğinde hangi sonuçların oluşacağı şu şekilde gözlemlenir; bunun için k yaylanma katsayısına sahip bir yay ile m kütleli bir cismi yaylandıracak basit bir elastik sistem elde göz önüne alınır. D'Alembert ilkesine uygun olması

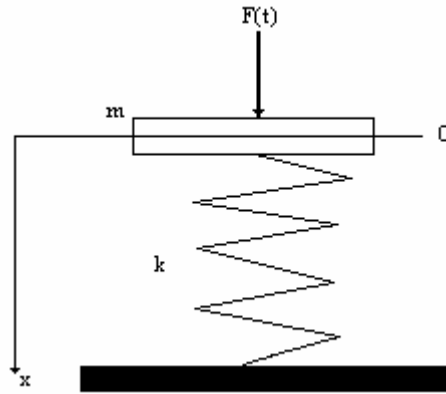
için, cismin ağırlığının ağırlık merkezine yoğunlaşmamış olduğu varsayılırsa, sistem $x = 0$ konumunda dengededir. Cismin üzerine zamanla değişen bir F kuvveti etki ettiğini düşünürsek (Şekil 4.14) bu kuvvetin etkisiyle sistemin yaptığı hareketin denklemi şu şekilde oluşur:

$$mg+kx = F(t) \quad (4.14)$$

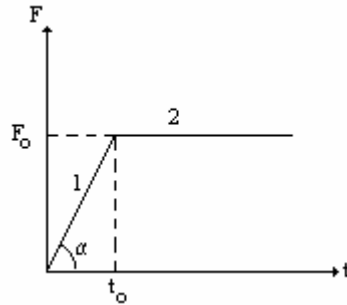
İlk anda konumun ve hızın sıfır olduğu kabul edilerek,

$$\delta(t) \quad x_1(0) = \dot{x}_1(0) = 0 \quad (4.15)$$

yazılır. Burada sağlıklı bir analiz yapılabilmesi için kuvvetin karakteristiği hakkında bir fikir sahibi olunması gerekir. $F(t)$ kuvveti zamanla şekil 4.13 deki gibi değişen bir davranış gösterirse;



Şekil 4.13. Elastik bir sistemin dinamik yüklenme durumu



Şekil 4.14. F kuvvetinin zamanla değişimi

Grafiğe göre;

$$F(t) = \left(\frac{F_o}{t_o} \right) t$$

1. $0 < t < t_o$ zaman aralığında (4.16)

2. $t \geq t_o$ zaman aralığında $F(t) = F_o$ (4.17)

olmaktadır.

Hareket denklemi başlangıç koşulları ve hareket karakteristiği dikkate alınarak çözüldüğünde ilk kısımda yolu veren denklem şu şekilde oluşur;

$$x_1 = \frac{F_o}{k} \left(\frac{t}{t_o} - \frac{\sin wt}{wt_o} \right)$$

(4.18)

Burada, $\frac{F_o}{k}$ değeri cismin statik yer değiştirmesidir ve

$$w^2 = \frac{k}{m}$$

(4.19)

Cisme etkiyen kuvvetin sabit olduğu ikinci kısımda yer değiştirmeyi hesaplamak için başlangıç şartları verilen grafikten;

$$x_1(t_o) = x_2(t_o)$$

$$\dot{x}_1(t_o) = \dot{x}_2(t_o)$$

(4.20)

Bu başlangıç şartları ile hareket eden denklem çözüldüğünde,

$$x_2 = \delta_{\text{statik}} \left[1 - \left(\frac{1 - \cos wt_o}{wt_o} \right) \sin wt + \left(\frac{\sin wt_o}{wt_o} \right) \right]$$

(4.21)

elde edilir.

Yolu veren denklemden görüleceği üzere sistemin cismin sinüs ve kosinüs trigonometrik fonksiyonlarının neden olduğu bir dalgalanma göstermektedir. Bu nedenle yol denkleminin türevi alınarak en büyük x sapsması bulunur. Çünkü bu tip dinamik problemlerde dinamik çarpan, cismin üzerine etkiyen dinamik kuvvetin maksimum olduğu an için hesaplanır.

$$x_2 = \delta_{\text{statik}} \left[1 + \left(1 - \frac{\cos wt_0}{wt_0} \right)^2 + \left(\frac{\sin wt_0}{wt_0} \right)^2 \right] \quad (4.22)$$

burada dinamik çarpan;

$$\phi = \frac{x_{2\text{max}}}{\delta_{\text{statik}}} = 1 + \sqrt{2 \left(\frac{1 - \cos wt_0}{wt_0} \right)^2} \quad (4.23)$$

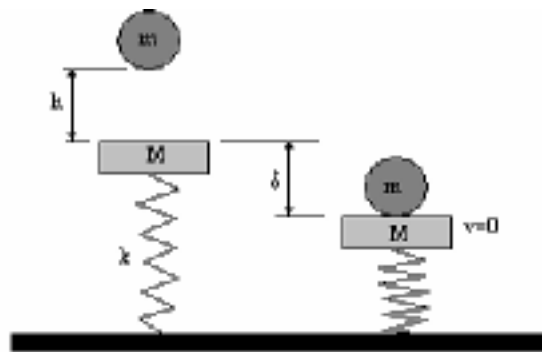
Burada limit durumuna da dikkat etmek gerekir. Dinamik çarpan t_0 yükleme süresine bağlıdır. Yükleme süresi teorik olarak sıfır olduğunda yani ani yükleme durumunda $\phi=2$ dir, yani bir ani yükleme durumunda dinamik yükleme statik yüklemenin iki katına eşittir.

Diğer bir limit durum ise, yükleme süresinin çok uzun olduğu, teorik olarak sonsuz olan durumdur. Buna statik yükleme adı verilir ve burada $\phi=1$ dir.

Buradan çıkarılacak sonuç ani yükleme durumunda dinamik yük statik yükün iki katı olduğudur.

4.5.3. Ani Yükleme

Şekil 4.15 deki gibi modellenmiş elastik bir sisteme m kütleli yabancı bir cisim belirli bir hızla çarpması durumunda çarpan cisim sahip olduğu enerjisinin bir kısmını elastik sisteme aktararak harekete geçirir.



Şekil 4.15. Çarpışma öncesi ve sonrası elastik sistem davranışı

Çarpışma anındaki hız değeri m kütleli cismin sahip olduğu potansiyel enerjisinin çarpışmadaki kinetik enerjiye olan eşitliğinden çıkartılır;

$$\frac{1}{2}mV_0^2 = mgh \Rightarrow V_0 = \sqrt{2gh} \quad (4.24)$$

olur. Çarpışma anında temas noktasında plastik şekil değişimi olduğu varsayılarak çarpışmadan sonra m ve M kütlelerinin beraber bir V hızı ile hareketi oluşacaktır ki bu çarpışmaya plastik çarpışma adı verilir.

Momentumun korunumundan,

$$mV_0 + 0 = (m + M)V$$

$$V = \frac{mV_0}{m + M} \quad (4.25)$$

bulunur. Bundan sonra bu kütleler bir δ mesafesi kadar hareket ederek bütün enerjilerini yaya aktarırlar ve ortak hızları sıfır olur. Yaydaki potansiyel enerji $\frac{1}{2}k\delta^2$ olduğuna göre enerji bağıntısı,

$$\frac{1}{2}(m + M)V^2 + mg\delta = \frac{1}{2}k\delta^2 + Mg\delta$$

$$\frac{1}{k}(m + M)V^2 + \frac{2mg\delta}{k} = \delta^2 + \frac{2Mg\delta}{k} \quad (4.26)$$

$mg\delta$ çok küçük bir değere sahip olacağı için ihmal edilebilir. Eğer m cismi sonsuz bir zaman

aralığında M cisminde etkiseydi, statik yerdeğiştirme $\delta_{\text{statik}} = \frac{mg}{k}$ olurdu.

$$\frac{1}{k}(m + M)V^2 + 2\delta_{\text{statik}}\delta_{\text{dinamik}} = \delta_{\text{dinamik}}^2 + \frac{2Mg\delta_{\text{dinamik}}}{k} \quad (4.27)$$

bu durumda dinamik çarpan $\phi = \frac{\delta}{\delta_{\text{statik}}}$ olur.

m cisminin M cisminde çarpması durumunda ortaya çıkan enerji,

$$w_0 = \frac{1}{2}mV^2 = mgh \quad (4.28)$$

bu değer ile çarpan cismin statik olarak etkimesi durumunda aktarılan enerji,

$$U = \frac{1}{2}k\delta_{\text{statik}}^2 = \frac{(mg)^2}{2k} \quad (4.29)$$

olur. Her iki denklemin ortak çözümünden,

$$\frac{w_0}{U} = \frac{kh}{\delta_{\text{statik}}} = \frac{V_0^2}{g\delta_{\text{statik}}} \quad (4.30)$$

buradan dinamik çarpan,

$$\phi = 1 + \sqrt{1 + \left[\eta \frac{V_0^2}{g\delta_{\text{statik}}} \right]} = 1 + \sqrt{1 + \left[\eta \frac{2h}{\delta_{\text{statik}}} \right]} \quad (4.31)$$

elde edilir. Burada η arpışmadaki enerji kaybını gösteren 1'den küçük bir katsayı olarak alınır.

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{M}{m}} \quad (4.32)$$

$\eta=1$ olarak alınırsa M kütlesi m'nin yanında ihmal edilecek kadar küçük ve çarpışma sırasında bir enerji kaybı yok demektir.

M ihmal edildiğinde oluşacak dinamik çarpan,

$$\phi = 1 + \sqrt{1 + \frac{2h}{\delta_{\text{statik}}}} \quad (4.33)$$

olur. Bu durumda yaydaki dinamik çökme $\delta_d = \phi \cdot \delta_{\text{Statik}}$ ve kuvvet ile yaydaki çökme arasındaki bağıntı lineer olduğundan;

dinamik kuvvet; $P_d = \phi \cdot P_s$ ve dinamik gerilme $\sigma_d = \phi \cdot \sigma_s$ olur.

4.6. Darbe Test Hesaplamaları

Birkaç farkın olmasına rağmen sarkaç ve ağırlık düşürme test sisteminde, ihtiyaç duyulan hesaplamalar hemen hemen aynıdır. Sarkacın yatay ve ağırlık düşürme testinin düşey olması hesaplamaları etkilemez. İlk aşamada, plak ile temas halinde olan tüpün potansiyel enerjisini ihmal edecek kadar, defleksiyon vardır. İkinci aşamada, yerçekimine bağlı ivme, darbe kuvvetinin meydana getirdiği ivme ile mukayese edildiğinde küçük olduğu kabul edilir. Bu

kabullerin ikisi de ağırlık düşürme hesapları üzerinde daha etkilidir. Dinamik darbe testi için önemli hesaplamalar (4.35) ve (4.36) denklemleri ve yer değiştirmelerdir. Belirli olan yerdeğişimi tüpün hareket denkleminin zamana göre integre edilmesi ile zamanın bir fonksiyonu olarak elde edilir. Koordinat sistemi, tüpün başlangıçtaki yer değişimi $\delta(t)$, $V_{tup}(t)$ 'nin integrasyonundan denklem (4.34) 'deki hesaplanır.

$$\delta(t) = \int_0^t V(t) dt + \delta(0) \quad (4.34)$$

Darbe testi hesaplamalarında $F(t)$ ölçülen, $E(t)$ absorbe edilen enerjiyi ve $\delta(t)$ yerdeğiştirmeyi göstermektedir.

4.6.1. F(t), Ölçülen Kuvvet

Ağırlık düşürme darbe test cihazında (Drop Weight Test System) temas kuvvetini ölçmek için bir kuvvet sensörü. Ayrıca ivmeyi ölçmek için bir de ivme metre vardır. Analiz yapabilmek için deney boyunca bu iki aygıtın okuduğu değerler bir bilgisayara transfer edilir.

4.6.2. E(t), Absorbe Edilen Enerji

Darbe testinde, darbe enerjisi ve numunenin absorbe ettiği enerji sık olarak olayı karakterize eder. Darbe enerjisi vurucu ucun numuneye çarptığı andaki kinetik enerjisidir. Darbe enerjisi tüp kütlelerinin büyüklüğü ile ve düşme yüksekliği ile kontrol edilir. Böylece kütlenin bırakılmadan önceki potansiyel enerjisi, darbe anındaki kinetik enerjisi için üst sınırdadır. Tüpün ivmelenmesi esnasındaki enerji kayıpları (kılavuz raylardaki kayma sürtünmesi, hava direnci gibi) darbeden hemen önceki tüp hızının ölçülmesiyle $V_{tup}(0)$ hesaplanabilir.

$$\text{Darbe enerjisi} = \frac{M_{imp}}{2} V_{imp}(0)^2 \quad (4.35)$$

Darbe olayı başlangıçta sabit olan numune ile hareketli olan tüp arasındaki enerji transferidir. Numunenin absorbe ettiği enerji demek, numuneye transfer olan darbe enerjisi demektir. Bu enerji numunenin şekil değiştirme enerjisini ve kinetik enerjisini içermektedir. Darbe olayı esnasında kılavuz raylardaki sürtünme kayıpları ve hava direncinin küçük olduğu farz edilir. Fakat gerçekte absorbe edilen enerji içindedir. Absorbe edilen enerji Newton'un ikinci kanununa göre $F(t)$ temas kuvvetinin integre edilmesiyle $V_{imp}(t)$ hızının bulunmasıyla (4.35) 'deki denklemlerle bulunur.

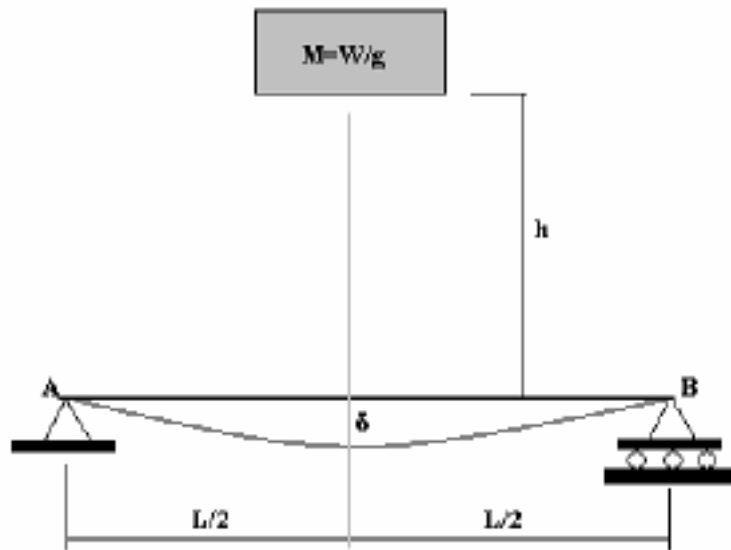
$$V_{imp} = V_{imp}(0) - \frac{1}{M_{imp}} \int_0^1 F(t) dt$$

$$E(t) = \frac{M_{imp}}{2} [V_{imp}(0)^2 - V_{imp}(t)^2] \quad (4.36)$$

$E(t)$ kinetik enerji kayıpları ile absorbe edilen enerjii içermektedir. Absorbe edilen enerji direkt olarak ölçülen bir büyüklük değildir. Absorbe edilen enerjinin doğruluğu, Mimp kütesinin ölçülmesinin, temas kuvveti $F(t)$ 'nin ölçülmesinin, $V_{imp}(0)$ hızının ölçülmesindeki doğruluğa bağlıdır. Ve darbe olayı esnasındaki sürtünme kayıplarının ihmaline bağlıdır.

4.6.3. $\delta(t)$ Çarpma ile Oluşan Yerdeğiştirme

Şekil 4.16 daki gibi çarpma yüküne maruz bırakılmış bir kirişin dinamik yer değiştirmesi, belli bazı basitleştirilmiş şartlar altında ve yüklerin de eşit sayılması durumunda kirişte depo edilmiş gerilme enerjisiyle belirlenebilir. Burada yapılan kabuller; düşen kütle kirişe yapışır ve onunla birlikte hareket eder, enerji kayıpları meydana gelmez, kiriş lineer elastiktir, kirişin yerdeğiştirmiş biçimi, dinamik yük altında statik yük altındakiyle aynıdır ve kirişin potansiyel enerjisinin neden olduğu pozisyondaki değişim ihmal edilebilir. Genel olarak bu kabuller, eğer düşen objenin kütlesi çok büyük ise, ki bu kütle, kirişin kütlesi ile karşılaştırılır, o zaman makuldür. Aksi takdirde bu basitleştirilmiş analizler geçerli değildir ve daha ilerlemiş analizlere ihtiyaç duyulur.



Şekil 4.16. Kirişin dinamik yer değiştirmesi

Örnek olarak şekil 4.16 'deki AB kirişi göz önüne alınsın. Bu kirişin ortasına W ağırlığında bir cisim düşürülüyor. Yapılan kabullere dayanarak tüm işin cisim tarafından yapıldığını söyleyebiliriz. Bu iş cismin düşüşü boyunca olup, kirişin elastik gerilme enerjisine dönüştürülür. Bu işlem, objenin bir uçtan bir uca aldığı mesafe $(h+\delta)$ olana kadar sürer. Burada, h kirişin üzerindeki kütle başlangıç mesafesi, δ ise kirişin maksimum yer değiştirmesidir. Bu durumda yapılan iş gerilme enerjisi olarak,

$$U=W(h+\delta) \quad (4.37)$$

olur. Eğer W yükü bırakılırsa, yükün uyguladığı P kuvvetinin kirişe, yer değiştirmenin maksimum olduğunda etki ettiği söylenir. Bu durumda P ile δ arasındaki ilişki;

$$U = \frac{P\delta}{2} = \frac{24EI\delta^2}{L^3} \quad (4.38)$$

olur.

Yapılan iş düşen kütle ile gerilme enerjisi arasında eşitlenirse,

$$W(h+\delta) = \frac{24EI\delta^2}{L^3} \quad (4.39)$$

olarak elde edilir. Bu eşitlik δ için 2. derecedendir ve bunun pozitif kökleri için çözülür. kirişin dinamik yer değiştirmesi;

$$\delta_{dinamik} = \frac{WL^3}{48EI} + \left[\left(\frac{WL^3}{48EI} \right)^2 + 2h \left(\frac{WL^3}{48EI} \right) \right]^{1/2} \quad (4.40)$$

burada kirişin statik yer değiştirmesi

$$\delta_{statik} = \frac{WL^3}{48EI} \text{ dir.} \quad (4.41)$$

bu durumda dinamik yer değiştirme daha sadeleştirilerek yazılır;

$$\delta_{dinamik} = \delta_{statik} + \left(\delta_{statik}^2 + 2h\delta_{statik} \right)^{1/2} \quad (4.42)$$

Bu denklemden dinamik yer değiştirmenin her zaman statik yer değiştirmeden büyük olduğu anlaşılır. Eğer $h=0$ ise, ki bu yükün ansızın ve serbest düşmesi olmadan tatbik edildiği anlamına gelir. Dinamik yer değiştirme statik yer değiştirmenin iki katıdır. Eğer h yüksekliği, δ

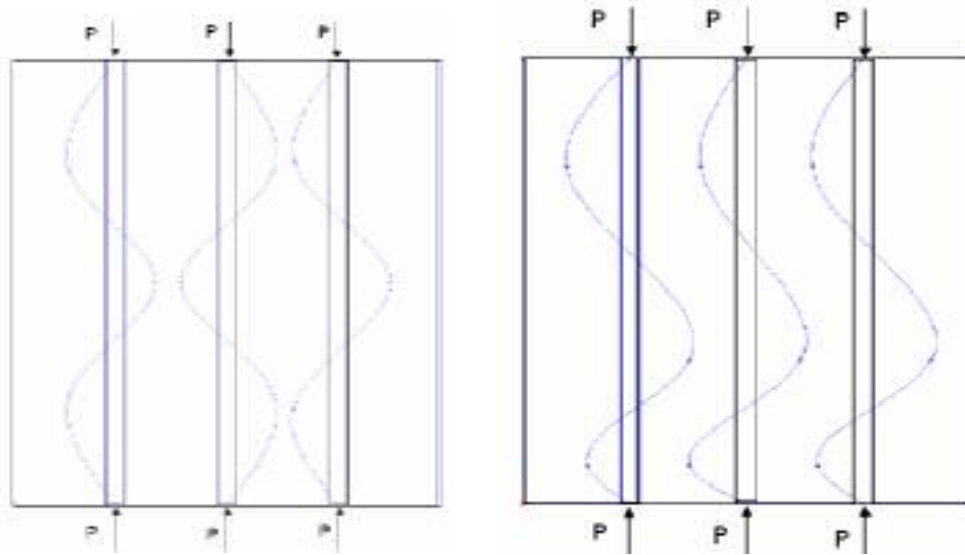
yer değiştirme miktarı ile kıyaslandığında, çok büyük ise o zaman h terimi içeren (4.42) denklemi ağır basar ve bu denklem basitleştirilerek;

$$\delta = \sqrt{2h\delta_{statik}} \quad (4.43)$$

durumunu alır. Denklemlerden hesaplanan δ yer değiştirme miktarı genellikle bir üst limiti gosterir. Çünkü arpma boyunca bir enerji kaybının olmadığını kabul edilmiştir. Daha doğru bir analiz, kinetik enerji kaybı faktorünün de hesaba katılmasıyla yapılabilir.

4.7. Kompozit Malzemelerde Burkulma

Kompozit malzeme içinde, fiberler genellikle çeki gerilmesi etkisi altında kalırlar. Daha gerçek bir ifade ile lifler çeki gerilmesinin bulunduğu blgelerde daha fazla olup pozitif gerilmeleri üzerine alırlar. Fakat tüm bu oryantasyon ile ilgili yapılan çalışmalara rağmen kompozit içindeki liflerin değişik çalışma şartları altında bası gerilmelerinin etkisi altında kalmasına engel olunamaz. Lifler ince (narin) bir yapıya sahip olduklarından bası gerilmesini taşıyamazlar ve burkulma hadisesi meydana gelir. Burkulma hadisesi liflerde iki türlü olur. Eksenel tip (şekil 4.17 a)'da ve (şekil4.17 b) kayma (kesme) tipi burkulma gorlmektedir.



şekil 4.17. Burkulma (a) eksenel tip (b) kayma (kesme) tipi burkulma

4.7.1. Aksenal Burkulma

Liflerin kayma elastisite modülleri $G_f \gg G_m$ dir. Böylece liflerin kayma elastisite modüllerine bağlı olan kayma deformasyonları çok küçük değerlerde olup ihmal edilmektedir. Liflerde burkulma yüklerinin tayini için enerji metotları kullanılmaktadır.

$\Delta U_f =$ Fiberin şekil değiştirme enerji değişimi

$\Delta U_m =$ Matriksin şekil değiştirme enerji değişimi

$$\Delta W = \Delta U_f + \Delta U_m \quad (4.44)$$

x doğrultusunda bası gerilmesine uğrayan bir fiberin y eksenine doğrultusundaki deplasmanı v ile tanımlanırsa;

$$v = \sum_{n=1}^{\infty} a_n \sin \frac{n\pi x}{L} \quad (4.45)$$

$$\varepsilon_y = \frac{2v}{2c} = \frac{v}{c} \quad (4.46)$$

Bu formüllerden matriks için y eksenindeki gerilme;

$$(\sigma_y)_m = E_m \frac{v}{c} \quad (4.47)$$

Şeklinde yazılabilir. Şekil değiştirme enerjisindeki değişim ise $(\sigma_y)_m$ cinsinden;

$$\Delta U_m = \frac{1}{2} \int (\sigma_y)_m E_y dV$$

$$\Delta U_m = \frac{E_m}{2c} L \sum a_n^2 \quad (4.48)$$

Lifler de meydana gelen şekil değiştirme enerjisi ise;

$$\Delta U_f = \frac{\pi^4 E_f h^3}{48L^3} \sum_n n^4 a_n^2 \quad (4.49)$$

Dış kuvvetler tarafından yapılan iş ise;

$$\Delta W = \frac{p\pi^2}{4L} \sum_n n^2 a^2 \quad (4.50)$$

Birim genişlik fiber yükü;

$$p = \sigma_f h$$

Olmak üzere fiberlerdeki burkulma yükü

$$p = \frac{\pi^2 E_f h^3 \sum_n n^4 a_n^2 + \frac{24L^4 E_m}{\pi^4 c h^3 E_f} \sum_n a_n^2}{12L^2 \sum_n n^2 a_n^2} \quad (4.51)$$

m ile ifade edilen bir sinüs dalgasında P yükünün bir minimum değere ulaştığını kabul edelim.

$$(\sigma_f)_{kr} = \frac{\pi^2 E_f h^2}{12h^2} \left[m^2 + \frac{24L^4 E_m}{\pi^4 c h^3 E_f} \left(\frac{1}{m^2} \right) \right] \quad (4.52)$$

$$\frac{\partial (\sigma_f)_{kr}}{\partial m} = 0$$

Burada (σ_f) kritik

$$(\sigma_f)_{kr} = 2 \sqrt{\frac{V_f E_m \varepsilon_f}{3(1-V_f)}} \quad (4.53)$$

$$V_f = \frac{h}{h+2c} \quad (4.54)$$

$$(\sigma_c)_{\max} = V_f (\sigma_f)_{kr} = 2V_f \sqrt{\frac{V_f E_m E_f}{3(1-V_f)}} \quad (4.55)$$

(4.53) denkleminde

$$(\varepsilon_f)_{kr} = 2 \sqrt{\frac{V_f}{3(1-V_f)}} \left(\frac{E_m}{E_f} \right)^{1/2} \quad (4.56)$$

Eğer matriks fiber ile aynı şekil değişikliğine tabi ise;

$$\sigma_m = E_m (\varepsilon_f)_{kr} \quad (4.57)$$

Maksimum kompozit gerilmesi ise aşağıdaki gibi bulunur.

$$(\sigma_k)_{\max} = V_f (\sigma_f)_{cr} + V_m \sigma_m \quad (4.58)$$

$$(\sigma_k)_{\max} = \left[V_f + (1 - V_f) \frac{E_m}{E_f} \right] (\sigma_f)_{kr} \quad (4.59)$$

$$(\sigma_k)_{\max} = 2 \left[V_f + (1 - V_f) \frac{E_m}{E_f} \right] \sqrt{\frac{V_f E_m E_f}{3(1 - V_f)}} \quad (4.60)$$

(4.53) denklemi ile (4.60) denklemi arasındaki fark liflerin büyük elastisite modüllerine sahip olması halinde (4.60) denklemindeki birinci çarpanın çok küçük değer alması ve neticenin (4.53) denklemindeki değerlerden küçük olmasıdır.

4.7.2. Kayma Burkulması

$$(\sigma_f)_{kr} = \frac{G_m}{V_f (1 - V_f)} \quad (4.61)$$

Maksimum kompozit gerilmesi;

$$(\sigma_k)_{\max} = \frac{G_m}{1 - V_f} \quad (4.62)$$

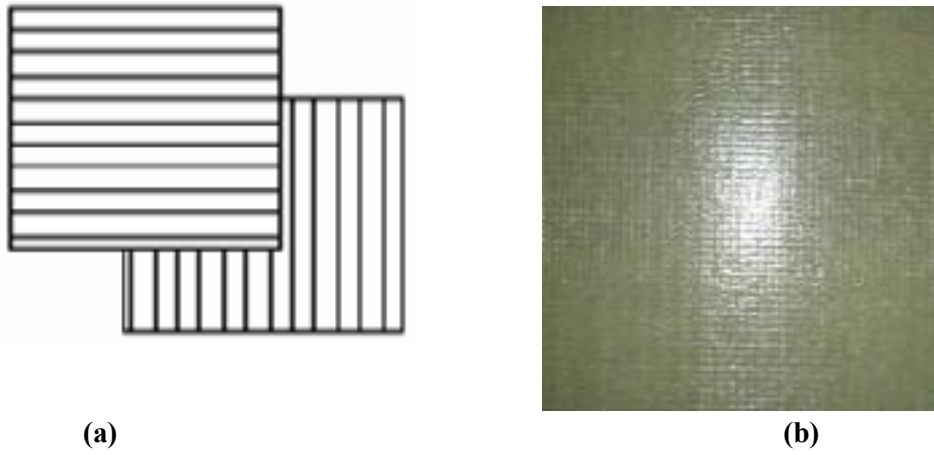
Kritik zorlanması;

$$\varepsilon_{kr} = \frac{1}{V_f (1 - V_f)} \left(\frac{G_m}{E_f} \right) \quad (4.63)$$

5. DENEYSEL YÖNTEM

5.1. Deney Numunesi

Çalışmada deney numunesi olarak Epoxy/E cam elyaf kompozit malzemesi seçilmiştir. Numuneler İzmir’ de bulunan İzoreel firması tarafından çalışmanın isteğine göre $[0/90]_{2s}$ oryantasyon açısında imal ettirilmiştir. Numune 8 kat simetrik tabaka olarak hazırlanmış olup ortalama kalınlığı 2mm dir. Boyutları 140x140mm olarak alınmıştır. Deneylerde; yükseklik, ağırlık, vurucu ucun şekli, malzeme sabit tutulurken yükleme durumu (Çeki-Çeki, Çeki-Bası, Bası-Bası) için değerlendirmeler yapılmıştır. Numuneler çenelerden zarar görmemesi için numunenin çenelere gelen kısımlarında 10x100 mm’lik saç levhalar kullanılmıştır. Şekil 5.1a ‘Epoxy- Cam Elyaf Takviyeli kompozit model olarak, şekil5.1b’ de ise deney numunesi gösterilmiştir.



Şekil 5.1. a) $[0/90]_{2s}$ Epoxy- Cam Elyaf Takviyeli Kompozit Model Olarak Gösterimi b) $[0/90]_{2s}$ Epoxy/Cam Elyaf Takviyeli Kompozit Deney Numunesi

5.2. Test Düzenegi

Düşük hızlı darbe testleri maksimum 10m/s hızında ve istenilen değişik ağırlık yüklerinde uygulanacak şekilde tasarlanmıştır. 10m/sn lik hız sınırı düşük hızlı darbeler için öngörülen hız olduğundan 5m lik bir düşme yüksekliğine karşılık gelmektedir [19]. Bu hızın üzerindeki darbeler, yüksek hızlı darbe olarak literatürde geçmektedir [38].

Ağırlık düşürme cihazının vurucu uç ile vurucu uç ağırlığı arasına yerleştirilmiş bir piezoelektrik kuvvetölçer darbe esnasındaki kuvvet-zaman diyagramını verir. Veriler sensörlerden bilgisayar ortamına aktarılarak grafiksel sonuçlar oluşturulur. Deney düzeneginin

taşınabilir olabilmesi ve montaj kolaylığı açısından tüm bağlantılar cıvata bağlantılı olarak tasarlanmıştır. Mekanik Laboratuarında bulunan darbe test düzeneği Şekil 5.2 de görülmektedir.



Şekil 5.2 Darbe Test Düzeneği

5.3. Deney Metodolojisi

Deney numunesi, ağırlık, vurucu uç geometrisi, yükseklik, vurucu uç ağırlığı ve bağlama Şekli sabit tutulup, yükleme (eki-çeki, eki-Bası, Bası-Bası) durumunun değişken olması durumlarında sağlıklı bir test takibinin yapılabilmesi için deneysel kodlamanın yapılması gerekir. Tüm bu işlemlerin test aşamasında verilerin saklanması ve numunelerin arşivlenmesi açısından sıhhatli bir takip için kodlamaya gerek duyulmaktadır. Kodlama için izelge 5.1 deki yöntem seçilerek uygulanmıştır.

Çizelge 5.1. Deney Kodlaması

Kodlama:	D	B	F
	Deney No	Bağlantı Şekli	Uygulanan Kuvvet

D: Deney no: Her bir değişken için 3 deney yapılması öngörülmüştür. Buna ait kodlama D1, D2 ve D3 şeklindedir. (Di; i=1,2,3)

B: Bağlantı Şekli; Numunenin test cihazına bağlantı şekli olarak tanımlanmaktadır. Çizelge5.2 de bağlantı şekli kodlaması verilmektedir.

Çizelge 5.2. Numune bağlantı kodlaması.

Bağlantı Kodu (B)	Bağlantı durumu
	iki uçtan bağlantı
1	Ön gerilme uygulamadan
2	Çeki ön gerilmesi uygulayarak
3	Bası ön gerilmesi uygulayarak
	Dört uçtan bağlantı
4	Ön gerilme olmadan
5	Çeki-çeki ön gerilmesi uygulayarak
6	Bası-bası ön gerilmesi uygulayarak
7	Çeki-bası (kayma) ön gerilmesi uygulayarak

F: Uygulanan Kuvvet; Çizelge 5.3 de numunelere uygulanan kuvvetin kodlaması gösterilmektedir.

Çizelge 5.3. Uygulanan kuvvet kodlaması

Kuvvet Kodu (F)	Kuvvet (kN)
1	0
2	2
3	4
4	6

5.4. Grafiksel Değerlendirmenin ıkartılması

Temel olarak dört grafik elde edilmiş olup bu grafiklerden konu ve isteğe göre farklı grafiklerde elde edilebilmektedir. Temelde elde edilen grafikler şunlardır:

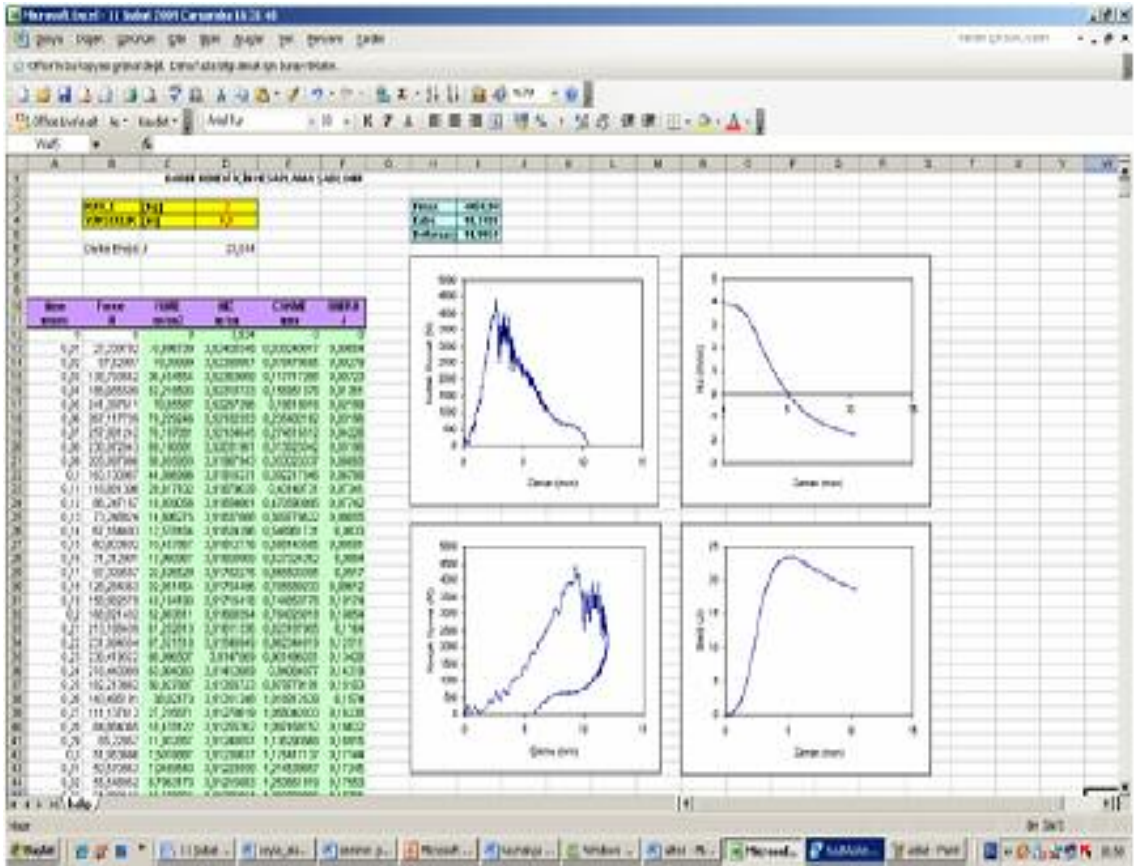
1. Kuvvet- Zaman Grafiği: Numunenin vurucu uca uyguladığı tepki kuvvetinin zamanla değişimini veren grafikdir.

2. İvme-Zaman Grafiği: Değişik darbe enerjilerinde hızın zamanla değişimini veren grafikdir.

3. Kuvvet-kme Grafiği: Temas kuvvetine göre numunedeki çökmeyi veren grafikten apsorbe edilen enerjiyi görebiliriz.

4. Enerji -Zaman Grafiği: Darbe enerjisini ve apsorbe edilen enerjiyi veren grafiklerdir.

Deney başlangıcında bilgisayarda proje kapsamında alınan Labview programı kullanarak veriler kuvvet sensöründen bilgisayara aktarılmıştır. Alınan veriler daha sonra Excel programı kullanarak gerekli grafiklerin oluşturulması sağlanmıştır. şekil 5.3 de verilerin kullanıldığı Excel rneği gösterilmiştir.



Şekil 5.3. Grafik hesapları yapılan excel dosyası

İlk iki veri sütunu sensörden okunan değerleri, diğer dört sütun ise formülize edilmiş değerleri göstermektedir. Bu değerlere göre grafikler çıkartılmıştır.

6. DENEYSEL SONUÇLAR

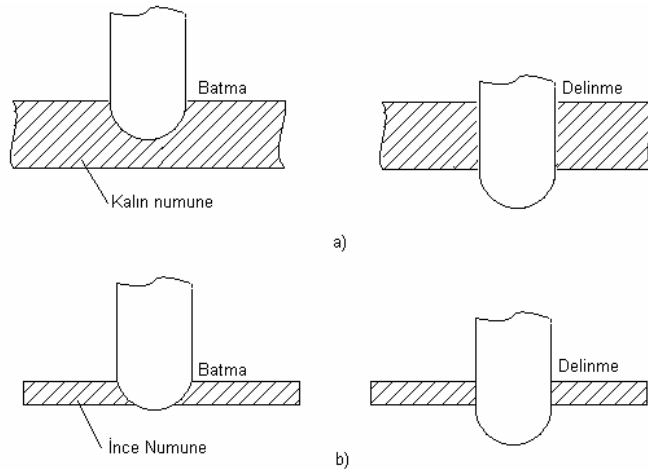
6.1. Düşük Hızlı Darbe Test Grafiklerinin Yorumlanması

Deneysel sonuçlarda elde edilen grafiksel değerlerin yorumlanabilmesi için öncelikle darbe esnasında oluşan olayların tanımlanması gerekmektedir. Bu amaçla aşağıda darbe olayları ve grafiklerin ne anlam taşıdığı ifade edilmiş olup, daha sonra değerlendirmelere geçilmiştir.

6.1.1. Batma ve Batma Başlangıcı

Bu kısımda elde edilen verilerle oluşturulmuş grafiklerin genel anlamda nasıl yorumlanacağı açıklanacak, ardından deney yorumlarına geçilecektir. Genelde, delinme başlangıcı; vurucu ucun uç kısmının numune arka yüzeyine yaklaştığındaki absorbe enerjisi delme başlangıcı da vurucu ucun ilk anda geri sekmesinden elde edilen darbe enerjisi olarak tanımlanabilir.

Batma olayı, yarı küresel ucun numuneye tamamen girmesi olarak alınmalıdır, bu durumda numune şekil 6.1a da görüldüğü gibi yeterince kalın olmalıdır. Bununla birlikte numune kalınlığının yarı küresel uca göre ince olması durumunda da batmanın incelenmesi oldukça zorlaşacaktır. Bu çalışmada numune ortalama kalınlığı 2.0mm iken vurucu uç burnu 6mm yarıçapında yarıküresel olarak seçilmiştir.



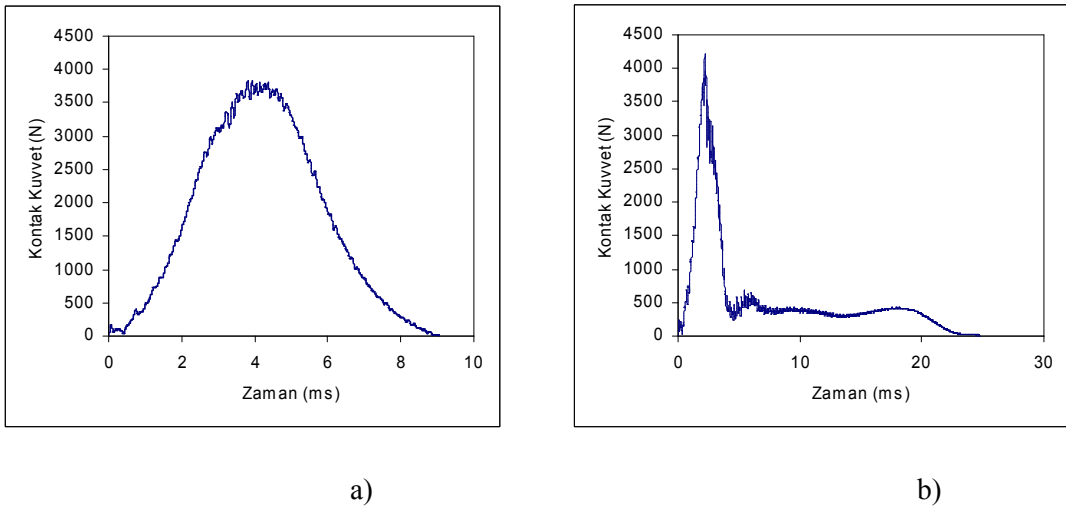
Şekil 6.1. Kalın ve ince numunelerde batma ve delinme olayı [44].

6.1.2. Temas Kuvveti-Zaman Grafik Yorumu

Temas kuvveti numunenin vurucu uca uyguladığı tepki kuvvetidir İlk belirtide, temas zamanına göre temas kuvvetinin değişmesi bir veri toplama sistemi ile incelenmiştir.

Şekil 6.2 da genel itibarı ile karşılaşılabileceğimiz iki farklı kuvvet-zaman eğrisini gösterilmiştir. Şekil 6.2a daki gibi darbe enerjisi düştüğünde yük zaman eğrisi parabolik şekildedir ve maksimum temas kuvveti darbe enerjisinin artmasıyla artar.

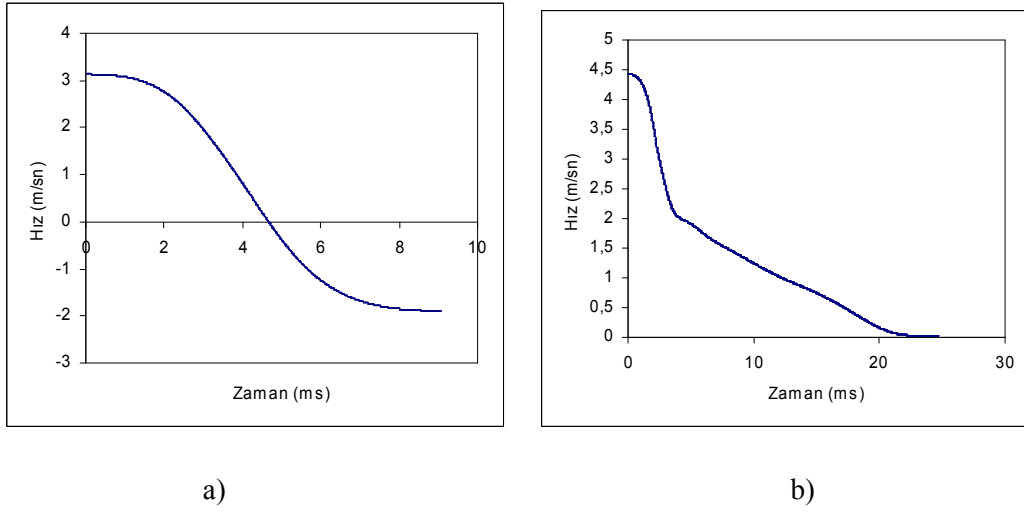
Şekil 6.2b de görülen temas kuvveti aniden düşen benzer yük-çökme eğrileri, numunenin darbeden etkilenmeyen alt yüzeydeki fiberlerin eğilmeden kaynaklanan kırılmanın sebep olduğu numune ve vurucu uç arasındaki anlık temas kaybını gösterir.



Şekil 6.2. a) Delinme Olayı Gerçekleşmeyen (teorik)Kuvvet Zaman Grafiği b) Delinme Olayı Olduğundaki Kuvvet-Zaman Grafiği

6.1.3. Hız-Zaman Grafik Yorumu

Gerçek zamanla hız değişimi deney sonuçlarında gösterilmiştir. Zamanın sıfır olduğu anda yani darbe başlangıcında her bir eğri en yüksek değerdedir. Delinmeyen numunelerde, hız zaman göre azalır ve maksimum çökme anında sıfır olur. Daha sonra negatif değerler geri sekme durumunu gösterir şekil 6.3a. Bunun yanında delinen numunelerde geri sekme olmadığı için negatif kısımlar yoktur şekil 6.3b.

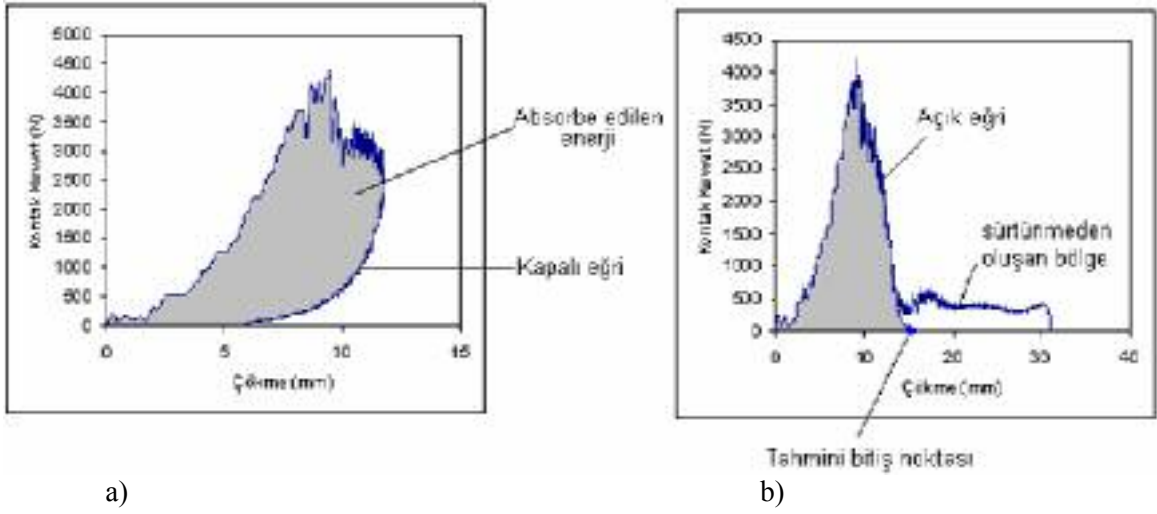


Şekil 6.3. a) Delinmenin Gerçekleşmediği Durumdaki Hız-zaman Grafiği b) Delinmenin Gerçekleştiği Durumdaki Hız-zaman Grafiği

6.1.4. Kuvvet-Çökme Grafik Yorumu

Şekil 6.4 'de bir darbe olayındaki iki çeşit kuvvet-çökme eğrisi karşılaştırılmıştır. Şekil 6.4a ve 6.4b deki taralı alanlar, darbe testi esnasında sonuçlanan açık ve kapalı iki tip eğride numune tarafından absorbe edilen enerjiler görülmektedir. Açık tip yük-çökme eğrisinin son kısmında yatay giden çizgi numunenin delindiğini ve vurucu ucun yüzeye sürtündüğünü göstermektedir. Bu durumda absorbe edilen enerji değerini tam olarak tanımlayabilmek için sürtünmeye ait kısım eğriden çıkartılmalıdır. Bu amaçla yük-çökme eğrisinin sağ tarafında azalan kısmı çökme eksenine doğru indirilir. Bu tip eğriler numunenin delindiği durumda çıkmaktadır şekil 6.4 b.

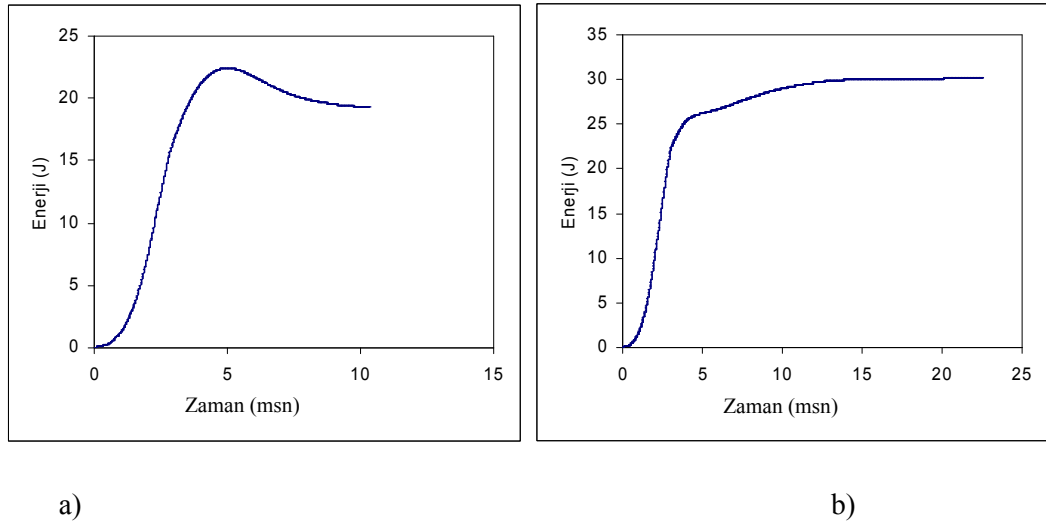
Vurucu ucun geri sektiği (sıçrama yaptığı) numunelerde kapalı tip eğriler çıkmaktadır. Vurucu uç numuneye batmakta fakat delmemektedir. Bu tip eğrilerde absorbe edilen enerji, başlangıç ve sekme hızlarının kullanıldığı başlangıç kinetik enerjisinden sekme kinetik enerjisinin çıkartılması ile hesaplanabilir. Yük-çökme eğrisinden hesaplanan absorbe enerjisi ve kinetik enerji metotları arasındaki fark oldukça küçüktür.



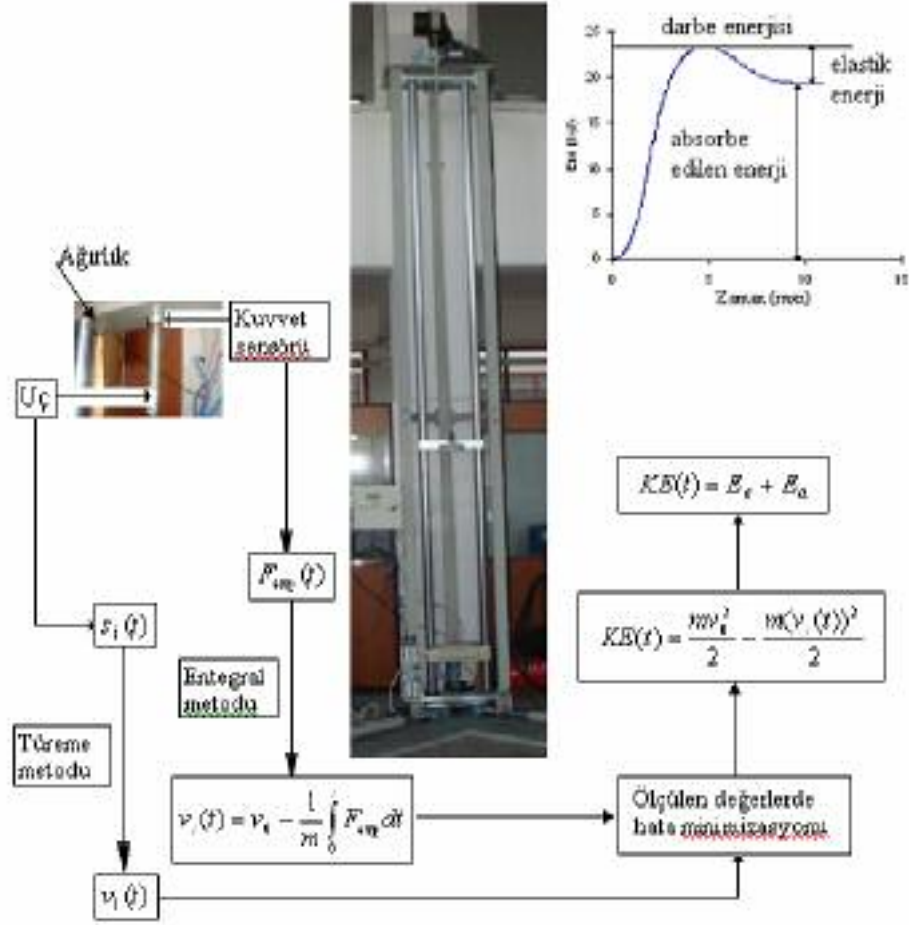
Şekil 6.4. Oluşan iki tip kuvvet- çökme eğrileri, a) açık tip b) kapalı tip

6.1.5. Enerji-Zaman Grafik Yorumu

Enerji-zaman grafiği genel itibarı ile şekil 6.5 deki gibi çıkmaktadır. Burada en üst nokta darbe enerjisini, eğrinin uç noktası da absorbe edilen enerji değerini göstermektedir. Numunenin delinmediği durumlarda şekil 6.5a, numunenin delindiği durumlarda da şekil 6.5b deki gibi oluşmaktadır. Şekil 6.6 da ise grafiklerin elde edilmesinde izlenen yol gösterilmiştir ayrıca enerji zaman grafiğindeki alanlarda belirlenmiştir.



Şekil 6.5. İki tip enerji-zaman eğrisi a) delinmemiş numune b) delinmiş numune için.

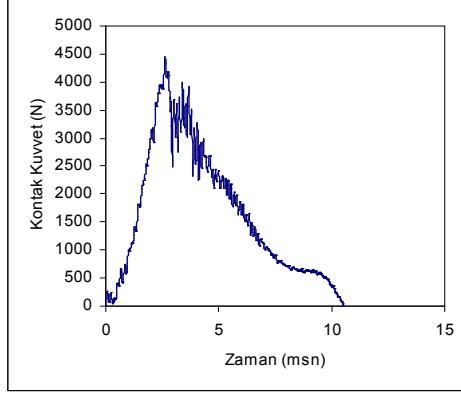


Şekil 6.6. Enerji diyagramı hesap algoritması

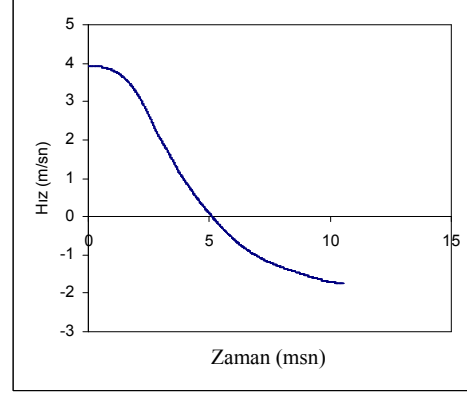
6.2. Deneysel Sonuçlar

Aşağıda, oluşturulan grafik ve numune hasar resimleri gösterilmiştir. Her şart için üçer deney yapıp ortalamaları alınmıştır. Aşağıdaki şekillerden; şekil 6.7 ve 6.8 [0/90]_s 8 tabakalı epoxy/cam elyaf kompozit malzemenin dört taraftan ankastre bağlı şekilde, 0,8m yükseklikte, 3kg sabit ağırlıkta yüksüz durumu için üç deney yapılmış olup bunların ortalamasını gösteren deney sonucudur, şekil 6.9-6.14 arası çeki-çeki öngerilmeli olup numunelere sırasıyla 2kN, 4kN ve 6kN' luk yükler uygulanmıştır, şekil 6.15-6.20 arası bası-bası öngerilmeli olup numunelere sırasıyla 2kN, 4kN ve 6kN' luk yükler uygulanmıştır ve şekil 6.21-6.26 arası çeki-bası öngerilmeli olup numunelere sırasıyla 2kN, 4kN ve 6kN' luk yükler uygulanmıştır ve diğer değişkenler sabit tutularak deneyler yapılmış, öncelikle elde edilen grafikler ve hasar resimleri teker teker gösterilmiş daha sonra grafikler aynı grup içinde bir araya getirilerek yorumu yapılmıştır.

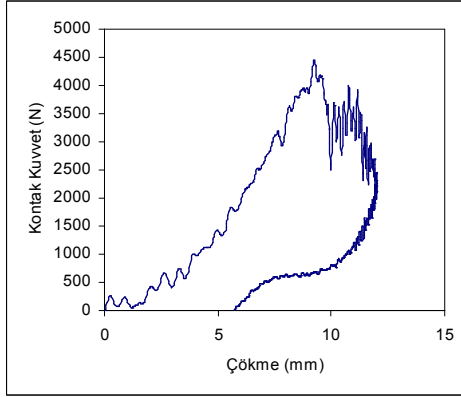
Deney adı : D1-4-1



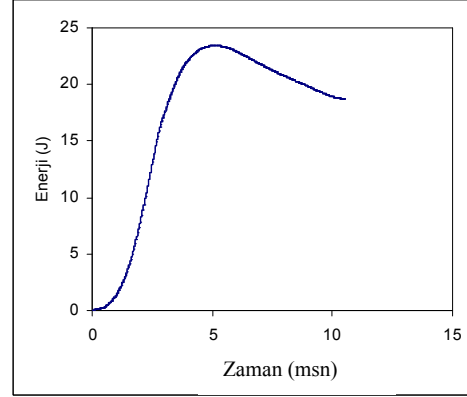
a)



b)



c)



d)

Şekil 6.7. $[0/90]_{2s}$ kompozit plak için yüksüz durumda oluşan; a) kuvvet-zaman, b) hız-zaman, c) kuvvet - çökme ve d) enerji-zaman eğrileri.



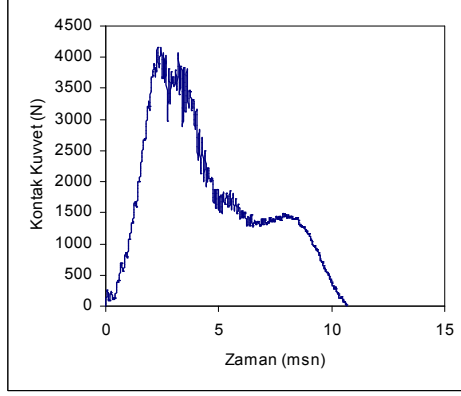
a)



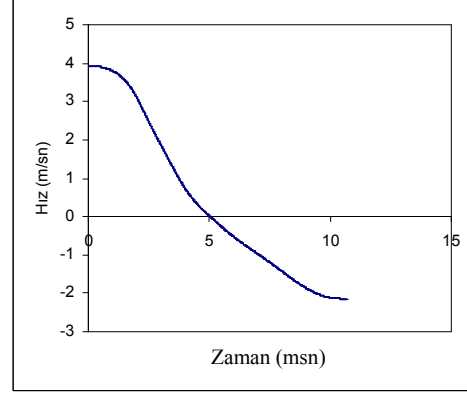
b)

Şekil 6.8. $[0/90]_{2s}$ kompozit plak için yüksüz durumda oluşan; a) numune önü, b) numune arkası hasar durumu

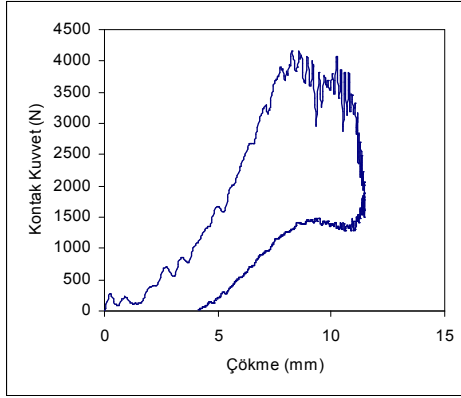
Deney adı : D2-5-2



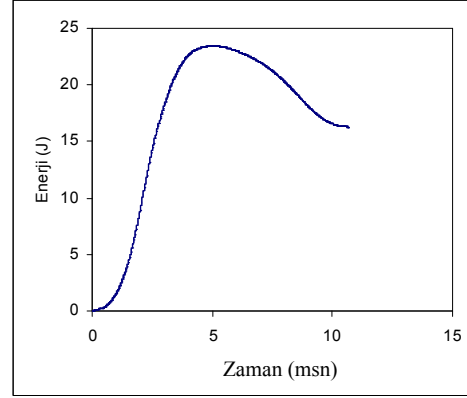
a)



b)



c)



d)

Şekil 6.9. $[0/90]_{2s}$ kompozit plak için çeki-çeki öngerilmeli $2kN'$ da oluşan; a) kuvvet-zaman, b) hız-zaman, c) kuvvet - çökme ve d) enerji-zaman eğrileri.



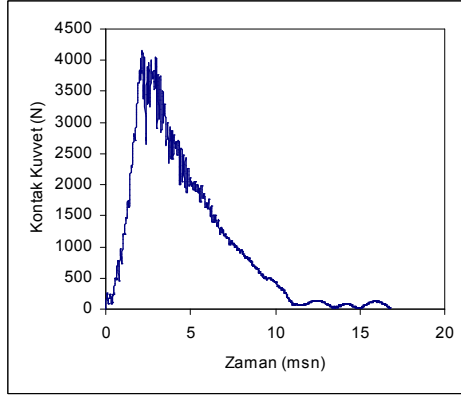
a)



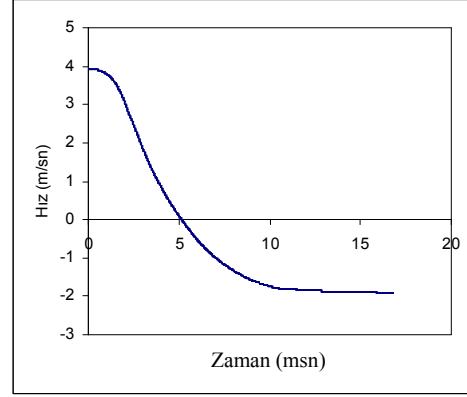
b)

Şekil 6.10. $[0/90]_{2s}$ kompozit plak için çeki-çeki öngerilmeli $2kN'$ da oluşan; a) numune önü, b) numune arkası hasar durumu

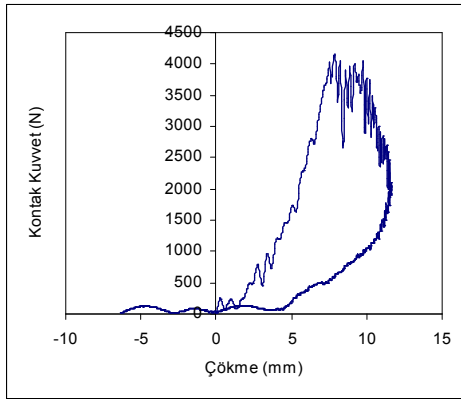
Deney adı : D3-5-3



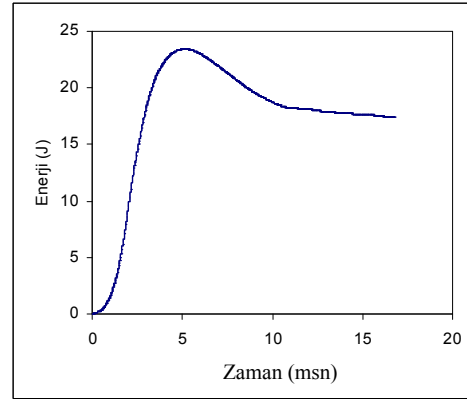
a)



b)



c)



d)

Şekil 6.11. $[0/90]_{2s}$ kompozit plak için çeki-çeki öngerilmeli 4kN'da oluşan; a) kuvvet-zaman, b) hız-zaman, c) kuvvet - çökme ve d) enerji-zaman eğrileri.



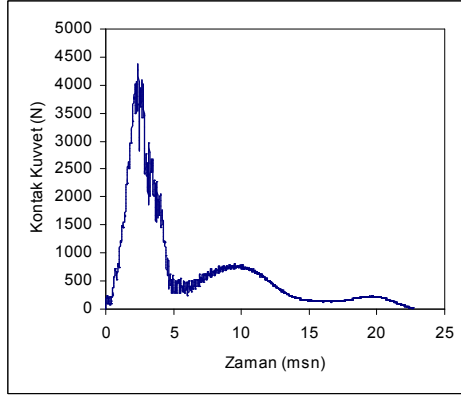
a)



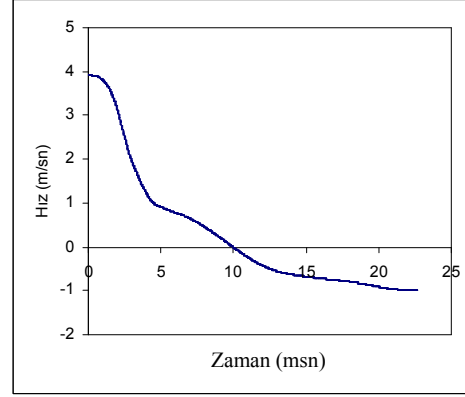
b)

Şekil 6.12. $[0/90]_{2s}$ kompozit plak için çeki-çeki öngerilmeli 4kN'da oluşan; a) numune önü, b) numune arkası hasar durumu

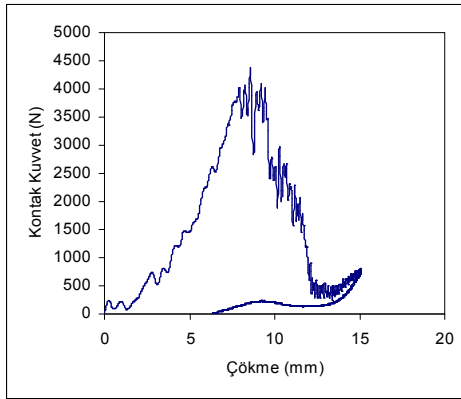
Deney adı : D4-5-4



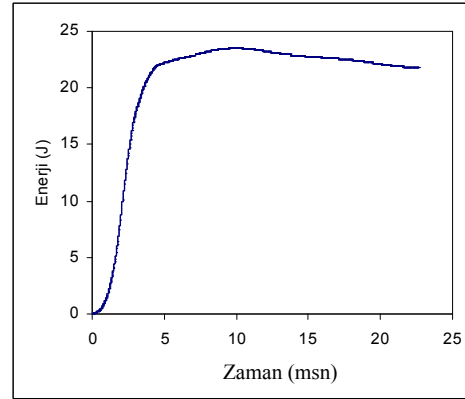
a)



b)



c)



d)

Şekil 6.13. $[0/90]_{2s}$ kompozit plak için çeki-çeki öngerilmeli 6kN'da oluşan; a) kuvvet-zaman, b) hız-zaman, c) kuvvet - çökme ve d) enerji-zaman eğrileri.



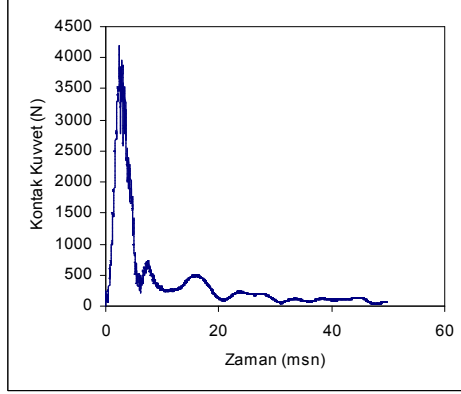
a)



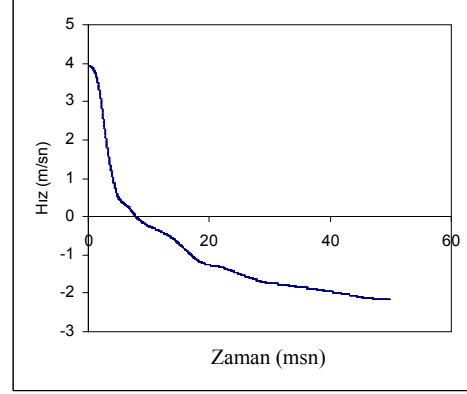
b)

Şekil 6.14. $[0/90]_{2s}$ kompozit plak için çeki-çeki öngerilmeli 6kN'da oluşan; a) numune önü, b) numune arkası hasar durumu

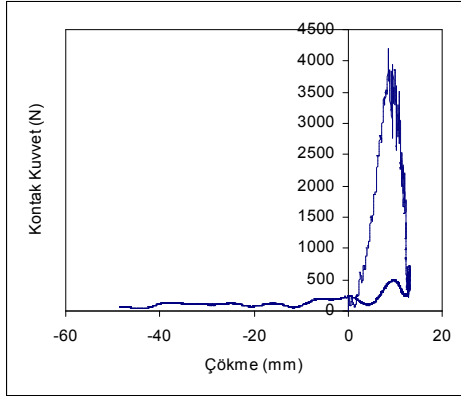
Deney adı : D5-6-2



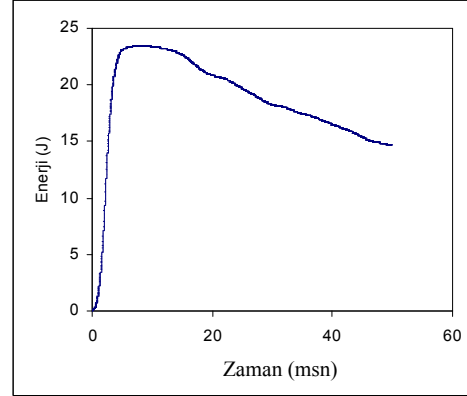
a)



b)



c)



d)

Şekil 6.15. $[0/90]_{2s}$ kompozit plak için bası-bası öngerilmeli $2kN^2$ da oluşan; a) kuvvet-zaman, b) hız-zaman, c) kuvvet - çökme ve d) enerji-zaman eğrileri.



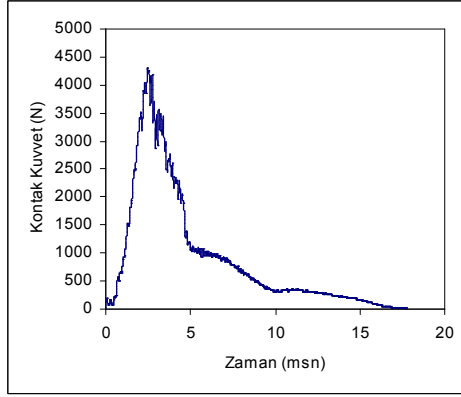
a)



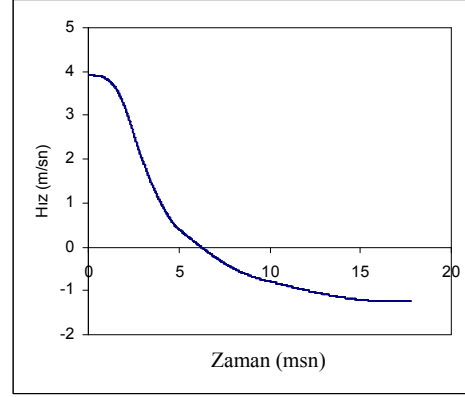
b)

Şekil 6.16. $[0/90]_{2s}$ kompozit plak için bası-bası öngerilmeli $2kN^2$ da oluşan; a) numune önü, b) numune arkası hasar durumu

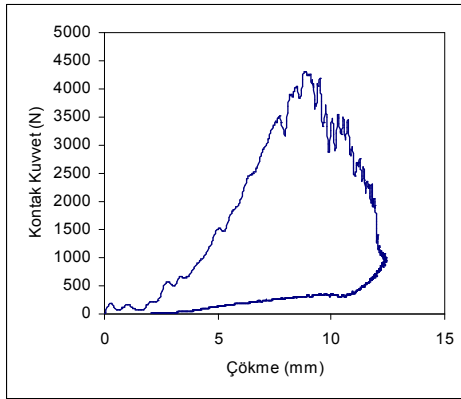
Deney adı : D6-6-3



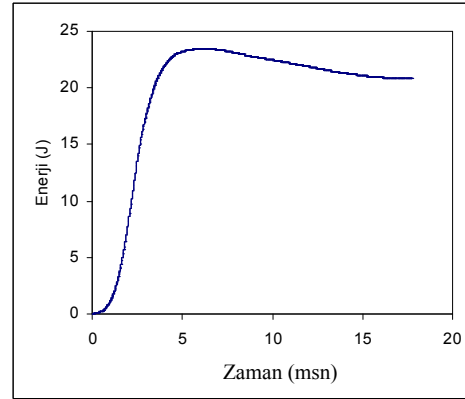
a)



b)



c)



d)

Şekil 6.17. $[0/90]_{2s}$ kompozit plak için bası-bası öngerilmeli 4kN'da oluşan; a) kuvvet-zaman, b) hız-zaman, c) kuvvet - çökme ve d) enerji-zaman eğrileri.



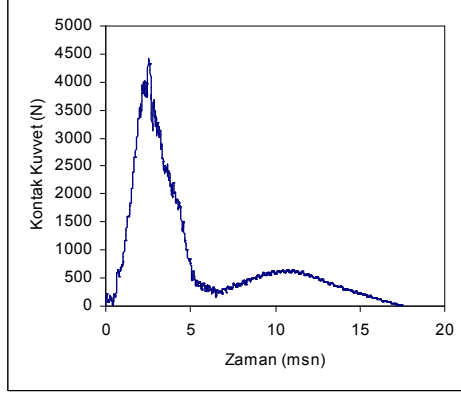
a)



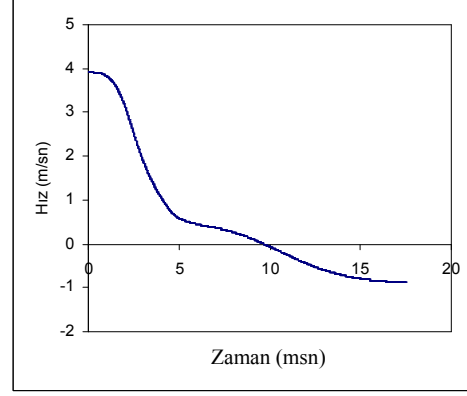
b)

Şekil 6.18. $[0/90]_{2s}$ kompozit plak için bası-bası öngerilmeli 4kN'da oluşan; a) numune önü, b) numune arkası hasar durumu

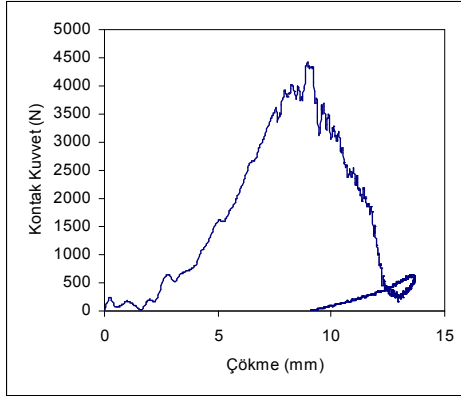
Deney adı: D7-6-4



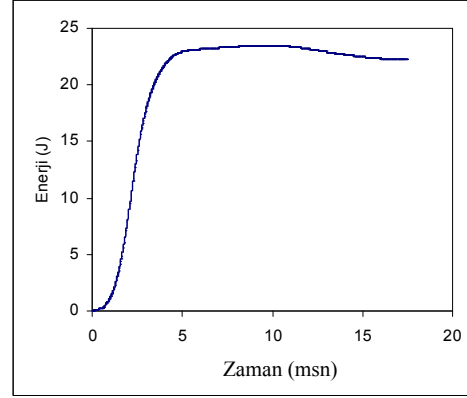
a)



b)



c)



d)

Şekil 6.19. $[0/90]_{2s}$ kompozit plak için bası-bası öngerilmeli 6kN'da oluşan; a) kuvvet-zaman, b) hız-zaman, c) kuvvet - çökme ve d) enerji-zaman eğrileri.



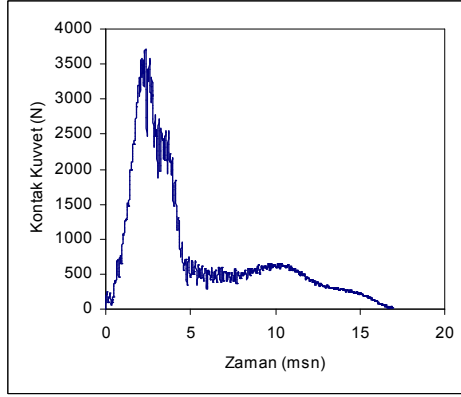
a)



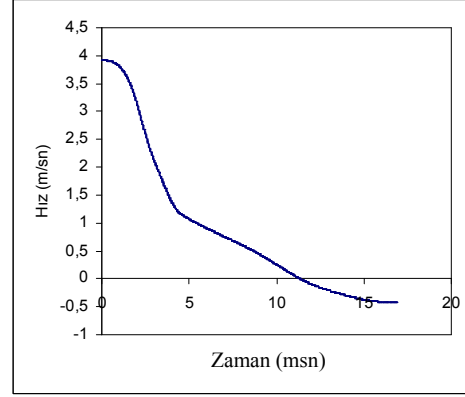
b)

Şekil 6.20. $[0/90]_{2s}$ kompozit plak için bası-bası öngerilmeli 6kN'da oluşan; a) numune önü, b) numune arkası hasar durumu

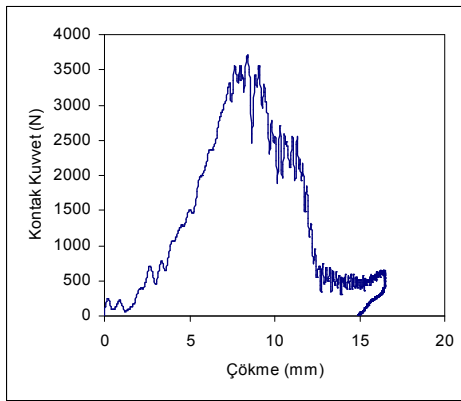
Deney adı: D8-7-2



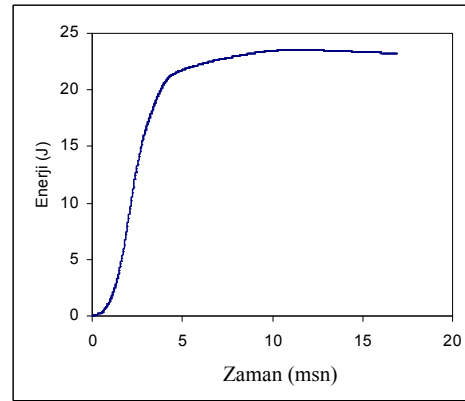
a)



b)



c)



d)

Şekil 6.21. $[0/90]_{2s}$ kompozit plak için çeki-bası öngerilmeli $2kN'$ da oluşan; a) kuvvet-zaman, b) hız-zaman, c) kuvvet - çökme ve d) enerji-zaman eğrileri.



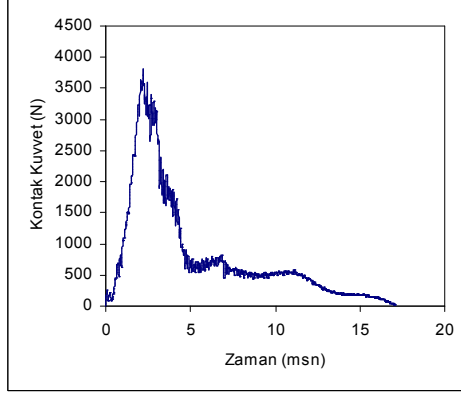
a)



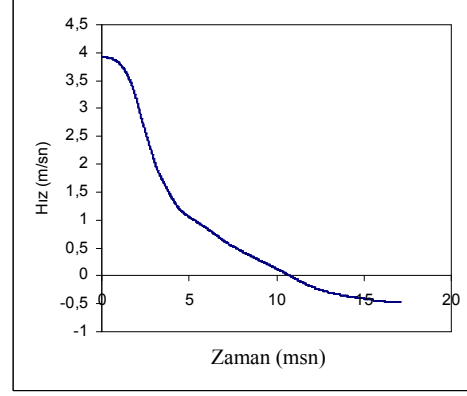
b)

Şekil 6.22. $[0/90]_{2s}$ kompozit plak için çeki-bası öngerilmeli $2kN'$ da oluşan; a) numune önü, b) numune arkası hasar durumu

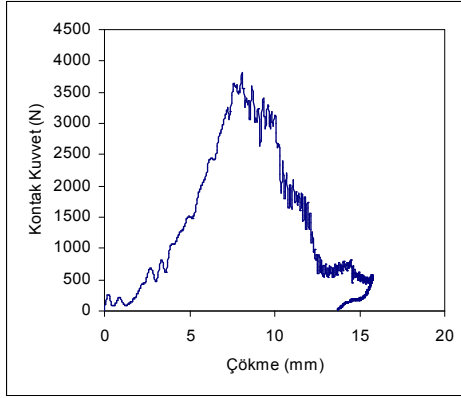
Deney adı: D9-7-3



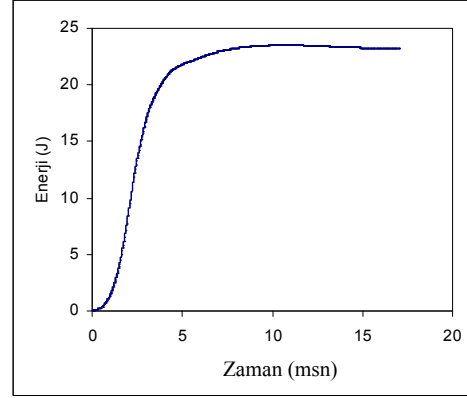
a)



b)



c)



d)

Şekil 6.23. $[0/90]_{2s}$ kompozit plak için çeki-bası öngerilmeli $4kN'$ da oluşan; a) kuvvet-zaman, b) hız-zaman, c) kuvvet - çökme ve d) enerji-zaman eğrileri.



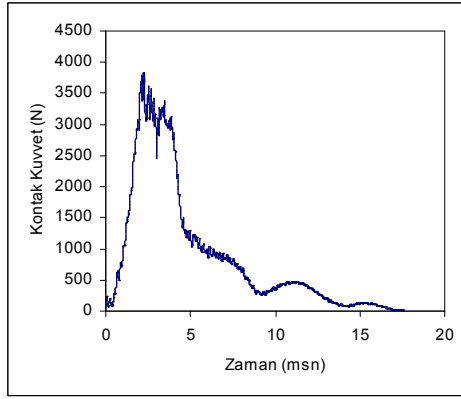
a)



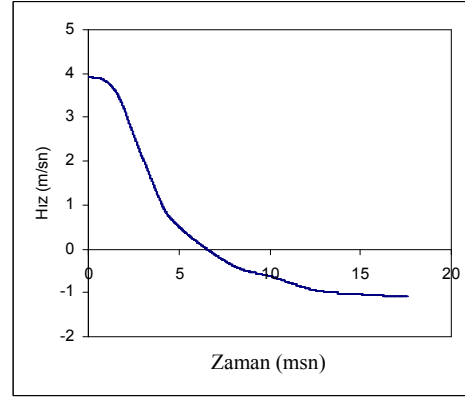
b)

Şekil 6.24. $[0/90]_{2s}$ kompozit plak için çeki-bası öngerilmeli $4kN'$ da oluşan; a) numune önü, b) numune arkası hasar durumu

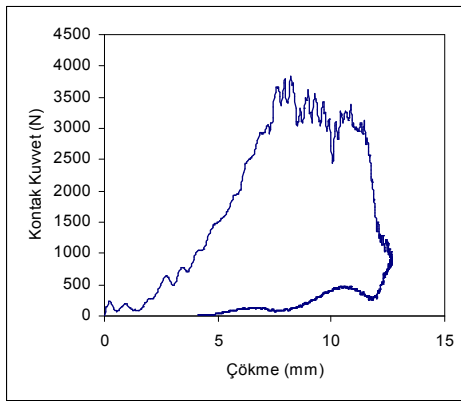
Deney adı: D10-7-4



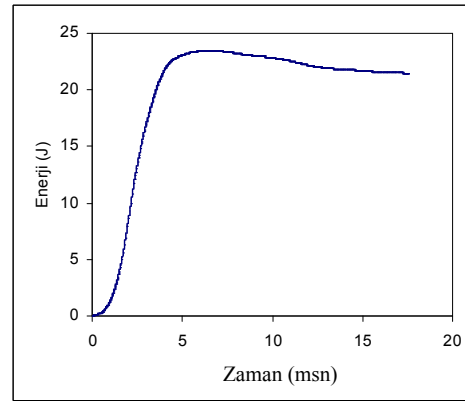
a)



b)



c)



d)

Şekil 6.25. $[0/90]_{2s}$ kompozit plak için çeki-bası öngerilmeli $6kN'$ da oluşan; a) kuvvet-zaman, b) hız-zaman, c) kuvvet - çökme ve d) enerji-zaman eğrileri.



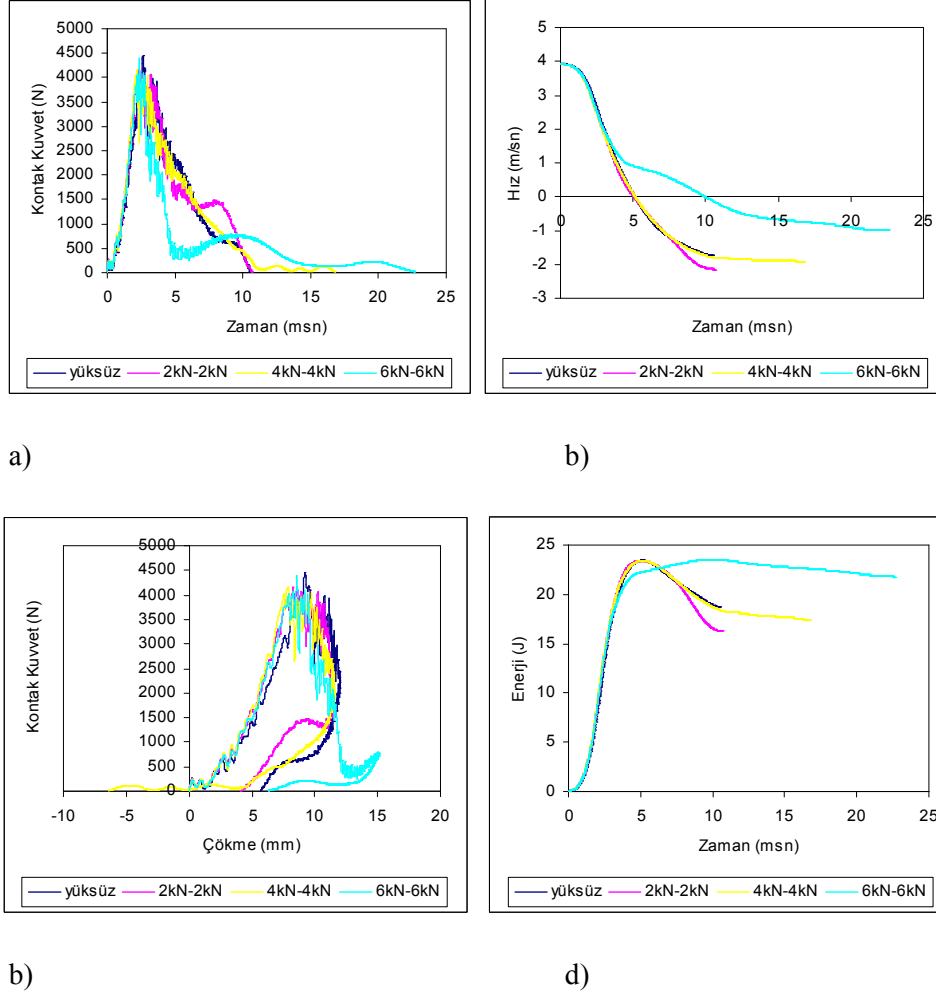
a)



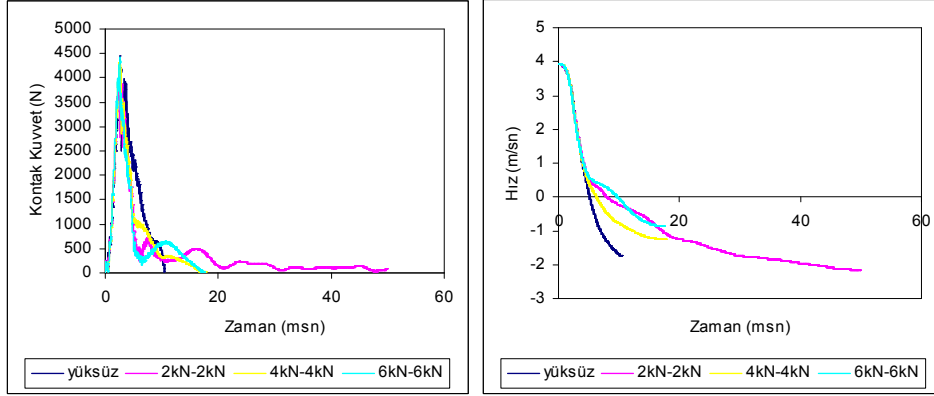
b)

Şekil 6.26. $[0/90]_{2s}$ kompozit plak için çeki-bası öngerilmeli $6kN'$ da oluşan; a) numune önü, b) numune arkası hasar durumu

Şekil 6.27’de çeki-çeki, Şekil 6.28’de bası-bası ve Şekil 6.29’de çeki-bası öngerilmelilerle yüksüz durumdaki deneylerden elde edilen grafikler birleştirilerek gösterilmiştir.

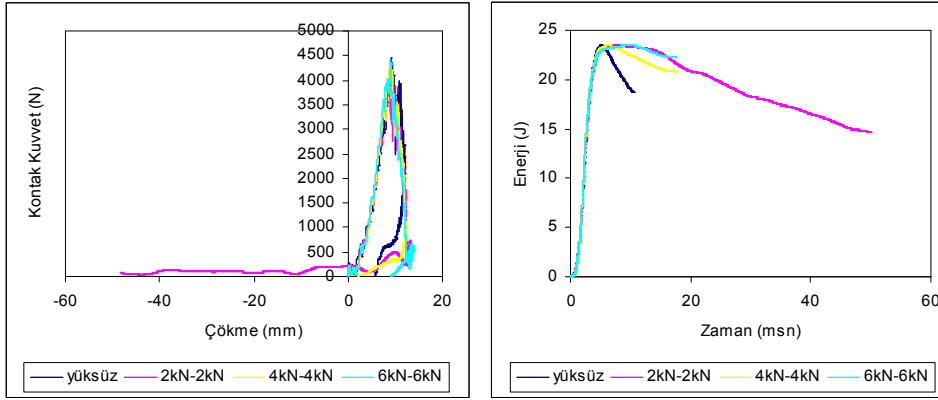


Şekil 6.27. $[0/90]_{2s}$ kompozit plak için çeki-çeki öngerilmeli ve yüksüz durumda oluşan; a) kuvvet-zaman, b) hız-zaman, c) kuvvet - çökme ve d) enerji-zaman eğrileri.



a)

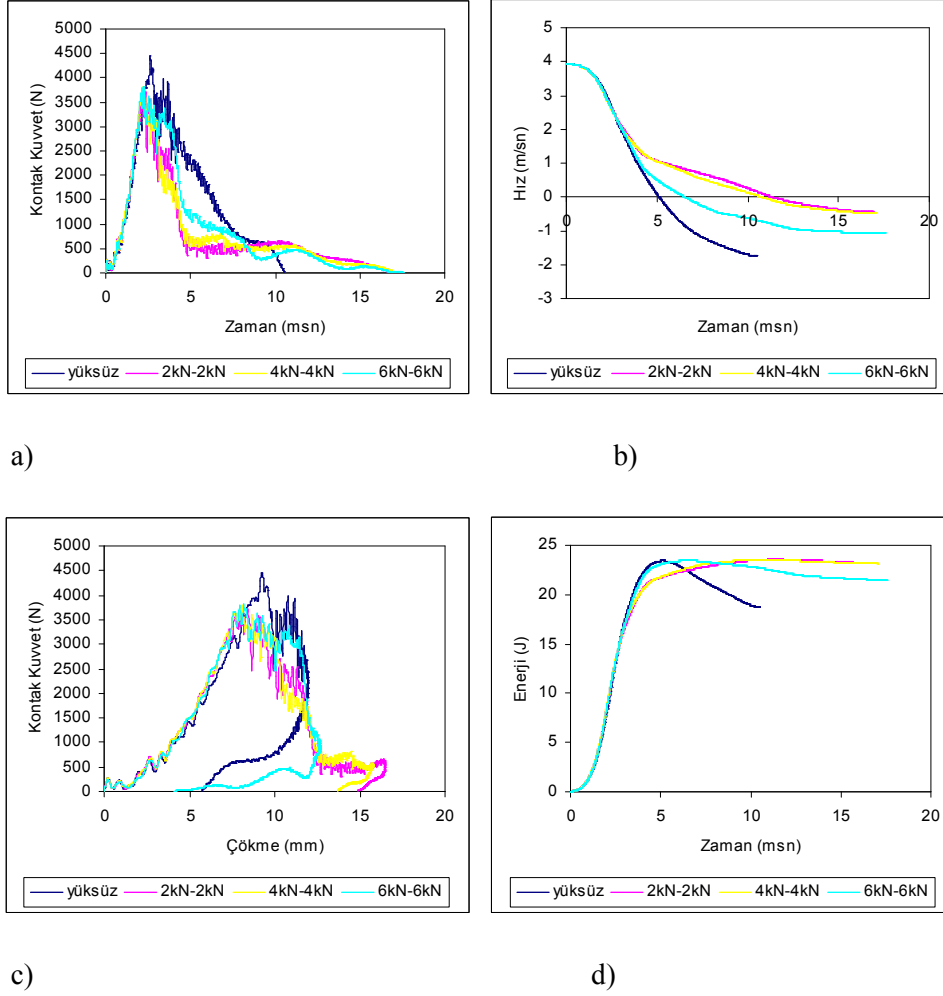
b)



b)

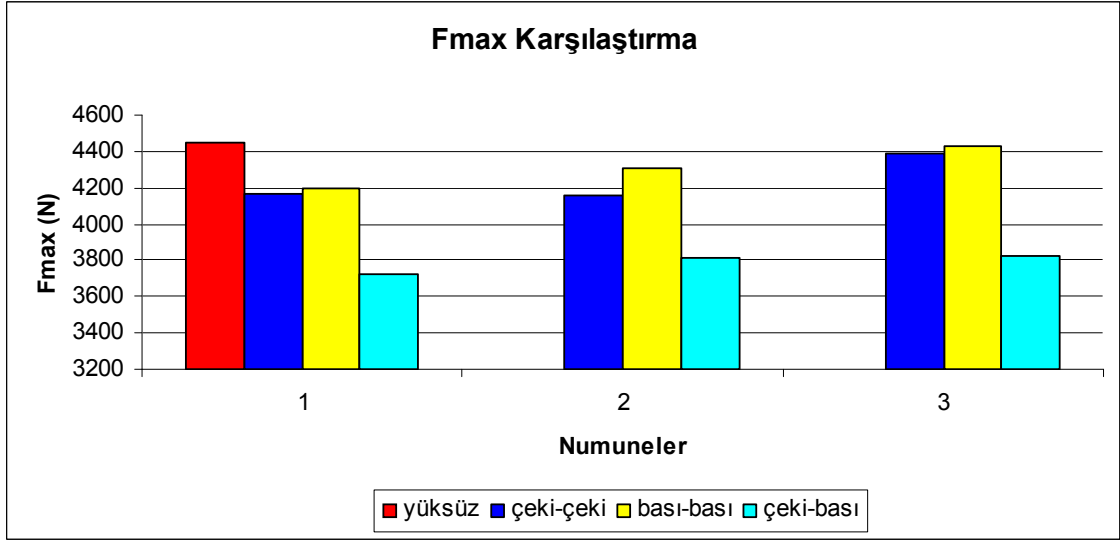
d)

Şekil 6.28. $[0/90]_{2s}$ kompozit plak için bası-bası öngerilmeli ve yüksüz durumda oluşan; a) kuvvet-zaman, b) hız-zaman, c) kuvvet - çökme ve d) enerji-zaman eğrileri.



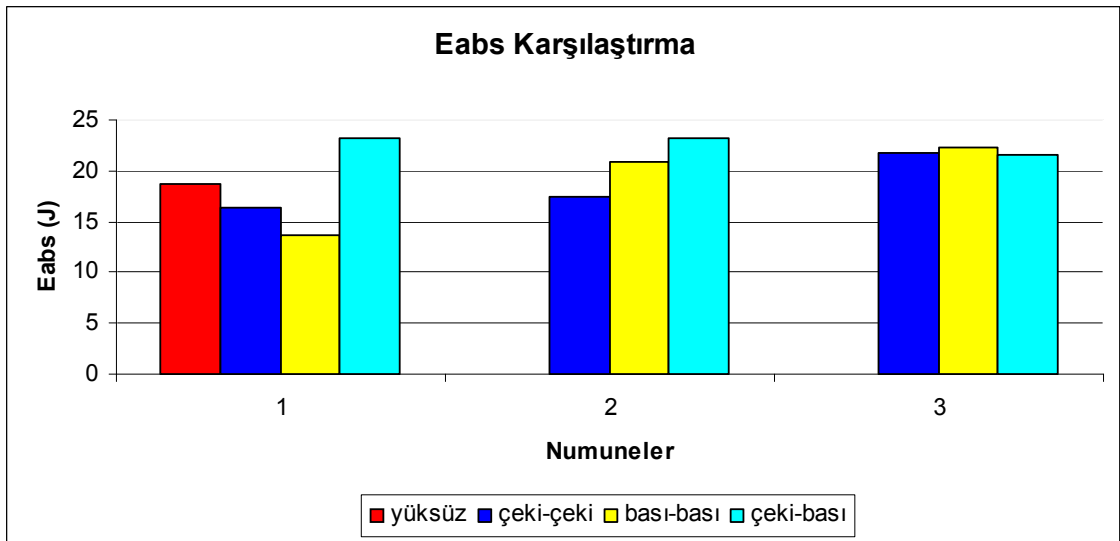
Şekil 6.29. $[0/90]_{2s}$ kompozit plak için çeki-bası öngerilmeli ve yüksüz durumda oluşan; a) kuvvet-zaman, b) hız-zaman, c) kuvvet - çökme ve d) enerji-zaman eğrileri.

Elde edilen grafiklerin yanında numunede oluşan hasar durumlarını göstermek amacı ile darbe sonucu numunenin ön ve arka kısımlarında oluşan hasar resimleri her test grafiği altında gösterilmiştir. Şekil 6.30' de $[0/90]_{2s}$ kompozit plak için; yüksüz, çeki-çeki, bası-bası ve çeki bası deneylerinden elde edilen maksimum kuvvet cinsinden karşılaştırmalar verilmiştir.



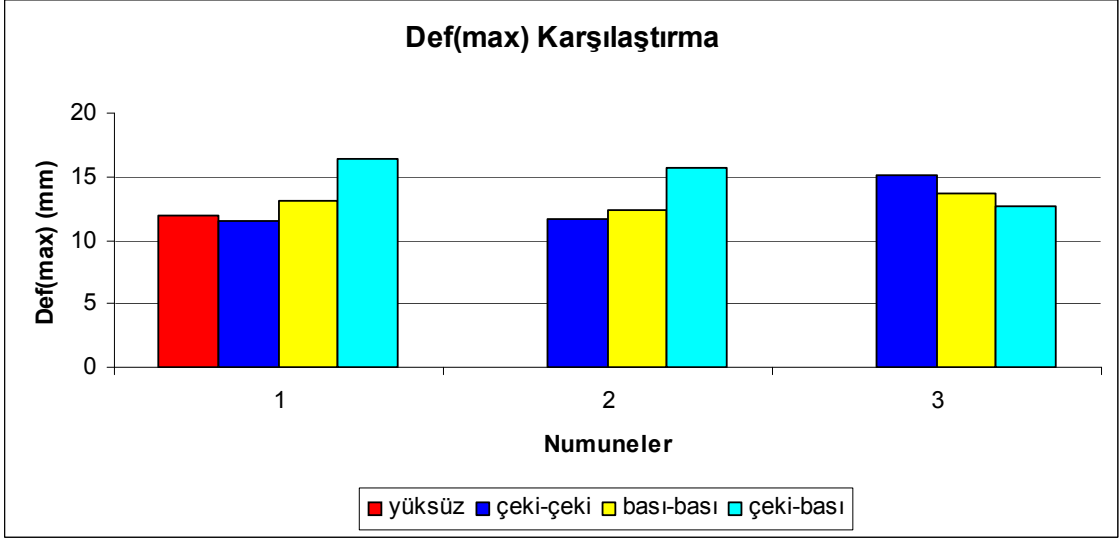
Şekil 6.30. $[0/90]_{2s}$ kompozit plak için; maksimum kuvvet karşılaştırması

Şekil 6.31' de $[0/90]_{2s}$ kompozit plak için; yüksüz, çeki-çeki, bası-bası ve çeki bası deneylerinden elde edilen; absorbe edilen enerji miktarı cinsinden karşılaştırmalar verilmiştir.



Şekil 6.31. $[0/90]_{2s}$ kompozit plak için; absorbe edilen enerji miktarları

Şekil 6.32' de $[0/90]_{2s}$ kompozit plak için; yüksüz, çeki-çeki, bası-bası ve çeki bası deneylerinden elde edilen; deformasyon karşılaştırmalar verilmiştir.



Şekil 6.32. $[0/90]_{2s}$ kompozit plak için; deformasyon karşılaştırmaları

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Düşük hızlı darbe deneyleri, TÜBİTAK Kariyer Projesi kapsamında özgün bir çalışma olarak tasarlanan ve imal edilen, mekanik laboratuvarında bulunan test düzeneği üzerinde yapılmıştır.

Deney numunesi olarak seçilen Epoxy/cam elyaf kompozit malzemesi İzmir’de bulunan İzoreel firmasında istekler doğrultusunda üretilmiştir. Numuneler $[0/90]_s$ oryantasyon açılarında 8 tabakalı ve simetrik olarak ortalama 2mm kalınlığında olup ebatlar 140x140mm olarak seçilmiştir.

Bu çalışmada, düşük hızlı darbe etkisi altındaki Epoxy/cam elyaf kompozit malzemede öngerilme etkisi incelenmiştir.

7.1. Sonuçlar

- Maksimum kuvvet yüksüz durumda elde edilmiştir.
- Elde edilen verilere göre maksimum kuvvet büyükten küçüğe doğru sıralanacak olursa; yüksüz, bası-bası, çeki-çeki ve çeki bası öngerilmesinde elde edilmiştir.
- Öngerilme miktarı artıkça maksimum kuvvet artmaktadır.
- Apsorbe edilen enerji miktarı, maksimum çeki-bası önerilmesindedir.
- Çeki-çeki ve bası-bası deneylerinde öngerilme miktarı artıkça absorbe edilen enerji miktarı artmaktadır.
- Maksimum deformasyon çeki-bası öngerilmesinde olmuştur
- Çeki-çeki ve bası-bası deneylerinde ön gerilme miktarı artıkça deformasyon miktarı artmaktadır.
- Numunelerde öngerilmesiz durumda en az hasar olduğu tespit edilmiştir.
- Öngerilme etkisiyle malzemenin direngenliği (rijitliği) artmaktadır. Bundan dolayı malzemenin esneme kabiliyeti azaldığı için enerji daha fazla hasarla sonuçlanmaktadır.

7.2. Öneriler

- Bası-bası öngerilmesinde bu malzemedede, 8kN ve üzerinde kritik burkulmaya geçtiği için dayanımı çok düşmektedir. Bundan dolayı, kullanılacak malzemeye göre bası-bası deneylerinde kritik burkulma yükünün hesaplanması gerekir.
- Numuneye uygulanan çeki-bası durumunda öngerilme artıkça deformasyon miktarı azaldığı için; çeki-bası ön yüklemelerinde öngerilme miktarının yüksek olması önerilir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- [1] Sjoblem, P.O., Hartness, J.T. and Cordell, T.M., On low velocity impact testing of composite materials J Compos. Matei , 22, 30-52, (1988).
- [2] Shivakumar, K.N., Elber, W. and IUG, W., Prediction of low velocity impact damage in thin circular laminates, AIAA J, 23(3), 442-449, (1988).
- [3] Ceyhun, V., & Turan, M., Tabakalı Kompozit Malzemelerin Darbe Davranışı. Mühendis ve Makine, Sayı 516, (2003).
- [4] M.S.Ersoy., Lif Takviyeli Polimerik Kompozit Malzeme tasarımı, Kahramanmaraş sütçü imam üniv, (2005).
- [5] Kim, J.K., & Sham, M.L., Impact and delamination failure of woven-fabric composites. Composites Science and Technology, Vol:60, p:745–761, (2000).
- [6] Naik, N.K., Sekher, Y.C., & Meduri, S., Damage in woven-fabric composites subjected to low-velocity impact. Composites Science and Technology, Vol:60, p:731–744, (2000).
- [7] Hou, J.P., Petrinic, N., Ruiz, C., & Hallett, S.R., Prediction of impact damage in composite plates. Composites Science and Technology, Vol:60, p:273-281, (2000).
- [8] Davies, G.A.O., Hitchings, D., & Zhou, G., Impact damage and residual strengths of woven fabric glass/polyester laminates. Composites: Part A, Vol.:27A, p:1147–1156, (1996).
- [9] Sohn, M.S., Hu, X.Z., Kim, J.K., & Walker, L., Impact damage characterisation of carbon fibre/epoxy composites with multi-layer reinforcement. Composites: Part B, Vol:31, p:681–691, (2000).
- [10] Sjögren, A., Krasnikovs, A., & Varna, J., Experimental determination of elastic properties of impact damage in carbon fibre/epoxy laminates. Composites: Part A, Vol:32, p:1237–1242, (2001).
- [11] Abrate, S., Impact on laminated composites. Appl. Mech. Rev. Vol:44(4), p:155–90, (1991).
- [12] Abrate, S., Impact on laminated composites: recent advances. Amer Soc Mech Eng Vol:47(11), p:517–44, (1994).
- [13] Abrate, S., Impact on composite structures. Cambridge University Press, (1998).
- [14] Zukus, JA., Penetration and perforation of solids. Impact dynamics. New York, John Wiley;. p:155–214, (1982).
- [15] Robinson P, Davies G., Impactor mass and specimen geometry effects in low velocity impact of laminated composites. Int J.of Impact Eng.12(2):189–207, (1991).
- [16] Hong, S., & Liu, D., On the relationship between impact energy and delamination area. Exp. Mech., p:115–20, (1989).
- [17] Morton, J., & Cantwell., WJ., Comparison of low and high velocity impact response of CFRP. Composites, 20(6):545–51, (1989).

KAYNAKLAR DİZİNİ (devamı)

- [18] Sankar, BV., Low-velocity impact response and damage in composite materials. *Key Eng Mater.*, 121–122, p:549–82, (1996).
- [19] Aslan, Z., Karakuzu, R., ve Okutan, B., The Response of Laminated Composite Plates Under Low-Velocity Impact Loading. *Composite Structures*, Vol:59 p:119–127, (2003).
- [20] Sankar, BV., Low-velocity impact damage in graphite-epoxy laminates subjected to tensile initial stress. *Amer Inst Aeronaut Astronaut*, Vol:24(3), p:470–1, (1984).
- [21] Chiu, ST., Liou, YY., Chang, YC., Ong, CL., Low velocity impact behavior of prestressed composite laminates. *Mater Chem Phys* Vol:47, p:268–72, (1997)
- [22] Schoeppner, GA., Low velocity impact response of tension preloaded composite laminates. In: 10th Do/NASA/FAA Conf on Fibrous Composites in Structural Design, Hilton Head Island, SC, (1993)
- [23] Butcher, BR., The impact resistance of unidirectional CFRP under tensile stress. *Fibre Sci. Technology*. Vol:12(4), p:295–326, (1979).
- [24] Butcher BR, Fernback PJ. Impact resistance of unidirectional CFRP under tensile stress: further experimental variables. *Fibre Sci. Technology*. Vol:14, p:41–58, (1981).
- [25] Kelkar, AD., Sankar, J., Rajeev, K., Analysis of tensile preloaded composites subject to low velocity impact load. *AIAA J*, (1998).
- [26] Robb, MD., Arnold, WS., & Marshall, IH., The damage tolerance of GRP laminates under biaxial prestress. *Compos Struct*, Vol:32, p:141–9, (1995).
- [27] Sun, CT. Chattopadhyay S. Dynamic response of anisotropic laminated plates under initial stress to impact of a mass. *J Appl Mech*, Vol:42, p:693–8, (1975).
- [28] Sun, CT., Chen JK., On the impact of initially stressed composite laminates. *J Compos Mater*, Vol:19, p:490–504. (1985).
- [29] T. Mitrevski, I.H. Marshall, R.S. Thomson, R. Jones., Low-velocity impacts on preloaded GFRP specimens with various impactor shapes. *Composite Structures* 76 p.209–217 (2006).
- [30] B. Whittingham, I.H. Marshall, T. Mitrevski, R. Jones., The response of composite structures with pre-stress subject to low velocity impact damage. *Composite Structures* 66 p.685–698, (2004).
- [31] Kelkar A.D, Sankar J, Grace C. Behavior of tensile preloaded composites subjected to low-velocity impact loads. In: *Recent advances in solids/structures and application of metallic materials*. ASME,;369: 39–46, (1997).
- [32] Herszberg I, Weller T. The impact damage resistance of stitched and unstitched postbuckled carbon/epoxy laminates. In: *Proc. 5th Japan International SAMPE Symposium*, Japan. p. 703–8, (1997).

KAYNAKLAR DİZİNİ (devamı)

- [33] Herszberg I, Weller T, Leong KH, Bannister MK. The residual tensile strength of stitched and unstitched carbon/epoxy laminates impacted under tensile load. In: First Australasian congress on applied mechanics. Melbourne, Australia. p. 309–14,(1996.).
- [34] Belingardi, G., Gugliotta, A. and Vadori, R., Numerical simulation of fragmentation of composite material plates due to impact. *International Journal of Impact Engineering*, Vol:21, p: 335–347, (1998).
- [35] Jih CJ, Sun CT., Prediction of delamination in composite laminates subjected to low velocity impact. *J Compos Mater* Vol:27, p:684–701, (1993).
- [36] Guan Z. ve Yang C., Low-Velocity Impact and Damage Process of Composite Laminates. *Journal of composite materials*, Vol. 36, No. 07, (2002).
- [37] Caprino G, Lopresto V, Iaccarino., A Simple Mechanistic Model to Predict the Macroscopic Response of Fiberglass-Aluminium Laminates Under Low-Velocity Impact. *Composites:Part A* Vol. 38, p:290–300, (2007).
- [38] Luo RK, Gren ER, Morrison CJ., Impact Damage Analysis of Composite Plates. *Int. J. Impact Eng.* Vol 22(5), p:435–47, (1999).
- [39] Hu N, Sekine H, Fukunaga H, Yao ZH., Impact Analysis of Composite Laminates With Multiple Plates. *Int. J. Impact Eng.* Vol 22(7), p:633–48, (1999).
- [40] Belingardi G. ve Vadori R., Influence of the Laminate Thickness in Low Velocity Impact Behaviour of Composite Material Plate. *Composite Structure* Vol:61, p:27–38, (2003).
- [41] Şahin, Y., *Kompozit Malzemelere Giriş*, Gazi Kitabevi, Ankara, (2000).
- [42] MAZUMDAR, S.K., *Composites Manufacturing: Material, Product and Process Engineering*. CRC Pres, Boca Raton London New York Washington, D.C, (2002).
- [43] Stronge, W.J., *Impact Mechanics*. Cambridge, Cambridge University Press. 1-26, (2000).
- [44] C. Ataş and O. Sayman., An Overall View on Impact Response of Woven Fabric Composite Plates, *Composite Structures* 82, 336-345, (2008),
- [45] M. Uyaner and M. Kara., Dynamic Response of Laminated Composites Subjected to Low-Velocity Impact, *Journal of Composite Materials* 41; 2877, (2007).