

**FARKLI KALINLIK ve ORYANTASYON YÜZDELERİNDEKİ
TABAKALI KOMPOZİT LEVHALARIN DÜŞÜK HIZLI DARBE
ENERJİLERİ ALTINDA DAVRANIŞLARININ DENEYSEL
İNCELENMESİ**

DİLEK KARACA

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**NİSAN 2010
ANKARA**

Dilek KARACA tarafından hazırlanan “FARKLI KALINLIK ve ORYANTASYON YÜZDELERİNDEKİ TABAKALI KOMPOZİT LEVHALARIN DÜŞÜK HIZLI DARBE ENERJİLERİ ALTINDA DAVRANIŞLARININ DENEYSEL İNCELENMESİ” adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Müfit GÜLGEÇ

Tez Danışmanı, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Can ÇOĞUN

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Prof. Dr. Müfit GÜLGEÇ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Prof.Dr. Faruk MENDİ

Makine Eğitimi Anabilim, Gazi Üniversitesi

Tarih: 26 / 04 / 2010

Bu tez ile G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Bilal TOKLU

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Dilek KARACA

**FARKLI KALINLIK ve ORYANTASYON YÜZDELERİNDEKİ
TABAKALI KOMPOZİT LEVHALARIN DÜŞÜK HIZLI DARBE ENERJİLERİ
ALTINDA DAVRANIŞLARININ DENEYSEL İNCELENMESİ
(Yüksek Lisans Tezi)**

Dilek KARACA

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
NİSAN 2010**

ÖZET

Bu çalışmanın amacı, farklı kalınlık ve oryantasyon yüzdesindeki tek yönlü karbon tabakalı kompozit levhaların düşük hızlı darbeye karşı cevabının incelenmesidir. Darbe davranışı için incelenen parametreler, darbe enerjisi, oryantasyon yüzdesi, tabaka kalınlığı ve vurucu kütle ağırlığından oluşmaktadır. Ağırlık düşürme test cihazı kullanılarak, her bir numuneye farklı enerji seviyelerinde darbeler uygulanmıştır. Ayrıca bir numune üzerinde delinme meydana gelene kadar yapılan darbe testleri ile geri sekme, nüfuziyet ve delip geçme darbe davranışları incelenmiştir. Darbe sonrası levhaların içyapılarında oluşan hasar türleri mikroskop ile gözlemlenmiş, hasar alanları tahribatsız muayene yöntemlerinden olan ultrasonik C-scan metodu ile incelenmiş ve çentik derinliğinin zamana bağlı değişimi ise komparatör ile ölçülmüştür. Hasarlı ve hasarsız test numunelerinin burkulma testleri gerçekleştirilmiş ve kalan kritik burkulma dayanımları bulunmuştur.

Bilim Kodu : 914.1.090
Anahtar Kelime : Tabakalı kompozit, ağırlık düşürme testi, darbe hasarı, burkulma, düşük hız
Sayfa Adedi : 136
Tez Yöneticisi : Prof. Dr. Müfit GÜLGEÇ

**EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON THE IMPACT RESPONSE OF
COMPOSITE PLATES WITH VARYING THICKNESS AND ORIENTATION
UNDER LOW VELOCITY IMPACT ENERGIES**

(M.Sc. Thesis)

Dilek KARACA

**GAZI UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY
APRIL 2010**

ABSTRACT

The aim of this study is to investigate the impact response of the unidirectional carbon fibre reinforced laminated composite plates with varying thickness and orientation under low velocity impact energies. The effects of the following parameters for the impact response are investigated; impact energy, orientation, plate thickness and impactor mass. Impacts with varying energy levels are applied on each specimen by using drop weight impact testing machine. Additionally, impact behaviours of rebound, penetration, and perforation are examined by applying impact tests until perforation for a single specimen. The damage types after the impacts are observed by a microscope, the damaged areas are examined by ultrasonic c-scan, which in one of the non-destructive testing techniques and the deviations of dent depth with time are measured by a comparator. The buckling tests are performed on damaged and undamaged specimens and the remaining buckling strength percentages are determined.

Science Code : 914.1.090
**Kew Words : Laminated composite, drop weight impact
tester, impact damage, buckling, low velocity**
Page Number : 136
Adviser : Prof. Dr. Müfit GÜLGEÇ

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın ortaya çıkarılması ve yürütülmesi esnasında beni yönlendiren, destekleyen, değerli yardım ve katkılarını esirgemeyen Prof. Dr. Müfit GÜLGEÇ'e sonsuz teşekkür ederim.

Kıymetli tecrübe ve bilgilerini paylaşan Dr. Fatih CIBİR'a, çalışmam boyunca bana gösterdikleri hoşgörü ve yardımlar için TUSAŞ-Türk Havacılık ve Uzay Sanayii A.Ş.'den Yapısal Tasarım Müdürü Murat SORGUÇ, Yapısal Tasarım Şefi Yıldırım APAYDIN, Sistem Mühendisliği Lideri Burcu ÖZGÖR ve sistem mühendisliği bölümündeki mesai arkadaşlarıma çok teşekkür ederim. Testlerin yapılmasında çok büyük emeği geçen Yapısal Test Lideri Fırat TEMEL, yapısal test mühendisi Nurdan KÖMÜRCÜ ve yapısal test bölümü çalışanlarından Mehmet ARAS'a, manevi destekleriyle beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan çok değerli arkadaşlarım Cansu TAŞKIRAN ve Arş. Gör. Derya ÇALIŞKAN'a teşekkürü bir borç bilirim.

Son olarak, bu günlere gelmemde büyük emeği olan, çalışmalarımın her aşamasında maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen GÜZEL ve KARACA ailelerime ve sabırla beni destekleyen sevgili eşim Haldun KARACA' ya sonsuz teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xi
RESİMLERİN LİSTESİ.....	xvi
SİMGELER VE KISALTMALAR	xvii
1. GİRİŞ.....	1
2. KOMPOZİT MALZEMELERE GENEL BAKIŞ.....	10
2.1. Kompozit Malzeme Tanımı	10
2.2. Kompozit Malzemenin Genel Özellikleri.....	11
2.3. Kompozit Malzemelerin Kullanım Alanları.....	12
2.4. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması	13
2.4.1. Takviye elemanına göre.....	13
2.4.2. Kullanılan matrise göre	19
2.5. Kompozitlerin Mekanik Davranışı	21
3. KOMPOZİT MALZEMELERİN DARBE DAVRANIŞI.....	25
3.1. Kompozitler Neden Darbe'ye Eğilimlidir?	25
3.2. Kompozitler Malzeme Darbe Testleri	26
3.2.1. Ağırlık düşürme darbe testleri	27
3.2.2. Sarkaç testleri (Izod ve Charpy),.....	27
3.2.3. Hava veya gaz silah testleri	28

Sayfa

3.3. Kompozit Malzemelerde Hasar Türleri	29
3.3.1. Makroskobik hasar türleri.....	29
3.3.2. Mikrokobik hasar türleri.....	29
4. DENEYSEL ÇALIŞMA HAZIRLIĞI	33
4.1. Test Numunelerin Tasarımı.....	33
4.1.1. Oryantasyon açılarının gösterimi	33
4.1.2. Genel tasarım prensipleri.....	36
4.2. Test Numunelerinin İmalat Süreci	41
4.2.1. Test numunelerinin imalatı.....	41
4.2.2. Üretim sonrası kalite kontrol	45
4.2.3. Test numunelerinin kesilmesi.....	45
5. DENEYDE KULLANILAN CİHAZLAR ve YÖNTEM.....	47
5.1. Ağırlık Düşürme Darbe Testi.....	47
5.1.1. Ağırlık düşürme darbe testi cihazının özellikleri	47
5.1.2. Ağırlık düşürme darbe testi cihazının bölümleri	48
5.1.3. Data toplama sistemi	50
5.1.4. Hız detektör bloğunun ayarlanması	54
5.1.5. Cihazın Çalıştırılması.....	55
5.1.6. Darbe testi için kullanılan parametreler.....	55
5.2. Çentik Derinliklerinin Ölçülmesi.....	60
5.3. Ultrasonik c-scan sistemi ile hasar alanlarının ölçülmesi	61
5.4. Burkulma testi ile kritik burkulma yükünün hesaplanması	62
5.5. Hasarların Mikroskop ile İncelenmesi	65
6. DENEYSEL ÇALIŞMANIN SONUÇLARI.....	67

Sayfa

6.1. Genel Darbe Davranışının İncelenmesi	67
6.1.1. Ağırlık düşürme cihazından alınan verilerin yorumlanması.....	67
6.1.2. Ultrasonik C-scan muayenesi hasar alanlarının incelenmesi..	80
6.2. Enerji Artışının Etkisi	81
6.2.1. Ağırlık düşürme cihazından alınan dataların yorumlanması ...	81
6.2.2. Ultrasonik C-scan muayenesi hasar alanlarının incelenmesi..	88
6.2.3. Çentik derinliği ve zamana göre değişimi.....	91
6.2.4. Kalan kritik burkulma dayanım yüzdesinin incelenmesi	95
6.3. Numune kalınlığının etkisi	100
6.3.1. Ağırlık düşürme cihazından alınan dataların yorumlanması .	100
6.3.2. Ultrasonik C-scan muayenesi hasar alanlarının incelenmesi	109
6.3.3. Kalan kritik burkulma dayanım yüzdesinin incelenmesi	110
6.4. Oryantasyon Yüzdesinin Etkisi.....	112
6.4.1. Ağırlık düşürme cihazından alınan dataların yorumlanması .	112
6.4.2. Kalan burkulma dayanım yüzdesinin incelenmesi	114
6.5. Vurucu Kütle Etkisi	117
6.5.1. Ağırlık düşürme cihazından alınan dataların yorumlanması .	117
6.5.2. Çentik derinliklerinin karşılaştırılması.....	121
6.5.3. Hasar alanın ve kalan kritik burkulma dayanım yüzdesinin incelenmesi.....	122
7. SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....	124
KAYNAKLAR	129
ÖZGEÇMİŞ.....	136

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması [26]	14
Çizelge 4.1. Balans-simetri durumunun tabakalı kompozitlere etkisi	38
Çizelge 4.2. Test numunelerinin dizilimleri	39
Çizelge 5.1. Darbe parametreleri	57
Çizelge 6.1. Farklı kalınlıklardaki test numunelerinde darbe sonrası oluşan çöküntü miktarının zamana karşı değişimi.....	93
Çizelge 6.2. Farklı kütleler ile yapılan darbe test parametreleri	118
Çizelge 6.3. “5A” Numaralı test numunesinin farklı kütleler ile oluşturulan aynı darbe enerjisi seviyesindeki davranışı	118
Çizelge 6.4. Farklı kütleler ile oluşturulan aynı darbe enerjisi seviyesi sonrasında ölçülen çentik derinlikler	122

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. En genel kullanımlı takviye elemanlı kompozitler; a) fiber takviyeli, (b) parçacık takviyeli, c) tabakalı kompozitler, d) dolgu kompozitler [25].....	14
Şekil 2.2. Şekillerine göre elyaf takviyeli kompozit malzeme çeşitleri (a) sürekli elyaf takviyeli, (b) kesikli elyaf takviyeli, (c) rastgele düzlemsel olarak yönlendirilmiş [27]	15
Şekil 2.3. (a) Eş yönlü, (b) orthotropic (c) eş yönlü olmayan malzemelerin mekanik davranışları [32].....	23
Şekil 3.1. Uçaklarda servis hayatı boyunca maruz kalacağı hasar nedenlerinin yüzdeleri	26
Şekil 3.2. Charpy ve Izod testleri'nin örnek görüntüsü [41]	27
Şekil 3.3. Split hopkinson deney düzeneği [41].....	29
Şekil 3.4. a) Kalın ve (b) ince levhalar için matris kırığı hasar ilerlemesi.....	30
Şekil 3.5. Tipik bir delemantasyon türü [39]	31
Şekil 4.1. Fiber oryantasyon açılarının gösterilmesi [33]	34
Şekil 4.2. Pozitif/negatif fiber oryantasyon açılarının belirlenmesi [33].....	34
Şekil 4.3. (a) tabaka sayısı çift, (b) tabaka sayısı tek olan levhalarda dizilimin gösterimi	35
Şekil 4.4. Otoklav kalıplama prosesi	43
Şekil 5.1. Impulse yazılımının grafik örneği.....	51
Şekil 5.2. Impulse yazılımda darbe hızının hesaplama yöntemi.....	53
Şekil 5.3. Impulse yazılımında maksimum kuvvetin hesaplanma yöntemi	54
Şekil 5.4. Impulse yazılımında toplam yer değiştirmenin hesaplama yöntemi	54
Şekil 5.5. Çöküntü miktarının ölçümü.....	60
Şekil 5.6. Tipik bir burkulma yükü-yer değiştirme grafiği	64

Şekil	Sayfa
Şekil 5.7. Hasar görmemiş 4 farklı oryantasyon yüzdesine sahip test numunelerinin kat sayılarına karşı kritik burkulma yük eğrileri.....	65
Şekil 6.1. Kalın ve ince numunelerde nüfuziyet ve delip geçme örnekleri	67
Şekil 6.2. “11” numaralı test numunesine 7 farklı darbe enerji seviyesindeki temas kuvveti/temas süresi grafikleri	68
Şekil 6.3. “11” numaralı test numunesinin geri dönüş-nüfuziyet-delip geçme darbe davranışları için temas kuvveti/temas süresi grafikleri	69
Şekil 6.4. “11” Numaralı test numunesine ait 7 farklı darbe enerji seviyesindeki temas kuvveti/yer değiştirme grafikleri	71
Şekil 6.5. “11” numaralı test numunesinin geri dönüş-nüfuziyet-delip geçme darbe davranışları için temas kuvveti-yer değiştirme grafikleri	71
Şekil 6.6. “11” Numaralı test numunesine ait 7 farklı darbe enerji seviyesindeki hız/temas süresi grafikleri	73
Şekil 6.7. “11” numaralı test numunesinin geri dönüş-nüfuziyet-delip geçme darbe davranışları için hız-temas süresi grafikleri...	73
Şekil 6.8. “11” Numaralı Numuneye ait 7 darbe enerji seviyesindeki hız/yer değiştirme grafikleri	74
Şekil 6.9. “11” numaralı test numunesinin geri dönüş-nüfuziyet-delip geçme darbe davranışları için hız-yer değiştirme grafikleri.	74
Şekil 6.10. “11” Numaralı ait 7 darbe enerji seviyesindeki hız/yer değiştirme grafikleri	75
Şekil 6.11. “11” numaralı test numunesinin geri dönüş-nüfuziyet-delip geçme darbe davranışları için yer değiştirme-temas süresi grafikleri	75
Şekil 6.12. Temas kuvveti-yer değiştirme eğrilerinden yutulan enerji miktarının hesaplanması [21]	76
Şekil 6.13. “11” Numaralı Numuneye ait 7 darbe enerji seviyesindeki enerji/temas süresi grafikleri	78

Şekil	Sayfa
Şekil 6.14. Geri dönüş-nüfuziyet-delip geçme darbe davranışları için enerji enerji-temas süresi grafikleri	78
Şekil 6.15. Kompozit levhalar için enerji profil diyagramı [45]	79
Şekil 6.16. “11” numaralı test numunesi için enerji profili	79
Şekil 6.17. “11” numaralı test numunesinin hasar alanı-darbe enerjisi grafiği	80
Şekil 6.18. “4” (20 katlı) nolu test numunesinin, (a) temas kuvveti & enerji / temas süresi (b) temas kuvveti / yer değiştirme grafikleri, (c) yer değiştirme & hız / temas süresi grafikleri	82
Şekil 6.19. “5” (29 katlı) nolu test numunesinin, (a) temas kuvveti & enerji / temas süresi (b) temas kuvveti / yer değiştirme grafikleri, (c) yer değiştirme & hız / temas süresi grafikleri	83
Şekil 6.20. “6” (40 katlı) nolu test numunesinin, (a) temas kuvveti & enerji / temas süresi (b) temas kuvveti / yer değiştirme grafikleri, (c) yer değiştirme & hız / temas süresi grafikleri	84
Şekil 6.21. (a) “4” nolu (20 kat), (b) “5” (29 kat), (c) “6” nolu (40 kat) test numunelerinin enerji artışıyla darbe parametrelerinin incelenmesi	87
Şekil 6.22. Darbe testi sonrası numunelerde oluşan hasar alanları	90
Şekil 6.23. (a) 50/40/10, (b) 60/30/10, (c) 40/40/20, (d) 25/59/25 oryantasyon yüzdesine sahip tek yönlü karbon tabakalı kompozit test numunelerinin darbe testi sonrası kalan kritik burkulma dayanım yüzdelerinin darbe enerjisi karşı grafikleri	96
Şekil 6.24. (a) “50/40/10” yüzdesine sahip 20, 29 ve 40 kat kalınlığındaki tek yönlü karbon tabakalı kompozit levhaların 10J darbe enerjisi için (a) temas kuvveti & enerji / temas süresi, (b) temas kuvveti / yer değiştirme, (c) hız / temas süresi grafikleri	102
Şekil 6.25. (a) “50/40/10” yüzdesine sahip 20, 29 ve 40 kat kalınlığındaki tek yönlü karbon tabakalı kompozit levhaların 20J darbe enerjisi için (a) temas kuvveti & enerji / temas süresi, (b) temas kuvveti / yer değiştirme, (c) hız / temas süresi grafikleri	103

Şekil	Sayfa
Şekil 6.26. (a) “50/40/10” yüzdesine sahip 20, 29 ve 40 kat kalınlığındaki tek yönlü karbon tabakalı kompozit levhaların 30J darbe enerjisi için (a) temas kuvveti & enerji / temas süresi, (b) temas kuvveti / yer değiştirme, (c) hız / temas süresi grafikleri	104
Şekil 6.27. (a) “50/40/10” yüzdesine sahip 29 ve 40 kat kalınlığındaki tek yönlü karbon tabakalı kompozit levhaların 40J darbe enerjisi için (a) temas kuvveti & enerji / temas süresi, (b) temas kuvveti / yer değiştirme, (c) hız / temas süresi grafikleri	105
Şekil 6.28. “50/40/10” oryantasyon yüzdesine sahip 20, 29 ve 40 kat levhalarının (a) kritik temas kuvveti / darbe enerjisi (b) maksimum temas kuvveti / darbe enerjisi grafikleri	107
Şekil 6.29. (a) 50/40/10”, (b) 60/30/10, (c) 40/40/20, (d) 25/50/25 oryantasyon yüzdeslerine sahip tek yönlü karbon tabakalı kompozit levhaların kritik ve maksimum temas kuvvetlerinin kat sayısına karşı grafikleri.....	108
Şekil 6.30 (a) Hasar alanın kalınlık artışının göre incelenmesi, (a) 50/40/10, (b) 60/30/10, (c) 40/40/20, (d) 25/50/25 oryantasyon yüzdesine sahip test numuneleri	110
Şekil 6.31. (a) Kalan burkulma dayanım yüzdesinin kalınlık artışının göre incelenmesi, (a) 50/40/10, (b) 60/30/10, (c) 40/40/20, (d) 25/50/25 oryantasyon yüzdesine sahip test numuneleri	111
Şekil 6.32. 50/40/10, 60/30/10, 40/40/20, 25/50/25 oryantasyon yüzdesine sahip 40 katlı test numunelerinin ağırlık düşürme test sonuçlarının karşılaştırılması.....	114
Şekil 6.33. (a) 20 katlı “50/40/10”, “60/30/10” ve “40/40/20” (b) 29 katlı “50/40/10”, “60/30/10” ve “25/50/25, (c) 40 katlı 50/40/10”, “60/30/10”, “40/40/20” ve “25/50/25” oryantasyon yüzdeslerindeki test numunelerinin kalan burkulma dayanım yüzdeslerinin karşılaştırılması	116
Şekil 6.34. “15” Numaralı test numunesine ait 4 farklı vurucu kütlenin oluşturduğu sabit 10J’luk darbe enerjisine ait (a) temas kuvveti / temas süresi, (b) yer değiştirme / temas süresi, (c) hız / temas süresi, (d) temas kuvveti / yer değiştirme, (e) hız / yer değiştirme, (f) darbe enerjisi / temas süresi grafikleri	119

Şekil**Sayfa**

Şekil 6.35. Farklı kütlelerle ile oluşturulan 10J'luk darbe enerjisi altında 15 numaralı test numunesinde oluşan hasar alanları ve kalan burkulma dayanımı/vurucu kütle grafikleri.....	123
---	-----

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 4.1. Fiber oryantasyon açıları	34
Resim 4.2. Simetrik ve balans olmayan tabakalı levha [36]	38
Resim 4.3. Reçine emdirilmiş kumaş (prepreg)	41
Resim 4.4. Test numunelerinin imalat süreci	43
Resim 4.5. Üretim sonrası test numunelerinin ultrasonik muayene sonuçları.....	46
Resim 4.6. Su jeti kesiminden sonraki test numunelerinin görünümü	46
Resim 5.1. Ağırlık düşürme test cihazı.....	48
Resim 5.2. Ağırlık düşürme test cihazı ile kullanılabilecek değişik darbe uçları	50
Resim 5.3. Komparatör	61
Resim 5.4. Ultrasonik c-scan muayenesi sırasında çekilen bir görüntü, (b) evolution yazılımından alınan ultrasonik c-scan görüntüsü	62
Resim 5.5. Burkulma testi için kullanılan aparat.....	63
Resim 5.6. Burkulma testi için test numunesinin bağlanması	64
Resim 5.7. Burkulma testinden sonra test numunesinin görüntüsü	64
Resim 5.8. Hasarlı numuneden alınan bir parçanın tarayıcıdaki resmi	65
Resim 5.9. Darbe uygulanmış test numunesinin mikroskop görüntüsü ve hasar tipleri.....	66
Resim 6.1. “11” numaralı test numunesine ait c-scan sonuçları.....	80
Resim 6.2. 6 farklı darbe enerjisi sonrası 4-15 nolu test numunelerin ultrasonik c-scan sonucu	89
Resim 6.3. Farklı kütleler ile yapılan aynı seviyedeki darbe enerjisi sonucu c-scan ultrasonik muayene sonuçları	123

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
$a(t)$	t anındaki vurucunun ivmesi
dB	Desibel
E_m	Maksimum temas kuvvetinde ki enerji
F_m	Maksimum temas kuvveti
F_k	Kritik temas kuvveti
$F(t)$	t anındaki bileşke kuvvet
$f(t)$	t anında numune tarafından vurucuya uygulanan kuvvet
g	yerçekimi ivmesi (9.81 m/s)
kg	Kilogram
mm	Milimetre
m	vurucu kütlenin ağırlığı (kg)
$d(t)$	t anındaki yer değiştirme
E_y	yutulan enerji
$K(t)$	Vurucunun t anındaki kinetik enerjisi
$P(t)$	Vurucunun t anındaki potansiyel enerjisi
T_s	Temas süresi
$V(t)$	t anında vurucu kütle hızı
V_{imp}	Çarpma hızı
Y_m	Maksimum yükteki yer değiştirme
Y_t	Toplam yerdeğiştirme

Kısaltmalar**Açıklama****BVID**

Gözle ancak fark edilebilen darbe hasarı

CAI

Darbe sonrası basma dayanımı

DSD

Kopmalar sonucu oluşan darbe hasarı

IATA

Uluslararası hava Taşımacılık birliği

KBDY

Kalan burkulma dayanım yüzdesi

MMK

Metal matrisli kompozitler

OVID

Bariz gözle görülebilen darbe hasarı

PMK

Polimer matrisli kompozitler

SMK

Seramik matrisli kompozitler

UD

Tek yönlü (Unidirectional)

VID

Gözle fark edilebilen darbe hasarı

1. GİRİŞ

Kompozit malzemeler, metallerle göre daha pahalı olmalarına rağmen daha hafif olmaları, yüksek mukavemete sahip olmaları ve ağırlıklarına oranla daha yüksek öz mukavemet (specific strength) sahip olmalarından dolayı son zamanlarda geniş kullanım alanı bulmuşlardır. Özellikle fiber takviyeli tabakalı kompozit malzemeler yüksek teknoloji gerektiren uçak ve savunma sanayisinde ağırlıklı olarak kullanılmaktadır.

Bu üstün avantajlarının aksine tabakalı kompozitlerin düzlem dışı yük taşıma kapasiteleri oldukça düşüktür [1].

Uçak yapıları normal operasyonları sırasında, kuş çarpması, irili ufaklı pist taşları, motordan parça koparak yapıya zarar vermesi, bakım sırasında beklenmeyen kazalar (takım düşürülmesi gibi) gibi birçok darbe yüklerine maruz kalırlar. Bazı darbeler fiber kopmalarına yol açarak bariz bir şekilde göz ile görülebilir hasarlara yol açıp yapının mukavemetinde ani düşüşlere yol açarlar. Bu hasarlar bariz görülebilen darbe hasarı (OVID) ve kopmalar sonucu oluşan hasar (DSD) olarak tanımlanabilir ve yapılan planlı kontroller sırasında ve ya anında fark edilip düzeltilebilir veya hurdaya ayrılabilirler.

Ancak bariz görülebilen hasarların tersine yapının üst yüzeyinde fark edilemeyen ancak içyapısında tabaka ayrılması veya matris kırılması gibi çıplak gözle zor görülebilen hasarlar da meydana gelebilir. Bu tarz hasarlar ancak gözle görülebilen hasarlar olarak tanımlanır (BVID) ve her kadar da tehlikesiz görünseler bile, darbe yüklemelerinden, matrisin ana görevini yerine getirememesinden ve yorulma yüklerine maruz kalmalarından dolayı erken arızaya yol açabilirler. Günlük uçak etrafında gezinilerek yapılan muayeneler sırasında fark edilen veya edilemeyen ufak çentik veya çöküntülerin aslında ne kadar dayanıma izin verdiğini önceden kestirebilmek çok önemlidir. Servis sırasında oluşabilecek bu tarz hasarların önüne geçilmesi için tasarımda gerekli önlemlerin alınması ve gerekirse yedekleme

yapılması önerilir. Bu sebeple tabakalı kompozit bir yapıda darbe etkisinin oluşturacağı hasarı önceden tahmin etmek ve kontrol altında tutabilmek, tasarım ve kullanım açısından büyük önem arz etmektedir.

Darbe; düşük hızlı, yüksek hızlı ve aşırı hızlı olmak üzere 3 ana kategoride değerlendirmiştir. Ancak literatürde bu kategorileri birbirinden ayıran kesin bir sonuç görülmemektedir. İçten (2006) yapmış olduğu araştırmada [2], bazı kaynaklarda 1-10 m/s arası hızdan oluşan darbelerin düşük hızlı darbeler olarak sınıflandırılmasına rağmen [3-5], bazılarında 100 m/s darbe hızının düşük hız olarak tanımlandığını belirtmiştir [6]. Ayrıca bazı çalışmalarda hız değerine bakmadan, sadece hasar türleri incelenerek değerlendirme yapıldığı belirtmiş ve tabaka ayrılması ve matris kırılması gibi hasarların oluşturduğu darbeleri düşük hızlı darbe, fiber kırılmalarının oluşturduğu darbelerin ise yüksek hızlı darbeler olarak sınıflandırıldığı belirtmiştir [7-8].

Bu tez çalışmasında gerçekleştirilen ağırlık düşürme testlerindeki hız değerleri 5 m/s'yi geçmediği için, [2]'in yaptığı araştırmadaki değerlendirmeler göz önünde bulundurularak, mevcut tez çalışmasındaki darbeler, düşük hızlı darbe olarak sınıflandırılmıştır.

Tabakalı kompozit plaklar için darbe ile ilgili oldukça fazla çalışma yapılmıştır. Darbeli yüklemeler ile ilgili önemli çalışmalar aşağıda verilmiştir.

Hosur ve ark.(2005), S2 cam/epoksi dikili/dikişsiz kompozitlerin darbeye karşı performansı incelemişlerdir. Ağırlık düşürme test cihazı DYNATUP 8210 kullanılarak tekli ve çoklu darbeler uygulamışlardır. Tekli çarpışmada, örülü fabrik kompozitlerin, çarpışma yüklemesi altında az tabakalı ayrılma gösterdiğini ve tabakaların dikilmesi, dikme işlemi hasarı grid bölgesinde tuttuğundan dolayı, hasara karşı direncinin artırdığını göstermişlerdir. Düşük enerji seviyelerinde, maksimum kuvvetin, çarpışma sayısı ile ciddi miktarda değişmediğini ancak yüksek seviyelerde (40J-50J), maksimum kuvvetin belli bir çarpmadan sonra ani bir düşüş gösterdiğini ifade etmişlerdir. Hasar

alanının çarpma sayısı ile arttığını, ancak belli bir çarpmadan sonra da artışın daha az olduğunu kanıtlamışlardır [10].

Naik ve ark. (2001), değişik sıralı dizili melez kompozit malzemelerin, darbe ve darbe sonrası davranışlarının incelemişlerdir. Ağırlık düşürme test cihazı kullanarak darbe uygulamış, yer değiştirme, kontak kuvveti, hız ve enerji değerlerinin zamana karşı grafiklerini incelemişlerdir. Darbeden sonra hasar alanı güçlü bir ışık aracılığıyla işaretlenmiş ve 10 kat büyütülerek büyüteç ile ölçülmüştür. Ayrıca c-scan ve a-scan metotları ile levhalar arası ayrılmayı ve levha ayrılmasının yerini belirlemişlerdir. En büyük hasarın üst noktadan 2 mm aşağıda olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca, basma testi yaparak, darbe öncesi ve darbe sonrası dayanımı karşılaştırmışlardır. Cam-karbon melez kompozit levhalar, sadece karbon veya sadece cam ile güçlendirilmiş kompozitlere göre daha düşük çentik hassasiyeti gösterdiğini, karbon dışarıda, cam içeride kompozitlerin, darbe sonrası yüksek basma gücü ve daha az çentik hassasiyeti gösterdiğini kanıtlamışlardır. Cam içeride karbon dışarıda melez kompozitlerin de darbe süresinin daha uzun olduğunu göstermişlerdir [11].

Yine Naik ve ark. (2002), E-camı epoksi kompozit levhaların sabit enerji altında, vurucu kütle ve hızı ile ayarlama yaparak darbe davranışını incelemişlerdir. Ağırlık düşürme test cihazı ile deneyler yapılmış ve NASA 1142 standardına uygun darbe sonrası basma testleri gerçekleştirmişlerdir. Hafif ve hızlı kütlenin, ağır ve yavaş kütleye oranla kompozit levhada daha az hasar oluşturduğu göstermişlerdir. Ayrıca darbe sonrası yapılan basma testinde, ağır ve yavaş kütle ile darbe görmüş kompozit plakların dayanımının, hafif ve hızlı kütleye göre daha az olduğu kanıtlamışlardır [11].

Mitrevski ve ark.(2005), vurucu şeklinin kompozit malzemeler üzerinde etkisini ağırlık düşürme test cihazı kullanarak incelemişlerdir. Optik mikroskop, ultrasonik c-scan ve thermography ile darbe hasarlarını gözlemlemişlerdir. Daha sonra çekme testi yaparak kalan yük taşıma

kapasitesini belirlemişlerdir. Yarıküresel vurucu ucun en büyük darbe alanını oluşturduğunu, sırası ile ovigal ve koniksel olanın izlediğini göstermişlerdir. Mikroskopta görülen resimlere göre, yarıküresel vurucunun, en çok tabaka ayrılmasına yol açarken, konik olanın en çok fiber kırılmasına yol açtığını gözlemlemişlerdir. En çok hasarın, eğme gerilmelerinden dolayı alt tabakalarda olduğunu belirtmişlerdir. Kalan çekme gücü en fazla yarıküresel ucun yaptığı darbeye sadece alt orta tabakalarda fiberlerin kırılmasıyla oluştuğunu görmüşlerdir. Kalan çekme gücü, tüm vurucu şekillerinde, 6 J'da yaklaşık olarak %44 oranında azaldığını belirtmişlerdir. Değişik vurucu şekillerinin, değişik seviyelerde, fiber kırılması, matris kırılması ve tabaka ayrılması gibi, malzemelerin kalan dayanım özelliklerini etkileyen hasarlar oluşturduğu göstermişlerdir [13-14].

Belingardi ve Vadori (2003) tabakalı cam fiber epoksi kompozitlerin, düşük hızlı darbe testlerini gerçekleştirmişlerdir. Cam fiber epoksi matris hem tek yönlü (UD), hemde dokuma (fabric) olarak şekilde 3 değişik dizilime sahip, toplam 6 değişik numune hazırlamışlardır. Ağırlık düşürme test cihazı kullanılarak 9 enerji seviyesinde 2 kez test yapmışlardır. UD ve fabrik numuneler için ayrı ayrı doyma enerjileri hesaplamışlardır. Malzemedeki darbe davranışını incelemek için; doyma enerjisi, darbe enerjisi, maksimum temas kuvveti, ilk hasar kuvveti ve gerinim oranı değerlerine göre malzemenin mekanik özelliklerindeki hassaslık parametrelerini dikkate almışlardır. İlgili, kinematik, dinamik ve enerji miktarlarının gelişim sürecini, enerji parametreleri ve kuvvet eşik değerinin darbe hızına bağlılığı sentez etmişlerdir. Bu sonuçlar ile en azından düşünülen malzeme, düşünülen tip yükleme ve çarpma hızında, cam fiber epoksi matrisin mekanik özelliklere ve gerinim oranı etkisine hassasiyetinin olmadığını kanıtlamışlardır. Kuvvet yer değiştirme eğrilerinden; ilk hasar kuvveti ve maksimum temas kuvvet değerlerini elde etmişlerdir. Bu iki parametrenin, eğer darbe enerjisi, eşik değere ulaşılmasını sağlayacak kadar büyükse, değerlerin büyük bir oranda darbe enerjisi ile sabit kaldığını göstermişlerdir.

Milli ve Necib (2001), E-cam, epoksi tabakalı kompozit çapraz katlı kompozit levhaların düşük hız altında darbe davranışı deneysel ve teorik olarak incelemişlerdir. Kenetlenen dairesel levhanın darbe tanımı yay-kütle sistemi olarak modellemiş ve ağırlık düşürme test cihazı kullanılarak deneyler gerçekleştirmişlerdir. Merkeze etki eden darbe kuvvetinden dolayı vurucunun ivmelenmesi, yer değiştirme ve hedef dairesel levha sapması (target circular plate deflection) gibi darbe sürecinin zaman göre değişimi verilerini elde etmişlerdir. Kompozit levhaların davranışları üzerinde vurucu hızlarının, kuvvetlerinin ve tabaka sıralamasının etkilerini incelemişlerdir. Ağırlık düşürme test cihazının raylarında, kaybedilen sürtünmeden dolayı darbe hızı artıkça teorik ve deneysel sonuçlar arasındaki farkında arttığını belirtmişlerdir. Darbeli levhaların dinamik cevabı üzerinde, vurucu hızının etkileri ile ilgili olarak darbe kuvvetleri ve merkezci sapmaların, vurucu hızıyla doğru orantılı olduğunu bulmuşlardır. Ek olarak, çapraz dizilimli plakların darbe direncinin, "0" dereceli diziliminin sayısının değiştirilerek değiştirilebileceği belirtilmiştir.

Aktaş ve ark (2009), yüksek sıcaklıklarda, düşük hızda darbe görmüş levhali kompozitlerin, basma sonrası darbe davranışını incelemişlerdir. E-Cam-epoksi tabakalı kompozit malzemeyi elde yatırma yöntemi kullanılarak üretmişlerdir. 20°C (oda sıcaklığında), 40°C, 60°C, 80°C ve 100°C sıcaklıklardaki levhalara ağırlık düşürme test cihazı kullanılarak darbe enerjileri uygulamışlardır Darbe enerjisi 10J'dan 70J'a kademeli olarak artırılmıştır Cam/epoksi kompozit levhaların darbe sonrası basma dayanımı (CAI) üzerinde hasar oryantasyon etkilerini göstermek için 20J, 40J ve 60J için CAI mukavemet-sıcaklık grafiklerini elde etmişlerdir. Maksimum CAI azalmasının 100 derecede, minimum CAI azalmasının ise 20 derecede olduğunu görmüşlerdir. Bütün hasarlı numunelerin CAI dayanımının, hasarsız numunelerden daha düşük olduğunu tespit etmişlerdir. Yatay darbe hasarlı numunelerin CAI dayanımının, dikey darbe hasarlı numunelerden daha düşük olduğunu gözlemlemişlerdir (bütün enerji seviyeleri ve tüm darbe sıcaklıkları için). 45'lik dizilimi olan tabakada aynı enerji seviyesinde, sıcaklık

etkilenmesinden dolayı oluşan CAI etkilenmesinin daha düşük olduğu ve tüm sıcaklık değerlerinde, en iyi dizilimin, 45'liklerin olduğu dizilim olduğu belirtmişlerdir [17].

Im ve ark.(2001) sıcaklık değişimlerinin (yüksek ve düşük sıcaklıklar) etkisini, hasarlı karbon tabakalı kompozit plakalar için deneysel olarak çalışmışlardır. Hava tabancası ile tarafından fırlatılan bir çelik topu darbe hasarını üretmek için kullanmışlardır. 0,5 gr ağırlığında 5 mm çapında çelik top sıkıştırılmış hava kullanılarak numuneye fırlatılmıştır. Darbe hız aralığı 60 m/sn'den 105 m/s'ye kadar artırılmıştır. Deneyler -30°C, 20°C, 70°C, 90°C ve 120°C sıcaklıklarda yapılmıştır. Karbon tabakalı kompozit levhalarda sıcaklık artıkça, tabakalar arası ayrılmalar azaldığı ve sıcaklığın darbe hasarını çok büyük miktarda değiştirdiği görmüşlerdir. Sıcaklık artıkça ya da azaldıkça, darbe enerjisi ve tabaka ayrılması arasında lineer bir bağlantı olduğunu tespit etmişlerdir [18].

Christoforou ve Yigit (1998), kompozit levhaların darbe cevabına düzenlenen eşitliklerin standartlaştırılması (normalizasyonu) için çalışmışlardır. Ağırlık düşürme test cihazı kullanılarak deney gerçekleştirmişlerdir. Hareket denklemlerini yabancı objeler tarafından, levhanın yanal darbe durumunda, vurucunun hareketi olarak tanımlamışlardır. Düşük hız darbeleri için analizde kullanılan modeller, geleneksel olarak Hertizian kontak yasasına dayandırılmıştır. Lineer olmayan eşitlikleri çözmek zor olmasına rağmen, lineer kontak yasasının darbe cevabını tanımlamada çok kullanışlı olduğunu belirtmişlerdir. Darbenin kuvveti-zaman ve normalleştirilmiş darbe kuvvetinin, normalleştirilmiş zamana göre grafiklerini çıkartıp incelenmişlerdir. Hüküm sürülen denklemleri, kompozit levhaların dinamik davranışı incelemek için standartlaştırmışlardır. Karakteristik metodu doğrulayabilmek için, daha fazla sayıda deneysel ve nümerik metot gerekli olduğunu belirtmişlerdir [19].

Tai ve ark.(1998) karbon-epoksi kompozit plakaların düşük enerji darbesinin yorulma davranışına etkisini incelemişlerdir. Darbe ve yorulma yükleri

altındaki kompozitlerin olası hataları tahmin etmek için, Weibull dağılım teorik modelini kullanmış ve ağırlık düşürme test cihazı kullanılarak deney gerçekleştirmişlerdir. Tekrarlı darbeye izin verilmemiştir. Yorulma testi, yük kontrolü olan otomatik hidrolik test cihazı ile yapılmıştır. Darbe yapılan numunelerin kalan dayanımını ölmüş ve hasar görmüş ve görmemiş numunelerin S/N eğrilerini çizmişlerdir. Ultrasonik sistem ile tabakalar arası ayrılmaları incelemişlerdir. Hasar alanının, darbe enerjisi artıkça arttığını, kalan enerjinin darbe enerjisi artıkça azaldığını tespit etmişlerdir. The median rank metodu ve Weibull dağılımı, darbe uygulanmış ve uygulanmamış numunelerin hata olasılığını analiz etmek için kullanılmıştır. Test dataları ile analiz dataları arasında iyi bir uyum sağlanmıştır. Rijitlik değişimi, yorulma yükleri boyunca izlenmiştir [20].

Atas ve Sayman (2007) E-cam ve epoksi örülü kompozit plakların genel darbe davranışlarını incelemişlerdir. Numunelere delinceye kadar testler yapılmış, adım adım gelişmeler kayıt altına alınmıştır. Her bir ayrı numunenin hasar sürecinin, ilgili temas kuvveti-yer değiştirme eğrilerine bakılarak çıkarılabileceği göstermişlerdir. Ayrıca hız ve yutulan enerji parametrelerinin de önemini ve bu değerlerden de hasar sürecinin takip edileceğini göstermişlerdir. Vurucu ucun yarıçapının, levha kalınlığına oranının, nufuziyet ve delip geçme değerlerinin karar verilmesinde parametre olarak kullanılabileceğini belirtmişlerdir [21]. Tez içinde söz konusu çalışmaya sıklıkla referans verilecektir. Ancak tez konusu ile bu çalışma arasında farklılık son derece açıktır. Şöyle ki; söz konusu çalışmada e-cam ve epoksi örülü tek bir kompozit plakanın ağırlık düşürme test sonuçları incelenmiştir. Ancak bu çalışmada farklı kalınlık ve oryantasyonda ki 12 farklı tek tönü karbon epoksi kompozit plakaların ağırlık düşürme test sonuçlarının incelenmesinin yanı sıra, ultrasonik c-scan metodu ile hasar alanları hesaplanmış ve burkulma testleri ile darbe sonrası dayanımları elde edilmiştir. Ayrıca komparatör ile çentik derinliklerinin zamana bağlı değişimler incelenmiş ve mikroskop ile hasar tipleri gözlemlenmiştir.

Bu tez çalışmasının içeriği farklı oryantasyon yüzdelerine ve farklı kalınlıklara sahip tek yönlü epoksi karbon tabakalı kompozit plakların darbeye cevabının incelenmesidir. Çalışmanın 1. bölümünde kompozit malzemelerin genel darbeye karşı davranışı anlatılmış ve literatür araştırmalarına yer verilmiştir. 2.bölümde genel olarak kompozit malzemeler tanıtılmış ve sınıflandırılmaları anlatılmıştır. 3. bölümde, darbenin tanımı verilmiş ve genel darbe testlerinden bahsedilmiştir. 4. bölümde, kullanılan test numunelerinin tasarım prensiplerinden ve üretim yöntemlerinden bahsedilmiştir, 5. bölümde deneysel çalışmanın nasıl gerçekleştirildiği anlatılmıştır. Kısaca yapılan deneylerin özeti aşağıda sıralanmıştır;

- ODTÜ merkezi laboratuvarında bir numune üzerinde 16 farklı darbe enerji seviyesinde numune delinceye kadar ağırlık düşürme test cihazı ile darbe uygulanmıştır. Her bir adımda elde edilen enerji, yer değiştirme, temas kuvveti ve darbe hızının darbe süresine karşı elde edilen grafiklerin yorumlamaları yapılmıştır. Bunun yanında 12 farklı test numunesinde geri sekme davranışının görüleceği 6 farklı enerji seviyesinde darbe testleri gerçekleştirilmiştir.
- Darbe testlerinden sonra numunelerin içyapısındaki hasarın genişliğini anlayabilmek amacıyla hasarsız muayene metotlarından olan ultrasonik c-scan ile hasar alanları, komparatör ile numunelerin üst yüzeylerinde oluşan çentik derinlikleri ölçülmüştür. Çentik derinliğinin ölçümünde belli zaman aralıkları seçilmiş ve derinlikte oluşan değişim gözlemlenmiştir.
- Numunelerin dayanımlarının karşılaştırabilmesi için, hasarlı ve hasarsız test numunelerine burkulma testleri uygulanarak kritik burkulma yükleri elde edilmiştir. Hasarlı numunenin kritik burkulma yükünü, hasarsız numunedeki kritik burkulma yüküne oranlayarak kalan dayanım yüzdeleri elde edilmiştir.
- En hasarlı numuneden, hasarlı kısım kesilerek mikroskop altında incelenmiş ve oluşan hasar tipleri irdelenmiştir.

- Elde edilen tüm verilerden; darbe enerjisi, numune oryantasyonu, numune kalınlığı ve vurucu hızın hasar oluşumuna ve kalan burkulma dayanımına etkileri incelenmiştir.

6. bölümde elde edilen deneylerin sonuçları irdelenerek, levha kalınlığının, oryantasyon yüzdesinin, darbe enerjinin ve vurucu kütlenin darbe oluşundaki ve kalan kritik burkulma dayanımındaki etkileri incelenmiştir. Son bölüm olan 7.bölümde ise bu çalışmadan elde edilen sonuçlar özetlenmiştir.

2. KOMPOZİT MALZEMELERE GENEL BAKIŞ

2.1. Kompozit Malzeme Tanımı

Kompozit malzemeler yeni bulunan bir malzeme grubu olmayıp, doğada var olan yapılardan hareketle, farklı özelliklere sahip malzemelerin birleştirilmesi sonucu elde edilmektedir [22].

Kompozit malzeme, iki ya da daha fazla sayıdaki, aynı veya farklı gruptaki malzemelerin en iyi özelliklerini, yeni ve tek bir malzemede toplamak amacıyla, makro düzeyde birleştirilmesiyle oluşturulan malzemeler olarak adlandırılmıştır [23].

Kompozit malzemelerin mühendislikteki asıl önemi, birbirinden farklı iki veya daha çok ögenin oluşturduğu kompozit malzemenin, karışım içindeki her bir ögenin özelliğinden daha üstün bir özelliğe sahip olmasıdır [24].

Teknolojide kompozit malzemeler, 1940'lı yıllarda havacılık sektörüne hizmet vermek üzerine geliştirilmeye başlanmıştır. Amaç çelik ve alüminyum alaşımları gibi konvansiyonel malzemelerin yerine daha düşük ağırlıklı ancak daha mukavemetli ve daha yüksek sertlik değeri, aşınma dayanımı ve kırılma tokluğu değerlerine sahip malzemelerin geliştirilmesiydi [22].

Kompozit malzemelerde, çekirdek olarak kullanılan bir takviye elamanı ve bu malzemenin çevresinde hacimsel olarak çoğunluğu oluşturan bir matris malzemesi bulunmaktadır. Bu iki malzeme grubundan, takviye elamanı kompozit malzemenin mukavemet ve yük taşıma özelliğini sağlamaktadır. Matris malzemesi ise elyaflara yük ve gerilim transferi sağlamanın yanında çoğu takviye elemanı gevrek ve kırılğan olduğundan onların dış yüzeylerini dış ve çevresel etkilere karşı koruma özelliğini sağlamaktadır [23]. Matris olarak kullanılan malzemenin bir amacı da takviye elemanını yük altında bir arada tutabilmek ve yükü takviye elemanı arasında homojen olarak

dağıtmaktır. Böylece plastik deformasyon gerçekleştiğinde ortaya çıkacak çatlak ilerlemesi olayının önüne geçilmiş olur.

2.2. Kompozit Malzemenin Genel Özellikleri

Kompozit malzemelerin üretilmesiyle aşağıda verilen avantajlar sağlanabilmektedir;

- Yüksek dayanım
- Yüksek rijitlik
- Yüksek yorulma dayanımı
- Mükemmel aşınma direnci
- Yüksek sıcaklıklara dayanılma kapasitesi
- İyi korozyon direnci
- İyi termal ve ısı iletkenliği
- Düşük ağırlık
- Çekicilik ve estetik görünüm vb.

Yukarıda bahsedilen avantajlarının yanı sıra, dezavantajları da şöyle sıralanabilir;

- Yüksek maliyet (metallere göre)
- Üretim güçlüğü
- Tasarım ve/veya üretim metot veritabanının metallere daha az olması
- Nem tutabilme özelliği
- Diğer malzemeler gibi geri dönüşümün olmayışı
- Kırılma uzamasının az oluşu

Özetle, 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 [23].

2.3. Kompozit Malzemelerin Kullanım Alanları

Kompozit malzemeler, genellikle bir birleşim malzemelerinin en iyi özelliklerini alacak tarzda imal edilirler. Başlangıçta hafiflikleri sebebiyle uzay sanayinde kullanılmışlardır, günümüzde gıda sektöründen otomotiv sektörüne, inşaat sektöründen denizcilik sektörüne kadar her alanda kullanım imkânları araştırılmaya devam edilmektedir. Kompozit malzemelerin yaygın olarak kullanıldığı başlıca sektörler ve bu sektörlerde kullanılan ürün tipleri şu şekilde özetlenebilir.

İnşaat ve yapı sektörü: Dış ve iç cephe kaplamaları, prefabrik binalar, çatı kaplama levhaları ve çatı detay profilleri, dekoratif uygulamalar, beton kalıpları, taşıyıcı profiller, yağmur suyu taşıma sistemleri, muhtelif amaçlı yalıtım işleri, köprüler vs...

Savunma sanayi ve havacılık sektörü: Uçak ve helikopter gövde parçaları, uçak burun ve kanat parçaları, havan topları gövdeleri ve sandıkları, kurşungeçirmez panel imali, miğferler, mayın ve hücum bot parça ve gövdeleri, barınaklar vs.

Gıda ve tarım sektörü: Silolar, gıda depolama tankları, salamura tankları, kültür balıkçılığı ekipmanları, seralar, tahıl depoları, sulama kanalları vs...

Otomotiv ve taşıma sektörü: Otomobil kaportaları, kamyon ve otobüs yan panelleri, kamyon rüzgârlık ve ön panelleri, karayolu işaret levhaları, karayolu kenar dikmeleri vs.

Kimya sektörü: Asit tankları ve kaplamaları, muhtelif amaçlı boru ve bağlantı parçaları, kimyasal tesis zemin ızgaraları, arıtma ekipmanları, endüstriyel platform ve korkuluklar, havalandırma kanalları vs...

Denizcilik sektörü: Yelkenli/motorlu tekneler, can kurtarma filikaları, şamandıralar, kanolar, deniz motosikleti, sörf tahtası, dubalar, iskeleler, marina ekipmanları vs...

Isı sektörü: Güneş enerjisi sistemi ekipmanları, yalıtım cidarları, izolasyonlu tanklar ve kaplar, soğutma kuleleri, havalandırma kanalları vs...

Elektrik sektörü: Sigorta-panel kutuları, aydınlatma gövdeleri, antenler, izolatörler, devre kesiciler, yalıtkan platformlar, elektrik ve aydınlatma direkleri, kablo taşıyıcıları, kablo kanalları, merdivenler vs...

Diger uygulamalardan örnekler: Spor tribünü oturakları, lunapark gereçleri, karavanlar, tenis raketleri, kasklar, su kaydırakları, havuz başı ekipmanları , golf sopaları, bisikletler, vb. [25].

2.4. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Yapılarında çok sayıda farklı malzeme kullanılabilen kompozitlerin gruplandırılmasında kesin sınırlar çizmek mümkün olmamakla birlikte, Çizelge 2.1’de görüldüğü gibi matris ve takviye elemanlarına göre sınıflandırma yapabilmek mümkündür [26].

2.4.1. Takviye elemanına göre

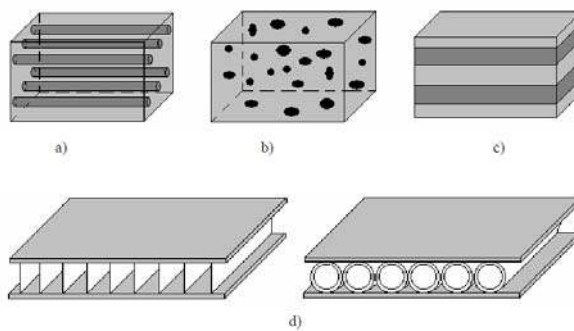
Ana matrisin içerisinde özel mukavemet sağlanması istenen yerlerde/yönlerde bu amaçla kuvvetlendirici takviye elemanı kullanılır. Kompozit malzemeler Çizelge 2.1’de gösterildiği gibi takviye elemanlarına göre 5 grupta değerlendirilir.

Elyaf takviyeli kompozit malzemeler

Fiberlere değişik kaynaklarda lifler veya elyaflarda denilmektedir. Bu malzemeler matris malzemenin içinde yer alıp kompozit malzemelerin en önemli mukavemet elemanlarıdır. Mühendislikte kullanılan malzemelerin pek çoğu fiber şeklinde üretildiklerinde mukavemet ve rijitlikleri kütle hallerindeki değerlerinden çok üstünde olabilmektedir. Karbon fiberlerin çekme mukavemeti kütle halindeki grafitten 50 kat, rijitliği 3 kat daha yüksektir [26].



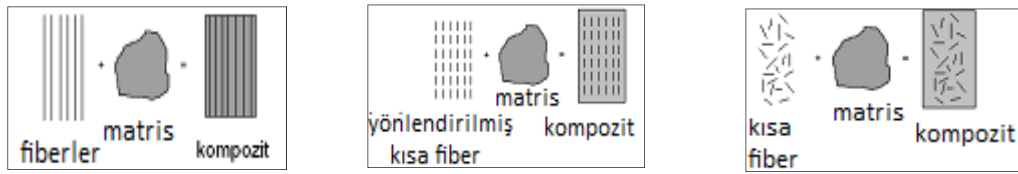
Çizelge 2.1. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması [26]



Şekil 2.1. En genel kullanımlı takviye elemanlı kompozitler; a) fiber takviyeli, (b) parçacık takviyeli, c) tabakalı kompozitler, d) dolgu kompozitler [25]

Şekillerine göre elyaf takviyeli kompozitler Şekil 2.2’de gösterildiği gibi, sürekli elyaf takviyeli, kesikli elyaf takviyeli ve rastgele düzlemsel olarak yönlendirilmiş elyaf takviyeli olarak sıralanabilir [23].

Elyaf formu; uygulama alanına (yapısal veya yapısal olmayan) ve kompozit malzeme üretim metoduna göre seçilir. Yapısal uygulamalar için filament veya uzun lifler önerilir, yapısal olmayan uygulama alanlarında ise kısa lifler tavsiye edilir. Enjeksiyon ve baskı kalıplamada kesikli lifler kullanılırken, elyaf sarma, profil çekme, rulo sarımda filament lifler kullanılır [23, 27].



Şekil 2.2. Şekillerine göre elyaf takviyeli kompozit malzeme çeşitleri (a) sürekli elyaf takviyeli, (b) kesikli elyaf takviyeli, (c) rastgele düzlemsel olarak yönlendirilmiş [27]

Son zamanlarda takviye elemanı olarak kullanılan elyafların başlıcaları; cam, bor, silisyum karbür, alümina, aramid, karbon elyaf olarak sayılabilir.

Cam elyaflar

Cam elyafın esasını silis-kum meydana getirmekle beraber belirli oranlarda sodyum, kalsiyum, alüminyum, bor ve demir gibi elementlerin oksitlerinden oluşur. Polimer esaslı kompozitlerde yaygın olarak kullanılan ve en ucuz olan takviye elemanıdır [23].

Cam elyafların bazı özellikleri aşağıdaki gibi özetlenebilir;

- Yüksek çekme mukavemetine sahiptirler, birim ağırlık başına mukavemeti çelikten daha yüksektir.
- Isıl dirençleri düşüktür. Yanmazlar, ancak yüksek sıcaklıkta yumuşarlar. Bu özellikleri katkı malzemeleri kullanılarak iyileştirilebilir.
- Kimyasal malzemelere karşı dirençlidirler.

- Nem tutma özellikleri yoktur, ancak cam elyaf
- flı kompozitlerde matris ile cam elyaf arasında nemin etkisi ile bir çözülme olabilir. Özel elyaf kaplama işlemleri ile bu etki ortadan kaldırılabılır.
- Elektriği iletmezler. Bu özellik sayesinde elektriksel yalıtımın önem kazandığı durumlarda cam elyaflı kompozitlerin kullanılmasına imkan tanırırlar [22, 28].

Başlıca cam elyaf çeşitleri şöyledir;

Cam fitil (daimi lif) : Mukavemetleri çok yüksektir.

Kumaş tipi cam elyaf: Mukavemeti yüksektir. 2 yönlü takviye için elverişlidir. Birim ağırlığı arttıkça mukavemeti azalır. Fiyatı ucuzdur.

Keçe tipi cam elyaf: Belli uzunluklarda kırılan demetlerin belli bir boyda bir bağlayıcı ile bir araya getirilmesi sonucu elde edilir. Mukavemeti ve fiyatı kumaş tipi elyaftan daha düşüktür.

Küçük lif tipi cam elyaf: Liflerin 0,5-1 - 1,5 - 2 cm boylarında doğranmaları ile keçe imalinin ara ürünü olarak imal edilir. Presle takviye parçası yapımında ve tabanca ile püskürtmede kullanılır [29].

Bor Elyafı

Bor elyafı aslında kendi içlerinde kompozit yapıdadırlar. Çekirdek olarak adlandırılan ince bir flamanın üzerine bor kaplanarak imal edilirler. Çekirdek genellikle tungstendir. Karbon çekirdek de kullanılabilir ancak bu yeni bir uygulamadır

Bor elyafların silisyum karbür veya bor karbür ile kaplanmasıyla yüksek sıcaklıklara dayanım artar. Özellikle bor karbür kaplanmasıyla çekme mukavemeti önemli ölçüde artırılabilir. Bor elyafların erime sıcaklıkları 2040 °C civarındadır [22].

Silisyum Karbür Elyaflar

Bor gibi, silisyum karbürün tungsten çekirdek üzerine kaplanması ile elde edilirler. 0,1 mm ile 0,14 mm çaplarında üretilirler. Yüksek sıcaklıklardaki özellikleri bor elyaflardan daha iyidir. Silisyum karbür elyaf 1370 °C'de mukavemetinin sadece %30'unu kaybeder. Bor elyaf için bu sıcaklık 640°C'tir

Bu elyaflar genellikle titanyum matrisle kullanılırlar. Jet motor parçalarında titanyum ve alüminyum alaşımlı matris ile kullanılırlar. Ancak silisyum karbür elyaflar bor elyaflara göre daha yüksek yoğunluğa sahiptirler. Silisyum karbürün karbon çekirdek üzerine kaplanması ile üretilen elyafların yoğunluğu düşüktür [22, 28].

Alümina elyaflar

Alümina, alüminyum oksittir (Al_2O_3). Elyaf formundaki alümina 0,02 mm çapındaki alümina flamanın silisyum dioksit (SiO_2) kaplanması ile elde edilir. Bu malzemeler yüksek sıcaklık dayanımları nedeniyle uçak motorlarında kullanılmaktadır [22].

Aramid elyaflar

Uçak yapılarında, düşük basma mukavemetleri nedeniyle, karbon elyaflarla birlikte hibrid kompozit olarak, kumanda yüzeylerinde kullanılmaktadırlar. Aramid elyaflar elektriksel iletkenliğe sahip değildirler. Basma mukavemetlerin iyi olmamasının yanı sıra kevlar /epoksi kompozitlerinin nem tutma özellikleri kötüdür [22].

Karbon elyaflar

Karbon elyafların en önemli özellikleri düşük yoğunluğun yanı sıra yüksek mukavemet ve tokluk değerleridir. Karbon elyaflar, nemden etkilenmezler ve sürünme mukavemetleri çok yüksektir. Aşınma ve yorulma mukavemetleri oldukça iyidir. Bu nedenle askeri ve sivil uçak yapılarında yaygın bir kullanım alanına sahiptirler. Karbon elyaflar çeşitli plastik matrislerle ve en yaygın olarak epoksi reçinelerle kullanılırlar. Ayrıca karbon elyaflar alüminyum, magnezyum gibi metal matrislerle de kullanılırlar [22, 30].

Bu tez çalışmasında kullanılan takviye elamanı karbon fiberdir.

Partikül takviyeli kompozit malzemeler

Rijitlik ve mukavemete artış 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 oluşturdıkları 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 [26].

Dolgu kompozit malzemeler

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 [26].

Tabakalı kompozit malzemeler

Tabakalı kompozit malzemeler en az iki tabakadan oluşurlar. Ancak, dayanım ve mekanik özelliklerin özellikle önem taşıdığı hallerde, malzemenin bu özelliklere sahip olabilmesi için en az üç veya daha fazla tabaka kullanılmaktadır. Bu tabakaları oluşturan malzemeler farklı olabileceği gibi, aynı tür malzemedenden de yapılabilmektedir. Tabakalı kompozitlerin üretiminde, genel olarak tabaka niteliğindeki her türlü malzeme kullanılabilir. Burada ilke birbirlerinin özelliklerini olumlu yönde takviye edecek bir kompozisyonun oluşturulmasıdır.

Tabakalı kompozitlerin üretiminde farklı türden veya tek bir türden malzeme kullanılabilir [31]. Bu tez çalışmasında tabakalı kompozit levhalar kullanılmıştır.

2.4.2. Kullanılan matrise göre

İçine yerleştirilmiş kuvvetlendirici elyafları katılaştığında belli bir formda tutacak ve toplam mukavemette de bir görev üstlenecek üniform dolguya matris denir. Matrisler, fiberlere göre genellikle düşük yoğunluk, rijitlik (stiffness) ve dayanıklılığa (strenght) sahiptir. Matrisler, kırılgan (brittle), elastik veya plastik olabilir. En genel kullanıma sahip matrisler seramik, metal ve polimerlerdir. Her biri özel yararlarıya sahip olduğu gibi limitasyonlara da sahiptir.

Polimer matrisli kompozitler (PMK)

Termoset ve termoplastikler olarak iki gruba ayrılan polimer matrisler genelde sürekli fiberlerle kullanılır. Bunlardan en önemli olanları sürekli fiberlerle takviye edilen polyester ve epoksi reçine matrislerdir. Epoksi reçine matrisli kompozitlerin en önemli uygulamalarından biri havacılık uygulamalarıdır. Polimer matrisli kompozit malzemelerin kullanıldığı ortamlarda göz önüne

alınması gereken en önemli faktörler sıcaklık ve nemdir. Polimer matrisli kompozitlerin üretilmesinde en çok bilinen ve en fazla kullanılan metotlardan bazıları; elle sıvama, telle sarma, kese kalıplama işlemi, sıvı akış tekniği, takviyeli reaksiyon enjeksiyon kalıplama, ekstrüzyon ve ısıtma oluşturma metodudur. Polimerlerde kullanılan takviye malzemelerinden en önemli olanları; cam, bor ve karbon fiberlerdir [29].

Metal matrisli kompozitler (MMK)

MMK malzemelerin küçümsenmeyecek üstünlükleri mevcuttur. MMK 'ler;

- Yüksek elastik modüle sahiptirler,
- Yüksek mukavemet (çekme, basma, aşınma, sürünme dayanımı) gösterirler,
- Daha yüksek sıcaklıklarda çalışırlar,
- Metallerin süneklik ve tokluk, seramiklerin yüksek mukavemet ve yüksek modül özelliklerini birleştirirler,
- Tekrar üretilbilir özelliklere sahiptirler,
- Düşük yoğunluk değerleri verirler,
- Sıcaklık değişiklikleri veya ısıtma şoklarına karşı düşük hassasiyet gösterirler,
- Yüksek yüzey dayanıklılığı ve yüzeydeki dalgalanmalara karşı düşük hassasiyete sahiptirler,
- Yüksek elektrik ve ısıtma iletkenlik özellikleri mevcuttur

Metal matrisli kompozit malzemeler takviye elemanı olarak sürekli fiberler, süreksiz (kısa) fiberler, partiküller vb. kullanılmaktadır. Kompozit malzemeler takviye elemanının ismiyle anılırlar. Örnek olarak sürekli fiber ile güçlendirilmiş ise; sürekli fiber takviyeli MMK veya kısa fiberler ile güçlendirilmiş ise kısa fiber takviyeli MMK malzemeler olarak adlandırılmaktadır. Metal matrisli kompozitler genelde iki bileşenden

meydana gelmektedir. Bunlardan biri metal matris (genelde bir metal alaşıımıdır) diğeri ise takviye malzemesidir (genel olarak bir metaller arası bileşik bir oksit, bir karbür veya bir nitrür). Kompozitin üretilmesinde matris ve takviye malzemesi beraber olarak karıştırılırlar. Bir kompoziti elde etmek için başlangıçta farklı elemanlar seçilir; örneğin: metal matris ve takviye malzemesi. Tüm durumlar için matris bir metaldir. Ancak matris olarak saf metalin kullanılmasına çok nadir rastlanır. Genelde matris bir metal veya metal alaşıımıdır [29].

Seramik matrisli kompozitler (SMK)

Seramikler, metal ve metal olmayan elemanlardan meydana gelen inorganik bileşikler olup, doğada kayaların dış etkilere karşı parçalanması sonucu oluşan kaolen, kil ve benzeri maddelerin yüksek sıcaklıkta pişirilmesi ile elde edilen malzemelerdir. Seramikler, gevrek olduklarından mikro yapısal kusurları çentikler ve mikro çatlaklar gerilme yığılmasına yol açtıklarından çekme dayanımı düşüktür. Basma dayanımları ise çok yüksektir. Ancak mikro yapısal kusurları azaltacak şekilde çok ince çaplı elyaflar üretilerek daha dayanıklı kompozit üretmek mümkün olmaktadır. Bu malzemelerde kayma direnci çok yüksek olduğundan plastik şekil verme olmaksızın gevrek tarzda kırılırlar [23].

2.5. Kompozitlerin Mekanik Davranışı

Kompozit malzemelerin mekanik davranışı, birçok konvensiyonel mühendislik malzemesine göre farklılık gösterir. Çoğu mühendislik malzemesi izotrop ve homojen yapıdadır. Bunun tersi olarak kompozit malzemeler genellikle homojende veya/ve izotrop değildirler.

Homojen cisim, her yerinde aynı özelliğe sahip olan malzemedir; yani özellikleri malzemenin içindeki konumundan bağımsızdır.

Heterojen Cisim; her yerinde aynı özelliğe sahip olmayan malzemelerdir; yani özellikleri malzemenin içindeki konuma bağlıdır.

Izotrop cisim, içindeki bir noktanın her yöne aynı özelliği gösterdiği malzemedir; yani özelliği bir noktanın yöneliminden bağımsızdır. Yapıda bir sıcaklık söz konusu olduğunda homojenlik bozulmakta ancak izotropi korunmaktadır.

Anizotrop cisim; içindeki bir noktanın her yöne gösterdiği özellik farklıdır, yani özelliği bir noktanın yönelimine bağlıdır.

Ayrıca bazı kompozit malzemelerde orthotropic özellik gösterir ki, malzeme içindeki bir noktanın karşılıklı birbirine dik üç yönde farklı özellikler gösterirken, karşılıklı birbirine dik üç düzlemde simetrik malzeme özelliği göstermesidir.

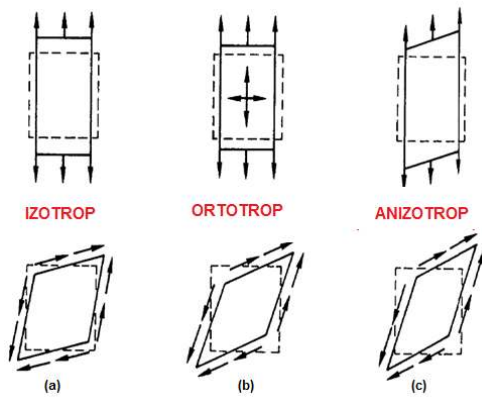
İzotropik olmayan (sık sık orthotropic) özellikler gösteren kompozit malzemelerin mekanik davranışı, konvensiyonel izotropik malzemelere göre farklılık göstermektedir. Eş yönlü, orthotropic ve eş yönlü olmayan malzemelerin yük altında normal ve kayma gerilmeleri Şekil 2.3'de verilmiştir.

Şekil 2.3 (a)'da görüldüğü gibi izotrop malzemelerde, normal gerilmeler, normal gerilmenin uygulandığı yönde uzamaya ve bu yönün dik doğrultunda büzülmeye yol açarlar. Ancak kayma deformasyonu oluşmaz. Kayma gerilmesinin uygulanması, sadece kayma deformasyonuna açar ve herhangi bir yönde uzama veya büzülmeye yol açmaz. Sadece iki malzeme özelliği, elastisite modülü (gerilme-gerinme eğrisinin eğimi) ve poisson oranı (zorlanmış şekil değiştirme miktarının, ilk olarak uygulanan şekil değişimine oranını (tabi olarak eksi işaretlisi)) deformasyonu tanımlamak için yeterli olmaktadır. Kayma modülü (bir noktadaki kayma gerilmesinin, kayma gerinmesinin oranı) elastisite modülü ve poisson oranı yerine kullanılabilir.

Şekil 2.3 (b)'de görüldüğü gibi orthotropic malzemeler, eş yönlü malzemeler gibi, esas malzeme yönündeki (malzemenin 3 dikey simetri eksenlerinin birinin kesişim noktası boyunca) normal gerilme uygulamasında gerilmenin olduğu yönde uzama ve bu yöne dik doğrultuda büzülme özelliği gösterir.

Normal gerilme altında bir ana yöne uzantısının büyüklüğü diğer yönde aynı normal stres altında başka bir ana malzeme yönündeki uzantısından farklıdır. Bundan dolayı farklı young modüllerine sahiptir. Buna ek olarak, iki ana malzeme yönündeki değişik malzeme özellikleri, aynı şekilde yüklenmiş ve yükün aynı yönündeki aynı elastik modüle sahip izotrop malzemeye göre daha az veya daha çok büzülmeye yol açabilir. Kayma gerilmesinin uygulanması, sadece kayma deformasyonu yol açar. İzotropik malzemelerden farklı olarak kayma modülünü diğer malzeme özelliklerine bağlı değildir. Bundan dolayı malzemenin mekanik davranışını tanımlayabilmek için en az 5 malzeme özelliği tanımlamak gerekmektedir.

Şekil 2.3 (c)'de görüldüğü gibi, anizotrop malzemelerde, normal gerilmeler sadece gerilme yönünde uzama ve gerilme yönüne dik doğrultuda büzülmeye yol açmaz, ayrıca kayma deformasyonu da oluşur. Diğer taraftan kayma gerilmesinin uygulanması, kayma deformasyonunu ek olarak uzama ve büzülmeye da yol açar.



Şekil 2.3. (a) Eş yönlü, (b) orthotropic (c) eş yönlü olmayan malzemelerin mekanik davranışları [32]

Kompozit malzemelerin heterojen ve izotrop olmayan yapılar olmaları nedeniyle tasarım ve analizlerinde mikro mekanik ve makro mekanik olarak incelenirler. Mikro mekanik de, mikroskobik ölçeklendirme ile kompoziti oluşturan matris ve elyafların bireysel rollerinden hareketle kompozit yapının özellikleri incelenir. Makro mekanikde kompozit malzeme homojen bir yapı olarak kabul edilir ve incelemeler bu yönde geliştirilir. Mikro mekanik ve makro mekanik modeller ile kompozit malzeme tasarımlarında maksimum verimle istenilen özelliklerin sağlanması mümkün olmaktadır [32].

3. KOMPOZİT MALZEMELERİN DARBE DAVRANIŞI

Darbe, etkili bir kuvvetin ani olarak, malzemenin bütününe veya bir kısmına uygulanması olarak tanımlanabilir [36].

Bölüm 1 giriş kısmında düşük, yüksek, aşırı hızlı darbe tanımları verilmişti. Havacılık sektöründe düşük hızlı, yüksek hızlı ve aşırı hızlı darbelere örnekler şu şekilde verilebilir;

- Düşük hız; imalat ve bakım sırasında parçanın üzerinde takım düşmesi, uçağın yerde olan çarpmaları (erişim merdivenleri, yük vagonlarının veya küçük araçların çarpması)
- Yüksek hız; kuş çarpması, motordan parça kopması
- Aşırı hız; mermi vuruşu vb.

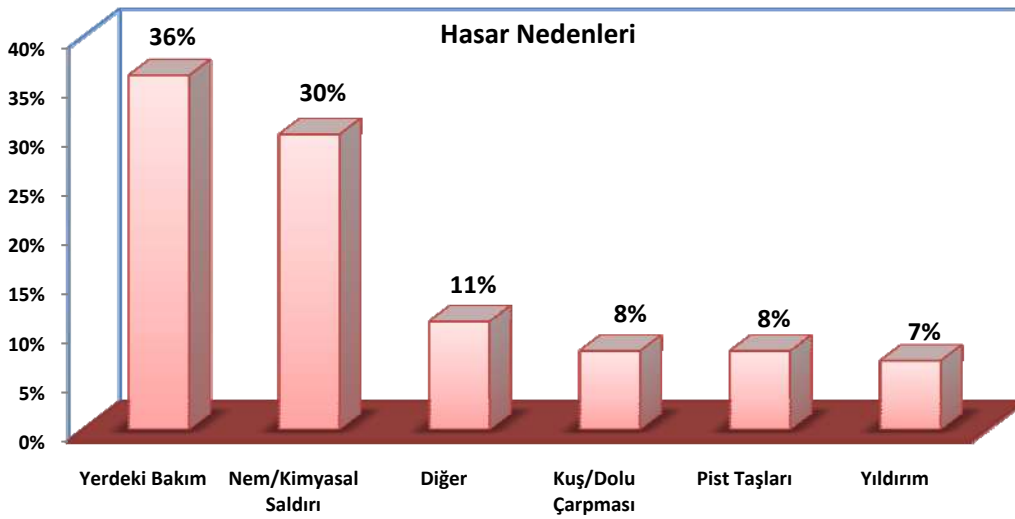
3.1. Kompozitler Neden Darbe'ye Eğilimlidir?

Kompozit yapılarda plastik deformasyon eksikliği, belirli bir stress seviyesine erişildiğinde, yerel ya da yapısal zayıflamaya neden olan kalıcı hasarın oluşması anlamına gelmektedir. Plastik deformasyona uğramasının ardından halen bütünlüğünü (örneğin su geçirmezlik) koruyabilen bir metalden farklı olarak, belirli bir stress seviyesini bazı yapısal özelliklerini halen koruyarak da olsa aşan kompozitler kalıcı olarak hasara uğramıştır. 1 J ya da daha az bir enerjide 2 m/s 'de bir çarpma, hakikatte kompozit tabakalarda geri dönüşü olmayan hasara neden olabilir. Özetlemek gerekirse, düşük hızlı çarpma sonucu oluşan hasarların nedenlerini şu şekilde belirtilebilir [36]:

- Düşük enine veya tabakalar arası kayma direnci
- Plastik deformasyonun azlığı ya da olmaması
- Tabakalı yapı (fiberlerin efektif olarak kullanılması ve anizotropi gerekir ise gereklidir).

IATA (International Air Transportation Association) tarafından yapılan araştırmada bir uçağın servis süresi boyunca maruz kalabileceği hasar nedenleri Şekil 3.1’de grafiksel olarak gösterilmiştir [38].

Yerdeki bakım en çok hasar oluşturan nedenlerden biri olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Uçaklarda servis hayatı boyunca maruz kalacağı hasar nedenlerinin yüzdeleri

3.2. Kompozitler Malzeme Darbe Testleri

Kompozit malzemelerin darbe davranışını karakterize etmek için standart bir test tekniği veya farklı ülkeler, kuruluşlar ve araştırmacılar arasında yaygın bir şekilde kabul edilen herhangi bir teknik mevcut değildir. Bu olumsuzluklara rağmen kompozit malzemelerin darbe dirençlerinin belirlenmesi amacıyla günümüzde aşağıdaki test yöntem ve cihazları yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunlar genellikle üç kategoride sınıflandırılabilirler [39]:

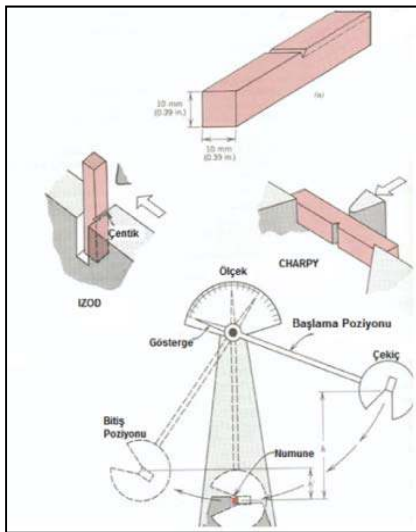
- Ağırlık düşürme testleri,
- Sarkaç testleri (Izod ve Charpy),
- Hava veya gaz silah testleri

3.2.1. Ağırlık düşürme darbe testleri

Ağırlık düşürme testlerini yaygın olarak kullanılmakta ve değişik tasarımlara hizmet etmektedir. Genellikle bir ağırlık, belli bir yükseklikten serbest olarak bırakılır. Tekrarlı çarpmayı önlemek için belirli mekanik aksamla donatılırlar [40]. Bu tez çalışmasında, ağırlık düşürme metodu ile darbe testleri gerçekleştirilmiştir. Bu metodun ayrıntıları 5.1. bölümde anlatılmıştır.

3.2.2. Sarkaç testleri (Izod ve Charpy)

Charpy ve Izod darbe test yöntemlerinde çentik açılmış bir test numunesi, standart bir yükseklikten bırakılan bir sarkaç ile darbeye maruz bırakılır. Darbeden sonra sarkacın çıktığı yükseklik tespit edilerek sarkacın ilk ve son konumdaki enerji farkı numune tarafından yutulan darbe enerjisi olarak ölçülür. Darbeden sonraki sarkacın yüksekliği ne kadar az ise, yutulan darbe enerjisi, dolayısıyla malzemenin darbe direnci veya tokluğu da o derece yüksektir. Charpy ve Izod test yöntemleri ufak farklılıklar dışında birbirine çok benzerler. Bu farklılıklardan en önemli olanı, Şekil 3.2’de gösterildiği gibi numunenin desteklenme şekli ile çentiğin destek ve darbe noktalarına göre konumudur [39].



Şekil 3.2. Charpy ve Izod testleri'nin örnek görüntüsü [41]

3.2.3. Hava veya gaz silah testleri

Split Hopkinson Bar (Kolsky Bar)

Yüksek deformasyon hızı istendiğinde sarkaç ve ağırlık düşüre testleri yeterli olmamaktadır. $10^{-2}/s$ - $10^{-3}/s$ değerlerindeki deformasyon hızlarına ulaşmak istendiğinde genellikle Split Hopkinson bar tekniği kullanılmaktadır. Bu teknikte $10^{-2}/s$ - $10^{-3}/s$ değerlerine kadar deformasyon hızları kolaylıkla elde edilebilmekte, istenirse özel aparatlar yardımıyla $10^{-4}/s$ değerlerine çıkılabilmektedir. Tipik bir hopkinson barı ekipmanı darbe basma testleri için kullanılır [40].

Test numunesinin yerleştirildiği giriş ve çıkış değerleri için iki tane çelik barı ve ve çubuklar üzerinden birim şekil değiştirmenin ölçüldüğü gerinim ölçerlerden oluşmaktadır. Bir gaz tabancası olayı başlatır ve vurucu tetikler. Vurucunun alıcı çubuğa çarpmasıyla oluşan gerilim dalgası sırasıyla, birinci ve ikinci gerilimölçerler aracılığı ile kayıt altına alınır. Gerilim dalgası sonra numuneye geçer ve numune sıkıştırılır. Gerilim dalgasının bir bölümü çekme dalgası şeklinde yansıtılır ve ikinci gerilimölçer tarafından kaydedilir. Dalga enerjisinin bir kısmı numune tarafından yutulur ve kalanı verici çubuğa aktarılır ve üçüncü gerilimölçer tarafından kayıt altına alınır [42].

Uçakların kalkış ve iniş sırasında havaalanından yüksek hızlarda çarpan taşların oluşturacağı hasarlar gaz tabancı kullanılarak simüle edilebilir. Ancak kompozit malzeme kazayla düşen parçanın, kompozit malzeme üzerinde oluşturacağı hasarlar en iyi ağırlık test düşürme cihazı ile simüle edilmektedir [43].

Balistik test düzeneği

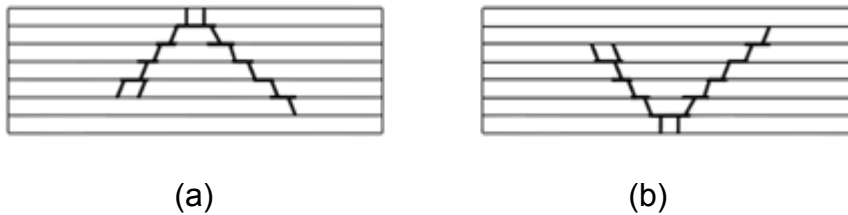
Genellikle balistik deneylerde mermi kullanılmaktadır. Özellikle askeri alanda bu çalışmalar yapılmış olup, çelik yelekler ve zırhlı araç malzemeleri üzerinde

Matris Kırılması

Tabakalı kompozit plaklarda en çok görülen hasar tipi matris kırılması hasarıdır. İlk olarak matris hasarları başlar, daha sonra katmanlar arası ayrılmalar (delaminasyon) görülür [2].

Matris kırılması daha çok epoksi gibi gevrek olan malzemelerde görülür. Matris elyaftan daha az şekil değişimine sahip olduğundan darbeli kırılma matriste başlayacaktır. Matris kırığı tabaka lif yönlenme açısına bağlıdır. Matris kırığı hasarlı tabakadaki lif yönlenme açısına paralel yayılır ve oluşumu kompozit levhanın rijitliğini azaltır [44].

Kalın kompozitlerde; yüksek ve lokal temas gerilmelerinden dolayı matris kırılması vurucunun çarptığı ilk tabakacıkta meydana gelir. Bu durumda, hasar ağacın dalları şeklinde olup tabakanın üst tabakacığından alt tabakacığına doğru ilerler (Şekil 3.4 (a)). İnce kompozitlerde ise levhanın eğilmesi nedeniyle matris kırılması en alt tabakacıkta oluşur (Şekil 3.4 (b)). Bu durumda yine hasar ağaç dalları şeklindedir. Fakat hasar ilerlemesi bu sefer alt tabakacıktan üst tabakacığa doğru olur [43].

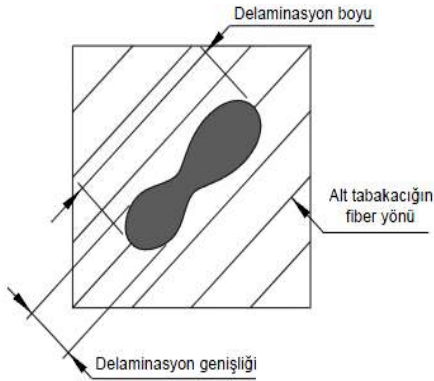


Şekil 3.4. a) Kalın ve (b) ince levhalar için matris kırığı hasar ilerlemesi

Tabaka Ayrılması (Delaminasyon)

Delaminasyon, aynı katman grubundaki tabakalar arasında değil, farklı fiber oryantasyonlarına sahip tabakalar arasında matris bakımından zengin bölgede meydana gelen bir kırılmadır. Tabakalı kompozit malzemede katmanlar arasındaki farklı fiber yönlenmelerinden dolayı bu katmanların

eğilme rijitlikleri farklılık gösterir. Delaminasyonun en önemli sebebi; tabakalar arasındaki bu eğilme rijitlik farklılığı ve eğilme kaynaklı gerilmelerdir. Matris kırılması delaminasyonun başlaması açısından gerekli bir faktördür. Matris kırılması ve delaminasyon arasında sıkı sıkıya bir ilişki mevcuttur. Delaminasyonlar, tabakalar arası arayüzey bölgesinde meydana gelirler [38]. Deneysel çalışmalar delaminasyonun farklı lif yönlerine sahip birbirine komşu iki tabakacık arasında meydana geldiğini göstermektedir. Genel itibariyle delaminasyon Şekil 3.5’de görüldüğü gibi olup uzun kısmı alt tabakacığın lifi yönündedir. En büyük delaminasyon en alt ara yüzeyde meydana gelirken üst ara yüzeylere gidildikçe delaminasyon küçülür [45].



Şekil 3.5. Tipik bir delaminasyon türü [39]

Fiber Kırılması

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

1. Yüksek lokal gerilmeler ve nüfuziyetin yaratmış 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 [38].

Levhanın tamamen hasara uğraması ancak tüm fiberlerin kırılması ile mümkün olur. Keskin uçlu bir vurucu, kör uçlu bir vurucuya göre daha fazla fiber kırılması meydana getirecektir. Fiber kırılması başladığında levhanın yük taşıma kapasitesi tamamen bitmemiştir. Çünkü levhanın diğer tabakacıklarında yükü taşıyabilecek fiberler hala vardır. Yük taşıma kapasitesinin tamamen bitmesi levhanın tüm fiberlerinin hasara uğraması ile olur [44].

Darbe hataları, inceleme ölçütleri ve hasara sebep olan enerji seviyesi ile belirlenir. İnceleme ölçütü aşağıdaki durumlar için uygulanır:

- Özel Hassas Muayene Metotları (Ultrasonik, radyografi)
- Gözle Ancak Görülebilen Darbe Hasarı (BVID): X mm'den (projelere göre değişmektedir) derin olmayan durum olarak belirtilir. Hasar görmüş parça kırılma yükü değerini uzun süre koruyabilmelidir.
- Gözle Görülebilen Darbe Hasarı (VID) : Gözlemlene süresince hasar büyümemelidir. Hasar görmüş parça limit yük değerini uzun süre koruyabilmelidir.
- Bariz Görülebilen Darbe Hasarı (OVID) : Uzak mesafeden dahi fark edilebilen hasarlardır. Hasar görmüş parça limit yük değerini uzun süre taşıyabilmelidir.
- Kopmalar Sonucu Oluşan Hasar (DSD) :Tamir edilemez hasarlardır. İniş anına kadar olan yükleri koruyabilmelidir.

4. DENEYSEL ÇALIŞMA HAZIRLIĞI

4.1. Test Numunelerin Tasarımı

Günümüzde kullanılan modern kompozitlerin bir önemli avantajı yük gereksinimlerine cevap verecek şekilde fiber'lerin yöneliminin düzenlenebilmesidir. Bunun anlamı, bir kompozit tasarımcısının, tasarımında sadece malzemeyi belirtmesinin dışında bir de tabakadaki fiber yöneliminin ve tabakaların nasıl düzenlendiğinin (ply stackup) gösterme zorunluluğunun olmasıdır [33].

Havacılık sanayisinde levha elastik sabitlerinin maksimuma ulaştığı fiberlerin 0^0 , 90^0 , $\pm 45^0$ açıyla yöneldiği tabakalar kullanılmaktadır [22].

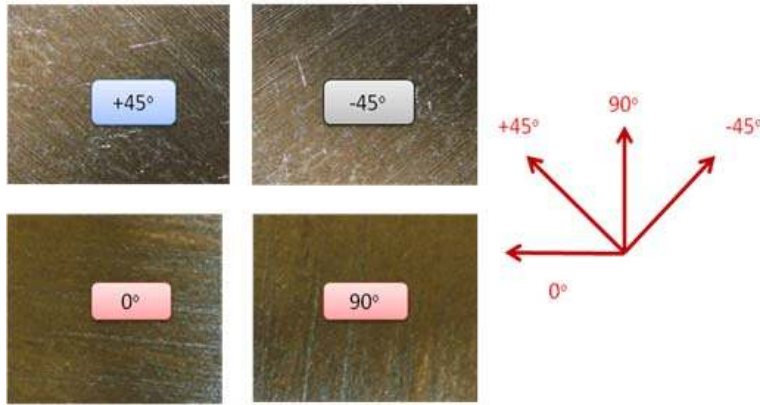
Bu tez çalışmasındaki uçak kanat parçasından hava freni (spoiler) panel ve kiriş parçaları referans alınarak ve genel tasarım prensipleri göz önünde bulundurularak farklı kalınlıklarda 12 adet farklı numune tasarlanmıştır. Çizelge 4.2'de gösterildiği gibi fiberlerin 0^0 , 90^0 , $\pm 45^0$ açıyla yöneldiği tabakalı yapılar kullanılmıştır.

Her bir tabakalı yapı fiberlerin x eksenine göre açısı ile belirlenir. 0^0 dereceli fiberler hem tek yönlü hem çift yönlü dokunmuş tabakalarda maksimum eksensel yük taşımaktadır.

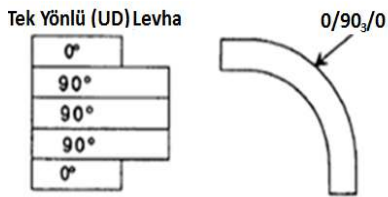
4.1.1. Oryantasyon açılarının gösterimi

Tabakalardaki açılar birbirinden farklı ise Şekil 4.1'de gösterildiği kesme işareti (/) ayrılarak gösterilir. Köşeli parantez içinde, kalıp yüzeyinden başlayarak, aralara virgöl konarak sırası ile açılar belirtilir. Ardı ardına aynı açığa sahip olan tabaklara alt indeks ile kaç adet olduğu yazılır. Tek yönlü tabakalarda aynı büyüklüğe sahip açılar belirtilirken “+” ve “-” işareti kullanılır. Aynı işarete sahip, aynı açılar için alt indeks ile adedi belirtilebilir. Pozitif ve

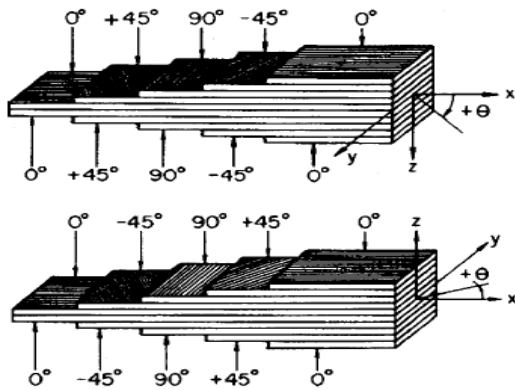
negatif açılar seçilen koordinat sistemine uyumlu olarak belirtilmelidir. Bir koordinat sisteminde soldan sola pozitif yönken, bir başkasında negatif olabilir. Eğer Y ve Z eksenleri tersine çevrilirse, Şekil 3.2’de gösterildiği ± 45 tabakaları da tersine döner [33].



Resim 4.1. Fiber oryantasyon açıları



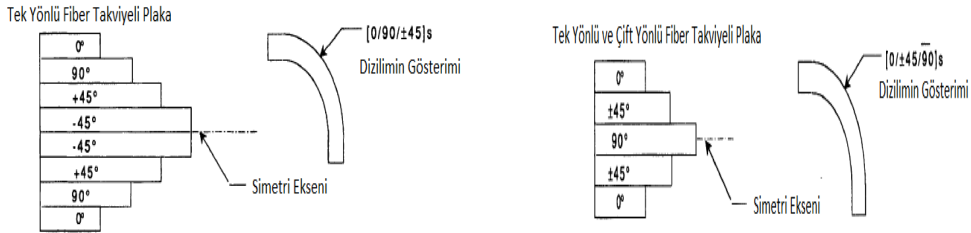
Şekil 4.1. Fiber oryantasyon açılarının gösterilmesi [33]



Şekil 4.2. Pozitif/negatif fiber oryantasyon açılarının belirlenmesi [33]

Tabaka sayısı çift ve simetrik olan levhalar, Şekil 4.3’de gösterildiği gibi kalıp yüzeyinden orta noktaya kadar sırası ile yazılır ve köşeli parantezin altına “s”

(simetrik anlamına gelir) yazılarak, diğer kısım gösterilmeden kısaltılabilir. Tabaka sayısı tek ve simetrikse, tabaka sayısı tek olan gibi gösterilir sadece ortada ki levhanın Şekil 4.3’de olduğu gibi çizilir.



Şekil 4.3. (a) tabaka sayısı çift, (b) tabaka sayısı tek olan levhalarda dizilimin gösterimi

Bazen tabakaların hangi sırada dizildiği değil, hangi oranlarda dizildiği bilmek daha önemli olabilir. Bunun için 2 gösterim metodu vardır;

Tabakalı yapıda kullanılan yüzde ve kalınlık şeklinde gösterim

“Tabaka Kalınlığı-A/B/C” şeklinde bir gösterimi vardır. “A”, tabakalı yapı içinde kullanılan 0^0 açılı tabakaların, “B”, $\pm 45^0$ açılı tabakaları, C ise 90^0 açılı tabakaların yüzdesini ifade eder. Her bir katın kalınlığı sabit ise, tabaka içindeki yüzdelerin miktarları hesaplanabilir. Bu tez çalışmasında kullanılan test numuneleri, kalınlık ve yüzdeleri ile ifade edilmiştir. Her bir katın kalınlığı sabit ve 0.184 mm’dir.

Tabakalı yapıda kullanılan açıların adetlerinin belirtilmesi

Sadece her bir tabakadan kaç adet kullanıldığı belirtilir. Gösterim şekli A/B/C şeklindedir. “A”, tabakalı yapı içinde kullanılan 0^0 açılı tabakaların, “B”, $\pm 45^0$ açılı tabakaların, C ise 90^0 açılı tabakaların yüzde (%) sayısını ifade eder.

4.1.2. Genel tasarım prensipleri

Tabakaların yönelimini, levha boyunca tamamen dağıtılmalıdır;

Bu basit kural homojen bir tabakalı yapı oluşumunu sağlar ki bu da kenar delaminasyonları (tabaka ayrılması) dahil olmak üzere, bir çok istenmeyen tabakalı yapı davranışlarını engeller. Bu durumda sadece tek bir çeşit katman ile optimize yapılamayacağı için, en iyi çözüm tabaka gruplanmasının ve dizilim sırasının mümkün olduğunca homojen yapılmasıdır. Çizelge 4.2’de görüldüğü gibi, levhalar bu kurala uygun tasarlanmıştır.

Genellikle, 0^0 , 90^0 , $\pm 45^0$ standart yönelim açılarının her birinden en az %10 kullanılmalıdır.

En az 4 çeşit açılı tabaka kullanmak, tabakalı yapıların matrislerinin fibersiz yönlerinin baskın olmasını engeller. Matrisler düşük mukavemetlidirler ve lineer değildirler. Bu tez çalışmasındaki tüm levhalar Şekil 4.3’de görüldüğü gibi, bu kurala uygun tasarlanmıştır.

Aynı açılı tabakaların gruplandırılması önlenmelidir.

4 veya daha fazla sayıda ki aynı açılı tabakaları yan yana dizmemek gereklidir. Matris kırılmalarını önlemek için bu kurala uyulmasında fayda vardır. Çizelge 4.2’e göre tüm test numuneleri bu kurala uyacak şekilde tasarlanmıştır.

Simetri

Genel olarak düzlem gerinmelerinden, tabakalardaki birleşik eğilmeler / gerilmelerden ve analizlerin karmaşıklığından dolayı, simetrik tabakalar kullanılır. Simetrik levhalar oluşturabilmek için, orta eksenin aşağısında ve yukarısında tabakalar aynı olmalıdır (aynı kalınlık, aynı malzeme özelliği ve

aynı açısal oryantasyon). Bu tez çalışması için tasarlanan 12 test numunesi aşağıda gösterildiği gibi simetriktir.

04 Nolu Levha : $[+45/0/-45/0/0/-45/0/+45/0/90]_s$

05 Nolu Levha : $[+45/0/-45/0/0/+45/-45/0/0/-45/90/0/+45/0/\overline{90}]_s$

06 Nolu Levha : $[+45/0/-45/0/0/-45/0/+45/0/90/90/0/+45/0/-45/0/0/-45/0/+45]_s$

07 Nolu Levha : $[+45/0/0/0/-45/0/-45/0/0/90]_s$

08 Nolu Levha : $[+45/0/0/-45/0/0/-45/0/0/+45/0/90/0/0/\overline{90}]_s$

09 Nolu Levha : $[+45/0/0/-45/0/0/+45/0/0/-45/90/0/0/-45/0/0/90/0/0/+45]_s$

10 Nolu Levha : $[+45/0/0/-45/90/-45/0/0/45/90]_s$

11 Nolu Levha : $[+45/0/0/90/-45/0/-45/0/+45/90/90/0/-45/0/+45]_s$

12 Nolu Levha : $[+45/0/0/-45/90/-45/0/0/+45/90/90/+45/0/0/-45/90/-45/0/0/+45]_s$

13 Nolu Levha : $[+45/0/-45/0/-45/+45/90/90/-45/\overline{0}]_s$

14 Nolu Levha : $[+45/0/-45/0/-45/90/+45/0/+45/90/+45/90/+45/0/-45/90/90/-45/0/-45]_s$

15 Nolu Levha : $[+45/-45/-45/0/+45/90/-45/0/+45/90/+45/90/0/-45/\overline{0}]_s$

Balans (Balance)

Tabakalı kompozit malzemelerin otoklavda pişirme işlemi sırasında reçine katı hale gelene kadar fiberler düz olarak kalır. Pişirme işleminden sonra reçine küçülmeye başlarken, fiberler düz kalır ve eğer tabaka balanssız ise çarpılabilir. Tabakaları balanslı yapmanın faydası, tabakanın iki yönden de eşit çekilmesi ve bu sayede tabakanın düz kalmasının sağlanmasıdır [34].

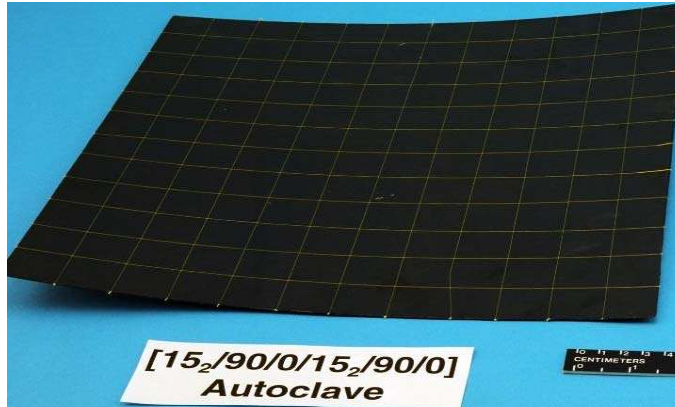
Balanslı tabaka; “0°” ve “90°” dışındaki bütün eşit açılı tabakaların simetri eksenine göre $\pm$ çiftler şeklinde olması demektir [35]. Bir levha içinde, herhangi bir pozitif $+\theta$ açısına ortalananmış her katman için, aynı kalınlıkta ve aynı malzeme özelliğinde, $-\theta$ negatif açılı bir levhanın var olmasıdır. “0°” ve “90°” dereceli levhalar, balans olma gereksinimini sağlar. Her simetrik levha balanslı, her balanslı levha simetrik anlamına gelmemektedir [33].

Levhelerde, balans ve simetri durumunun, otoklav prosesinden sonra etkisi Çizelge 3.1'den görülebilir;

Çizelge 4.1. Balans-simetri durumunun tabakalı kompozitlere etkisi

Levha Durumu	Yorumlar
Simetrik - Balanslı	Düz, sabit orta düzlem gerilmeleri
Simetrik Değil - Balanslı	Eğrilik oluşabilir.
Simetrik - Balanslı Değil	Burkulma oluşabilir.
Simetrik Değil - Balanslı Değil	Eğilme ve burkulma oluşabilir (Resim 4.2).

Bu tez çalışmasındaki levhalar mümkün olduğunca balanslı tasarlanmaya çalışılmıştır. Ancak tek yönlü plaklarda balanslı tabakalı yapı tasarlaması oldukça zor olmaktadır. İstenen oryantasyon yüzdesini ayarlayabilmek için 7 ve 13 nolu levhalarda balans yakalanamamıştır. Ancak otoklav prosesi sonrasında eğilme veya burkulma görülmemiştir.



Resim 4.2. Simetrik ve balans olmayan tabakalı levha [35]

Çizelge 4.2. Test numunelerinin dizilimleri

Parça No	Hedeflenen Tasarım Oryantasyon Yüzdesi	Gerçekleşen Tasarım Oryantasyon Yüzdesi	Dizilim	Kat Sayısı	Teorik Malzeme Kalınlığı	Ölçülen Malzeme Kalınlığı	Uçakta Kullanılan Örnek Parça
4	50/40/10	50/40/10	+45/0/-45/0/0/-45/0/+45/0/90/90/0/+45/0/-45/0/0/-45/0/+45	20	3,68	3,84	Panel (Skin panel)
5		48,2/41,3/10,3	+45/0/-45/0/0/+45/-45/0/0/-45/90/0/+45/0/90 /0/+45/0/90/-45/0/0/-45/+45/0/0/-45/0/+45	29	5,336	5,53	Panel (Skin panel)
6		50/40/10	+45/0/-45/0/0/-45/0/+45/0/90/90/0/+45/0/-45 /0/0/-45/0/+45/ +45/0/-45/0/0/-45/0/+45/0/90/90/0/+45/0/-45/0/0/-45/0/+45	40	7,36	7,6	Panel (Skin panel)
7	60/30/10	60/30/10	+45/0/0/0/-45/0/-45/0/0/90/90/0/0/-45/0/-45/0/0/0/+45	20	3,68	3,87	Kiriş (Beam)
8		62/27.5/10.3	+45/0/0/-45/0/0/-45/0/0/+45/0/90/0/0/90/0/0/90/0/+45/0/0/-45/0/0/-45/0/0/+45	29	5,336	5,45	Kiriş (Beam)
9		60/30/10	+45/0/0/-45/0/0/+45/0/0/-45/90/0/0/-45/0/0/ 90/0/0/+45/ +45/0/0/90/0/0/-45/0/0/90/-45/0/0/+45/0/0/-45/0/0/+45	40	7,36	7,64	Kiriş (Beam)

Çizelge 3.2. (Devam) Test numunelerinin dizilimleri

<i>Parça No</i>	<i>Hedeflenen Tasarım Oryantasyon Yüzdesi</i>	<i>Gerçekleşen Tasarım Oryantasyon Yüzdesi</i>	<i>Dizilim</i>	<i>Kat Sayısı</i>	<i>Teorik Malzeme Kalınlığı</i>	<i>Ölçülen Malzeme Kalınlığı</i>	<i>Uçakta Kullanılan Örnek Parça</i>
10	40/40/20	40/40/20	+45/0/0/-45/90/-45/0/0/+45/90/90/+45/0/0/-45/90/-45/0/0/+45	20	3,68	3,86	Panel (Skin panel)
11		40/40/20	+45/0/0/90/-45/0/-45/0/+45/90/90/0/-45/0/+45/ +45/0/-45/0/90/90/+45/0/-45/0/-45/90/0/0/+45	30	5,52	5,64	Panel (Skin panel)
12		40/40/20	+45/0/0/-45/90/-45/0/0/+45/90/90/+45/0/0/-45/ 90/-45/0/0/+45/ +45/0/0/-45/90/-45/0/0/+45/90/ 90/+45/0/0/-45/90/-45/0/0/+45	40	7,36	7,63	Panel (Skin panel)
13	25/50/25	26,3/52,6/21	+45/0/-45/0/-45/+45/90/90/-45/0/-45/90/90/+45/-45/0/-45/0/+45	19	3,496	3,7	Panel (Skin panel)
14		25/50/25	+45/0/-45/0/-45/90/+45/0/+45/90/+45/90/+45/0/-45/90/90/-45/0/-45/ -45/0/-45/90/90/-45/0/+45/90/+45/90/+45/0/+45/90/-45/0/-45/0/+45	40	7,36	5,58	Panel (Skin panel)
15		24,1/55,1/20,6	+45/-45/-45/0/+45/90/-45/0/+45/90/+45/90/0/-45 /0/ -45/0/90/+45/90/+45/0/-45/90/+45/0/-45/-45/+45	29	5,336	7,64	Panel (Skin panel)

4.2. Test Numunelerinin İmalat Süreci

4.2.1. Test numunelerinin imalatı

Tüm test numuneleri TUSAŞ-Türk Havacılık ve Uzay Sanayii A.Ş.'de ve TUSAŞ-Türk Havacılık ve Uzay Sanayii A.Ş.'nin imalat süreçlerine uygun olarak üretilmiştir. Resim 4.3'de gösterildiği gibi HexPly® AS4/8552 RC34 AW194 marka tek yönlü reçine emdirilmiş karbon fiberler ile (prepreg) otoklav kalıplama metodu kullanılarak üretim yapılmıştır. Homojen ve düzgün dağılmış elyaflarla matris emdirilerek oluşturulmuş ince tabakalara prepreg denmektedir. Literatürde reçine emdirilmiş elyaf demetinin yerine prepreg kullanımı yaygın olduğu için, tez içinde bu tip malzemeler prepreg olarak adlandırılacaktır. Hexply firmasının alınan ürün bilgi formuna göre, malzeme bilgileri şöyle özetlenebilir;



Resim 4.3. Reçine emdirilmiş kumaş (prepreg)

- Reçine Türü: 8552
- Reçine Yüzdesi: %34
- Takviye Referansı: AS4 AW194
- Fiber Türü: Yüksek mukavemetli karbon fiber
- Fiber Referansı: AS4
- Fiber Birim Ağırlığı Ağırlığı: 194 g/m²
- Fiber Özgül Ağırlığı: 1,79 g/cm³
- Reçine Özgül Ağırlığı: 1,30 g/cm³

- Prepreg Birim Ağırlığı: 294 g/m²
- Saklama Koşulu: -18°C/0°F

İmalat yöntemi, aşağıdaki gibi sıralanmıştır;

1. Prepreg'ler -18°C'lik soğuk hava depolarında ki uygun saklama koşullarından çıkarılmış ve dizilimine başlanmadan önce yaklaşık 8 saat bekletilmiştir.
2. Tasarımdaki 0°, ±45° ve 90° açılı tabakaların toplam sayısı hesaplanmış ve buna uygun olarak "Cutworks" programı ile kesme planı çıkarılmıştır (Resim 4.4 (a)).
3. Gerber Cutter marka cihaz ile kesme planına uygun kesim tamamlanmıştır. Tasarımında gösterilen açılara göre, 460 X 720 mm'lik boyutlarda dikdörtgen parçalar kesilmiştir (Resim 4.4 (b, c)).
4. Uygulamaya başlanmadan önce iş güvenliği açısından uygun eldiven takılmıştır. Levhaların açısız ve düz olması istendiği için herhangi bir kalıp kullanmaya gerek kalmamıştır. Resim 4.4 (d)'de görüldüğü gibi düz bir yüzey yeterli olmuştur.
5. Resim 4.4 (e)'de görüldüğü gibi, yüzey üzerine serilecek katın ölçülerine uygun sızdırmazlık macunu çekilmiştir. Bu vakumlama sırasındaki hava kaçakları önlemek amaçlıdır.
6. Kompozit kumaşın yüzey üzerine yapışmasını önlemesi için yüzey üzerine ayırıcı film yapıştırılmıştır (Resim 3.4 (f)).
7. Resim 3.4 (g,h,i)'de görüldüğü gibi, prepreg'lerin üst ve alt yüzeylerindeki koruma kâğıtlarının çıkarılarak, tasarıma uygun sırada üst üste yapıştırılmıştır.
8. Tabakalar arası boşlukları engellemek için, her 5 kattan sonra, ara vakum işlemi (760 mmhg) yapılmıştır. Bunun için yapışkan üst tabaka üzerine sırasıyla ayırıcı film, airweave (yüzey üzerinde hava akışını iletmesi için), vakum torbası ve vakum hortumu yerleştirilmiştir (Resim 4. (j,k,l, v)).

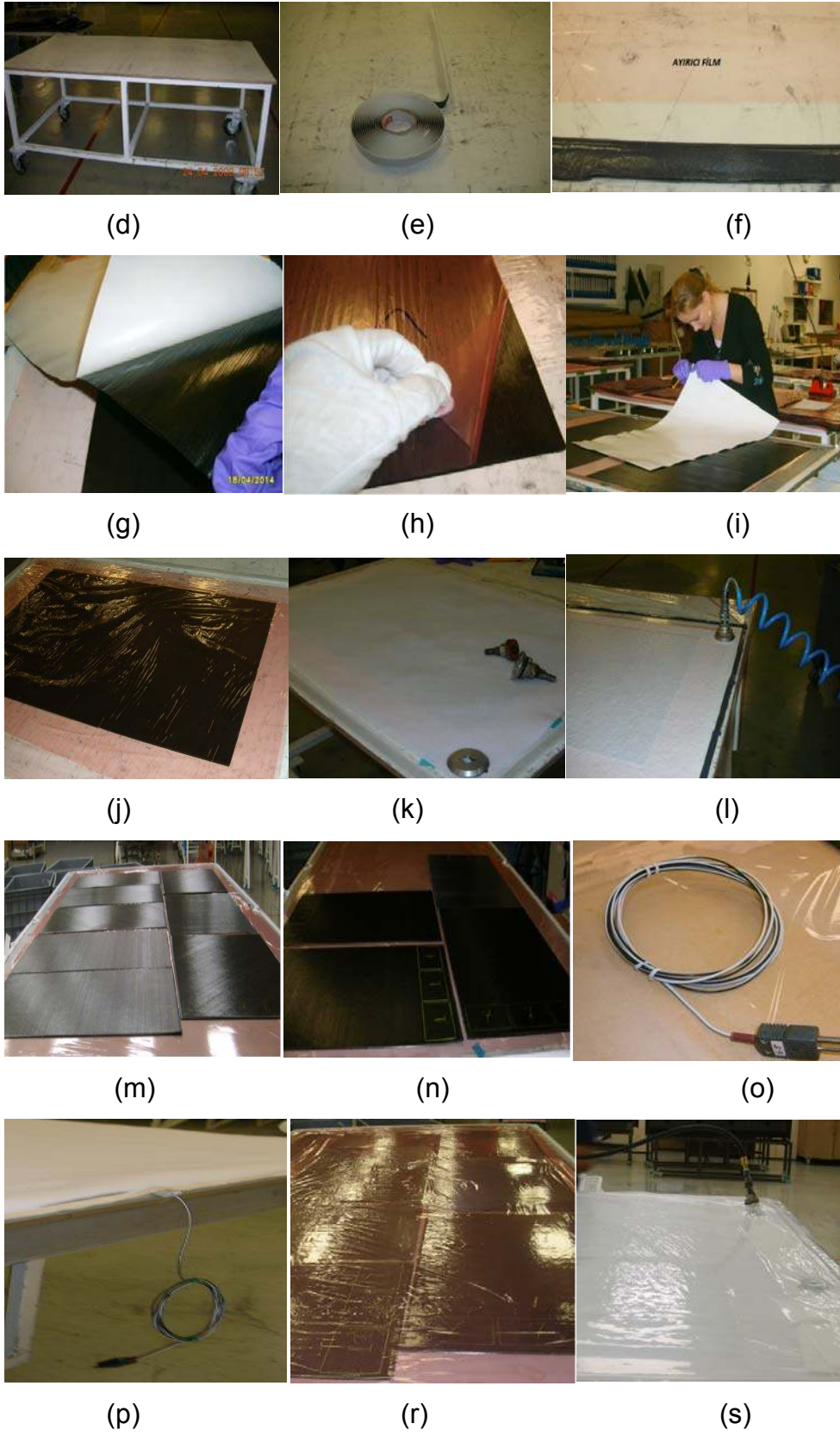
9. Tasarıma uygun tüm katların serimi tamamlandıktan, otoklavda pişirilmesi için düz bir yüzey üzerine yerleştirilmiştir. Üzerlerine silinmeyecek bir kalemle 150x100 mm boyutlarında dikdörtgen levhalar çizilmiştir ve tasarımdaki parçaların numaraları yazılmıştır (Resim 3.4 (m,n)).
10. Otoklavda sıcaklık kontrolü yapılması için belli aralıklarla termocouple'lar yerleştirilmiştir (Resim 3.4 (o, p)).
11. Ara vakumlamalarda olduğu gibi yeniden ayırıcı film, airweave (yüzey üzerinde hava akışını iletmesi için), vakum torbası ve vakum hortumu yerleştirilmiştir (Resim 3.4 (r, s)).
12. Vakum ölçer ile basınç kaçak kontrolü yapılmıştır (Resim 3.4 (t)).
13. Otoklav'da, maksimum 183 °C'de ve maksimum 6.9 bar basınçta toplam 300 dakika cure edilmiştir. (Resim 3.4 (u,v)).Paketlenmiş numunenin şematik bir resmi Şekil 4.4'de gösterilmiştir.



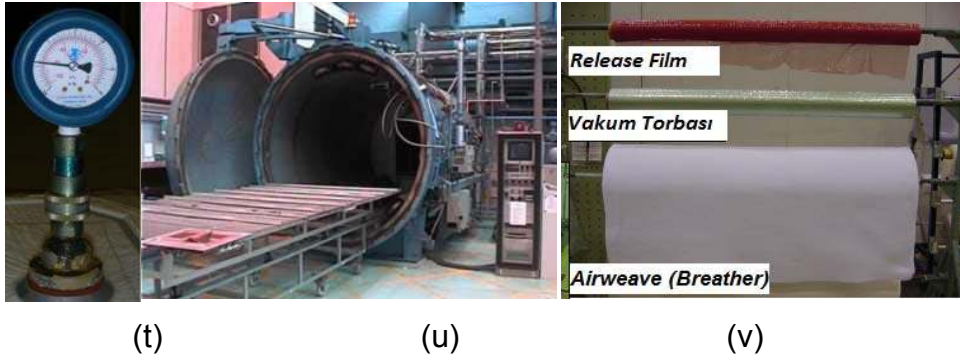
Şekil 4.4. Otoklav kalıplama prosesi



Resim 4.4. Test numunelerinin imalat süreci



Resim 4.4. (Devam) Test numunelerinin imalat süreci



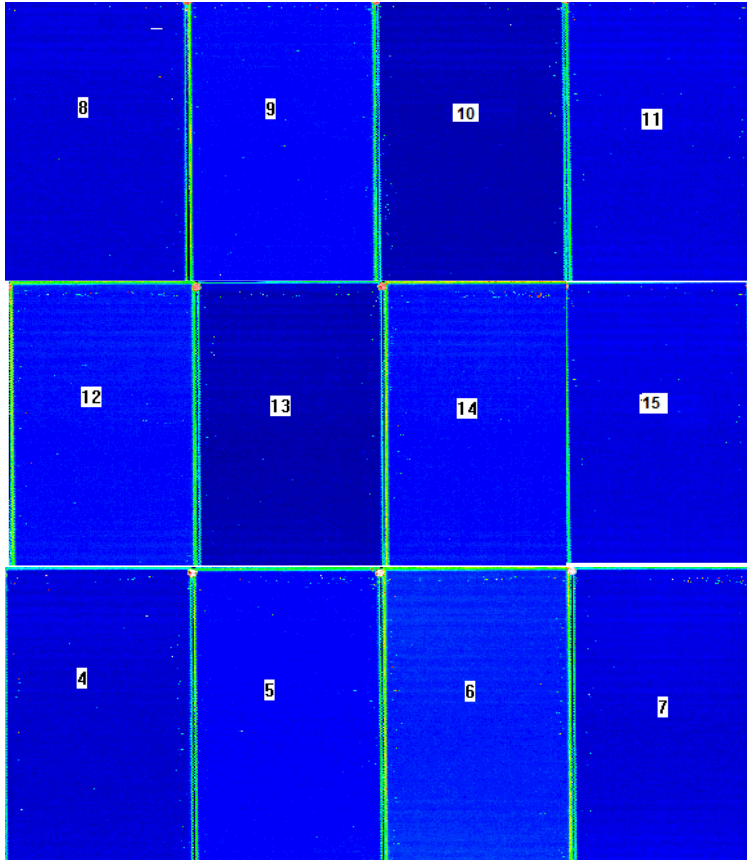
Resim 4.4. (Devam) Test numunelerinin imalat süreci

4.2.2. Üretim sonrası kalite kontrol

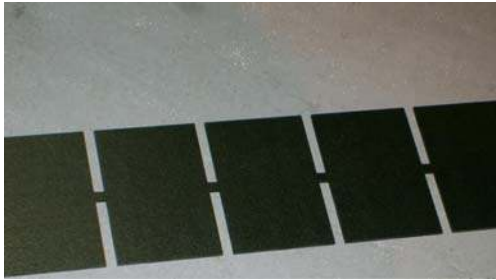
Otoklav sonrası parçalara burkulma, eğilme olup olmadığına dair gözle muayene yapılmıştır. Daha sonra gözeneklilik, yabancı madde veya reçine taşması gibi, malzeme de oluşabilecek olan süreksizlikler için c-scan ile ultrasonik olarak muayene edilmiştir. Resim 4.5’de görüldüğü gibi parçalar hatasız bir şekilde üretilmiştir.

4.2.3. Test numunelerinin kesilmesi

Malzemeler scan işleminin ardından 150x100 mm boyutlarında su jetinde kesilme işlemine tabi tutulmuşlardır. Su jetinde su ile ince zımpara kumu karıştırılarak kesim yapılmıştır. Kullanılan suyun hızı 900 m/sn’dir. Zımpara kumu hem yüzeylerin düzgün çıkması hemde kalın malzemelerin daha kolay kesilmesi için kullanılmaktadır. Su jeti ile kesim soğuk kesme olduğundan, kesme esnasında ısı etkisi oluşmamaktadır ve bu özelliği su jetinin diğer kesme yöntemlerine göre en iyi özelliğidir. Su jeti ile kesme yönteminde malzemelerin içyapısı bozulmamaktadır ve ısı etkisi sıfırdır (ısı gerilmeler oluşturmadığından) Resim 4.6’de görüldüğü gibi su jetinde parçalar 150x100 mm boyutlarında kesilmiştir. Parçaların aralarında kesilmeden kalan kısımlar daire testeresinde kesilmiş ve kesilen kısımlarda yüzey pürüzlülüğünü sağlamak için bu yüzeyler zımparayla temizlenmiştir.



Resim 4.5. Üretim sonrası test numunelerinin ultrasonik muayene sonuçları



Resim 4.6. Su jeti kesiminden sonraki test numunelerinin görünümü

5. DENEYDE KULLANILAN CİHAZLAR VE YÖNTEM

5.1. Ağırlık Düşürme Darbe Testi

Darbe testleri Ankara ODTÜ Merkezi Laboratuvarında, Resim 5.1’de gösterilen INSTRON DYNATUP 9250HV cihazı ile yapılmıştır. Bu cihaz pnömatik geri sekme önleme ve data toplama yazılımı ile donanmıştır.

Çeşitli malzemelerin darbe dirençlerinin belirlenebildiği gibi, çarpma anından darbenin enerjisinin sönmüldüğü zamana kadar sayısal ortamda verileri kayıt altına alarak grafiksel sonuçlar gösterebilmektedir.

5.1.1. Ağırlık düşürme darbe testi cihazının özellikleri

Genel Ölçüler;

- ✓ Yükseklik: 2858 mm
- ✓ Genişlik: 584 mm
- ✓ Derinlik: 508 mm
- ✓ Kapı Açıldığında Derinlik: 1334 mm
- ✓ Ağırlık: 336,5 kg

Operasyonel Özellikler;

- ✓ Hafif Ağırlık (2,7 kg-14,7 kg arası) için Enerji Aralığı; 2.56J-180J
- ✓ Orta Ağırlık (4,7 kg-23,7 kg arası) için Enerji Aralığı; 4J-300J
- ✓ Ağır Ağırlık (24,2 kg-80,5 kg arası) için Enerji Aralığı; 25J-1010J
- ✓ Maksimum düşme yüksekliği: 1.25 mm
- ✓ Maksimum düşme hızı: 20 m/s

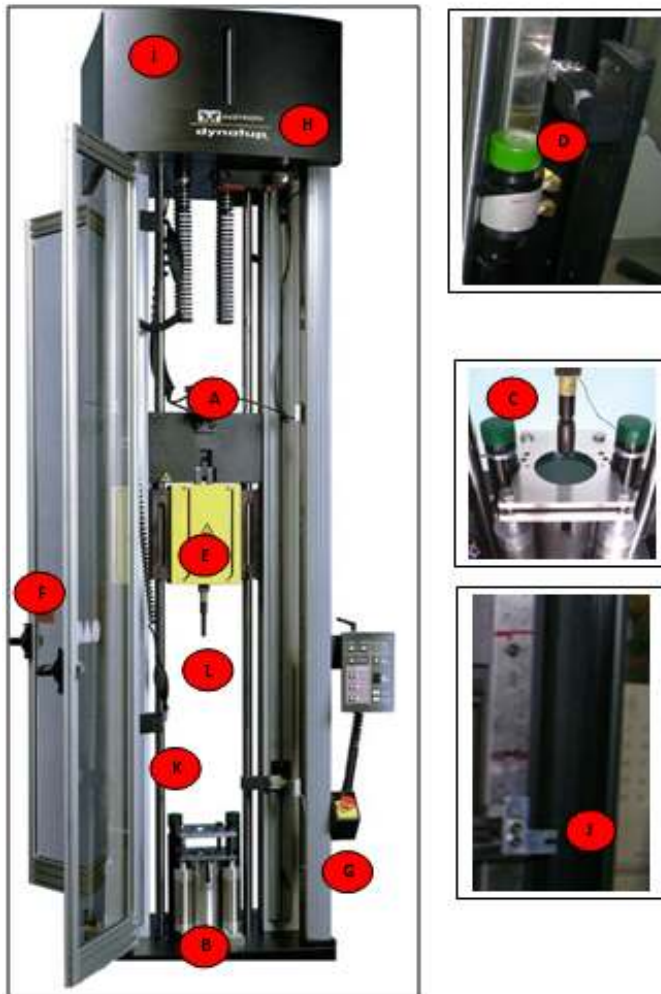
Yük Hücresinin Özellikleri;

- ✓ Tipi: Strain gauge/ Piezoelektrik
- ✓ Kapasitesi: 0-1000 lbf

Hassasiyet;

- ✓ Hız dedektör hassasiyeti: 0.25%
- ✓ Pozisyon hassasiyeti : ≤ 0.02 mm

5.1.2. Ağırlık düşürme darbe testi cihazının bölümleri



Resim 5.1. Ağırlık düşürme test cihazı

- A. *Yük Hücresi*: Düşen ağırlıkları, test kafasını, darbe ucu ağırlıklarını kapsayan hassas yük hücresidir.
- B. *Pnömatik bağlantı çeneleri*: ASTM 3763 ve ISO 6603 standartlarına uygundur ve darbe testi sırasında numuneyi tutmaya yaramaktadır. Numunenin ortasında 76 mm çapında ki dairesel alanı serbest bırakacak şekilde bağlanan pnömatik bağlantı çeneleri numuneyi tüm kenarlarından sıkı bir şekilde tutmakta ve kenarların hareketini engellemektedir.
- C. *Sınırlandırıcı fren mekanizması*: Tekrarlı darbe olmasını önlemektedir. Bu mekanizma amortisör ve fren bloklarından oluşmaktadır.
- D. *Hız detektörü*: Hız sensör bayrağı ile birlikte vurucu hızın ölçümünde kullanılır.
- E. *Piston kafası*: Ağırlıkların güvenli, hızlı ve kolay bir şekilde ayarlanmasına yarar. Piston kafası serbest bırakma mekanizmasına sahiptir. Üst tarafında bir kanca ile yapıya bağlanır.
- F. *Test kapısı*: Kilitleme mekanizmasına sahiptir ve polikarbonat malzemeden yapılmıştır. Operatöre test sırasında yabancı madde çarpmasını ve test sırasında içeriye girilmesini önler.
- G. *Acil durdurma düğmesi*: Acil durumda sistemi kapatmaya yarar.
- H. *Optik kodlayıcı*: Düşme yüksekliği ve vurucunun ilk konuma gelmesini sağlayan optik kodlayıcıdır.
- İ. *DC servomotor*: Sayısal kapalı döngülü yüksek torklu hassas pozisyon kontrolü sağlar ve çarpmadan sonra vurucu kütleyi hızlı bir şekilde yukarı doğru çeker.
- J. *Hız bayrağı*: Hız detektörü ile birlikte vurucunun hızını ölçmek için kullanılır.
- K. *Kılavuz Rayları*: Piston kafasının üzerinde hareket etmesini sağlar, 15,4 mm çapında ve çelikten yapılmıştır.
- L. *Vurucu Uç*: Çelikten yapılmıştır ve yarıküreseldir. Bu tez çalışmada havacılık sektöründe düşük hızlı darbe çalışmalarında kullanılan 12,7 mm çapında yarıküresel vurucu uç seçilmiştir. Değişik çaplarda ve boylarda kullanılabilecek vurucu uçlar Resim 5.2’de verilmiştir.



Resim 5.2. Ağırlık düşürme test cihazı ile kullanılabilecek değişik darbe uçları

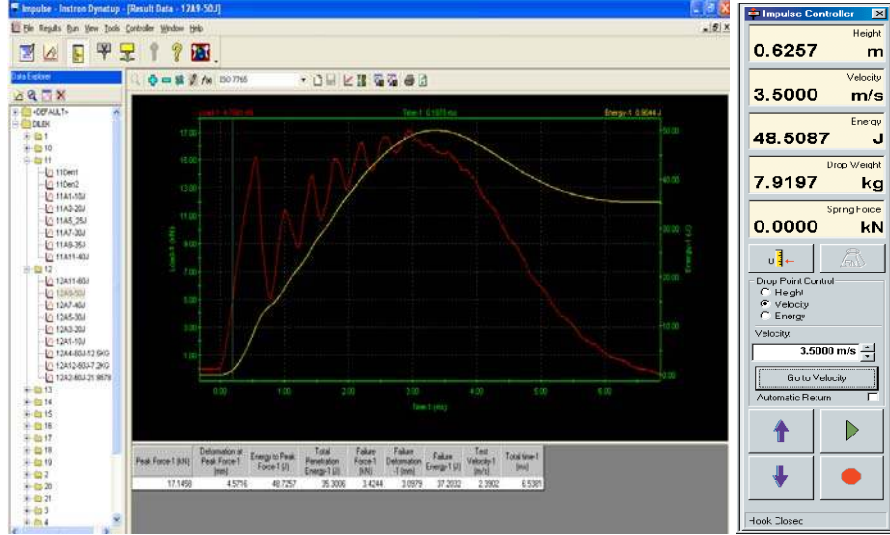
5.1.3. Data toplama sistemi

Darbe testi sırasında numune üzerine 1 ile 10 milisaniye aralığında kuvvet uygulanmaktadır. Deney sırasında istenen datanın bu kadar kısa bir sürede elde edilmesi gerekir. Bunun için datayı etkin bir şekilde toplayan bir sistem bulunması zorunludur. INSTRON 9250 ağırlık düşürme test cihazı Instron Dynatup 9250 data toplama sistemi ile donatılmıştır. Bu tez çalışmasında, test süresi boyunca, her bir parametre için toplam 8200 data alınmıştır.

Bu sistem yazılım ve donanımdan oluşmaktadır. Donanımın bir parçası da hız ölçüm bayrağı ve sensörüdür. Darbe hızını kayıt etmek ve data toplama sistemine veri göndermek için düşen ağırlık üzerindeki bir bayrak kullanır. Bu bayrak kendi ön kenarları arasında 1 cm mesafede eşit genişliği olan iki çatal içerir. Bayrağın çatalları fotoelektrik-diyot sensör arasından geçtiği için, ışık süzmesinin kesilmesi ve yeniden oluşmasına göre bir elektrik sinyali oluşur. Sinyal çift kare dalga oluşturur ve tüm zaman aralığı içinde elde edilir. Yazılım ilk sinyalin ikinci sinyale kadar oluştuğu zamanı ölçer. Bayrağın iki ucu arasındaki mesafe bilindiği için ve sürtünme dikkate alınmadığından, çarpma hızı hesaplanabilir.

DYNATUP 9250 cihazı IMPULSE isimli bir kolay kullanımı olan bilgisayar programı kullanmaktadır. Bu program numuneye ait tüm datayı takip edebilmek için kullanılır. Programa ait bir ekran resmi Şekil 5.1'de gösterilmiştir. Numunede vurucuya uygulanan kuvvet $f(t)$ sürekli

ölçülmektedir. Buna göre (4.1)-(4.8) arası denklemler kullanılarak hız, yer değiştirme, ivme ve enerji denklemleri elde edilmektedir.



Şekil 5.1. Impulse yazılımının grafik örneği

$$F(t) = mg - f(t) \quad (4.1)$$

$$ivme = a(t) = \frac{F(t)}{m} \quad (4.2)$$

$$Hız = v(t) = v_{imp} + \int_0^t a(t)dt \quad (4.3)$$

$$Yer Değiştirme = \delta(t) = \int_0^t v(t)dt \quad (4.4)$$

Enerji prensiplerine göre, toplam enerji;

$$Toplam Enerji = E(t) = K(t) + V(t) + E_a(t) = Sabit \quad (4.5)$$

t=0 anında, v(0)=0 ve E_a=0 olduğundan; 4.5'de verilen denklemdeki sabiti aşağıdaki gibi hesaplayabiliriz;

$$E(0) = K(0) = constant \quad (4.6)$$

Buna göre enerji denklemi yeniden yazarsak,

$$E_y(t) = K(0) - K(t) - V(t) \quad (4.7)$$

veya

$$E_y(t) = [m/2] [v_{imp}^2 - v^2(t)] + mg\delta(t) \quad (4.8)$$

$a(t)$: t anındaki vurucunun ivmesi

$v(t)$: t anındaki vurucunun hızı

m : vurucu kütle

$F(t)$: t anındaki bileşke kuvvet

$f(t)$: t anında numune tarafından vurucuya uygulanan kuvvet

$V(t)$: t anında vurucu kütle hızı

$d(t)$: t anındaki yer değiştirme

g : yerçekimi ivmesi (9.81 m/s)

$E_y(t)$: t anındaki yutulan enerji

V_{imp} : çarpma hızı

$K(t)$: vurucunun t anındaki kinetik enerjisi

$V(t)$: vurucunun t anındaki potansiyel enerjisi

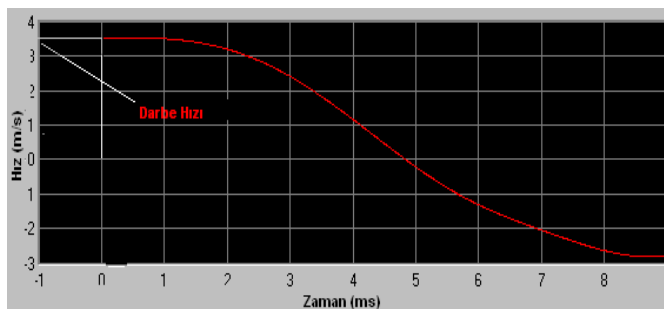
Numuneden vurucu ucu uygulanan kuvvet $f(t)$ gerçek bir matematik fonksiyonu olmadığı için hız, değiştirme ve yutulan enerji denklemlerindeki integraller direk olarak alınamaz. Bunun için yazılım, denklemlerindeki integral değerlerini, ikizkenar yamuk kuralını uygulayarak hesaplar.

Temel olarak aşağıda belirtilen dört grafik elde edilebilir ancak bu grafiklerden farklı grafiklerde türetilbilmektedir.

- ✚ *Kuvvet-zaman grafiği:* Numunenin vurucu uca uyguladığı tepki kuvvetinin zamanla değişimini veren grafiklerdir.
- ✚ *Hız-zaman grafiği:* Farklı darbe enerjilerinde hızın zamanla değişimini veren grafiklerdir.
- ✚ *Kuvvet-yer-değiştirme grafiği:* Temas kuvvetine göre numunedeki yer değiştirmeyi veren grafikten yutulan enerjiyi de görülebilir.
- ✚ *Enerji-zaman grafiği:* Darbe enerjisini ve yutulan enerjiyi veren grafiklerdir.

Elde edilen bu grafiklere göre yazılımdan aşağı değerlerde alınabilmektedir;

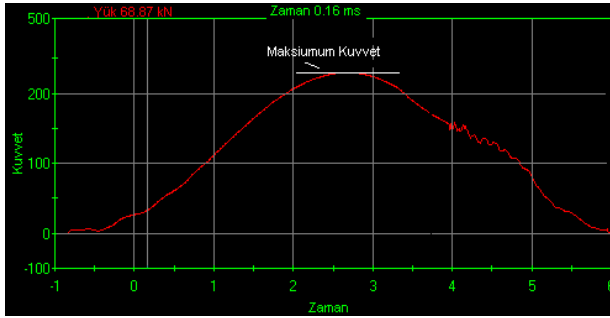
- ✚ *Darbe enerjisi:* Vurucu uç tarafından uygulanan çarpma anındaki enerjidir. Yüksekliğin ve ağırlığın fonksiyonu kullanılarak hesaplanır.
- ✚ *Maksimum yükteki enerji:* Numunenin maksimum yükteki enerjisidir. Kuvvet-yer değiştirme eğrisi altında kalan alanın, maksimum yükteki noktasıdır.
- ✚ *Yutulan enerji:* Numunenin test sonuna kadar yuttuğu enerjidir (yükün tekrar 0 olduğu nokta). Kuvvet-yer değiştirme eğrisi altında kalan alanın, testin başladıktan bitene kadar olan alanıdır.
- ✚ *Darbe hızı:* Zamanın 0 noktasındaki düşen ağırlığın çarpma hızıdır.



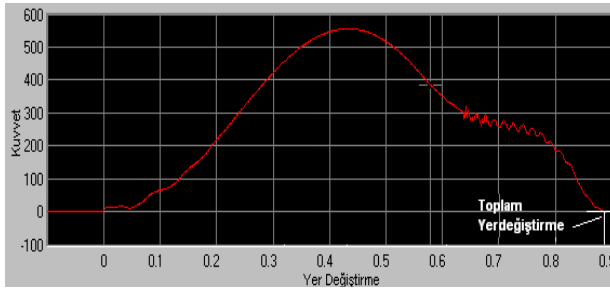
Şekil 5.2. Impulse yazılımında darbe hızının hesaplama yöntemi

- ✚ *Maksimum temas kuvveti:* Darbe testi boyuca oluşan maksimum kuvvettir.

- ✚ **Toplam zaman:** Toplam zaman milisaniye biriminden ifade edilir. Çarpma anından testin bitişine kadar (yani kuvvet sıfırlanana kadar) olan süreyi içerir.
- ✚ **Toplam yer değiştirme:** Toplam yer değiştirme kuvvetin 0 olduğu noktadaki numunenin toplam deformasyonudur.



Şekil 5.3. Impulse yazılımında maksimum kuvvetin hesaplanma yöntemi



Şekil 5.4. Impulse yazılımında toplam yer değiştirmenin hesaplanma yöntemi

5.1.4. Hız detektör bloğunun ayarlanması

Darbe testine başlanmadan önce hız detektörünün ve bayrağının doğru pozisyon alması testin doğru yapılabilmesi açısından çok büyük önem taşımaktadır. Bunun için yapılan işlemler şu şekildedir;

- 1- Numune, bağlantı çenelerine yerleştirilir,
- 2- Vurucu ucu numuneye değene kadar yaklaştırılır,
- 3- Hız detektör bağlantı vidaları sökölür,

- 4- Hızı detektörü yukarı aşağı hareket ettirilerek, hız detektör bayrağının kenarının hız sensorunun orta ekseninden 5-6 mm aşağısına gelecek şekilde ayarlanır,
- 5- Hız detektör sabitlenir.

5.1.5. Cihazın Çalıştırılması

Impulse data toplama yazılımındaki “Run” barından “Impact Test” butonu seçilir. Açılan pencere test için istenen bilgiler girilir ve next butununa basılır. Bu seferde numune için istenen bilgiler girilir. Numune pnömatik çenelerin içine yerleştirildikten sonra ve test cihazının kapısı kapatılır. Fire butonunu basılmasıyla test gerçekleşir ve yazılım kuvvet-enerji-zaman grafiğini oluşturur. Programdan gerekli ayarlamak yapılarak hız, yer değiştirme grafikleri de elde edilebilir.

5.1.6. Darbe testi için kullanılan parametreler

5 farklı kalınlıkta ki 12 adet farklı adet numunenin toplam 86 tane darbe testi gerçekleştirilmiştir.

Öncelikle darbe davranışını belirlemek ve grafikleri doğru yorumlamak için “11” numaralı test numunesi delininceye darbe enerjisi artırılarak, toplam 17 farklı enerji seviyesinde darbe uygulanmıştır.

Bunun yanında tüm numunelere 6 farklı enerji seviyesinde darbe testleri yapılmıştır. Enerji seviyeleri belirlenirken birkaç numune üzerinde deneme yapılmış ve tezin amacına uygun şekilde gözle ancak görülebilecek (BVID) ve gözle görülebilecek hasarlar (VID) oluşturacak enerji seviyeleri belirlenmiştir. Numunelerde sadece geri sekme davranışının olmasına izin verilmiştir, penetrasyon ve delip geçme davranışı incelenmemiştir.

Tüm testler 17,35 kg kütleli ağırlık ile gerçekleştirilmiştir. Ayrıca vurucu kütesinin darbe hasarına etkisini görebilmek için bir numuneye aynı darbe enerjisi altında 17,35 kg'a ilaveten 3 adet farklı ağırlık kullanarak darbe uygulanmıştır. Darbe testi boyunca kullanılan enerji seviyeleri, vurucu ağırlığın kütlesi ve hız değerleri Çizelge 5.1'de verilmiştir.

Numunelerin genel olarak kat sayıları 20, 29 ve 40 olacak şekilde tasarlanmıştır. Ancak istenilen oryantasyon yüzdesinde levha tasarlayabilmek için 19 ve 30 katlı birer numune daha bulunmaktadır. Ancak 20 ve 29 katlı numunelere göre 1 kat fark ettiği için uygulanan darbe enerji seviyesi 19 katlı'nın 20 katlı olanlara, 30 katlı olanın 29 katlı olanlarla aynıdır. Farklı oryantasyonlar için darbe davranışı incelenirken 19 ve 29 katlı numuneler değerlendirmeye alınmamıştır.

Sonuç olarak tabakalı kompozit plakların darbe davranışı incelendikten sonra, aşağıda parametreler incelenmiş ve karşılaştırmalar yapılmıştır.

- Darbe enerjinin etkisi
- Levha kalınlığının etkisi
- Oryantasyon yüzdesinin etkisi
- Vurucunu kütle ve hızının etkisi

Çizelge 5.1. Darbe parametreleri

Parça Adı	Test No	Numune Adı	Uygulanan Enerji (J)	Vurucu Kütle (kg)	Çarpma Hızı (m/s)	Çarpma Yüksekliği (m)
4	1	4A1	5J	17,35	0,76	0,03
	2	4A3	10J	17,35	1,07	0,06
	3	4A5	15J	17,35	1,31	0,09
	4	4A7	20J	17,35	1,52	0,12
	5	4A9	25J	17,35	1,70	0,15
	6	4A11	30J	17,35	1,86	0,18
5	7	5A1	10J	17,35	1,07	0,06
	8	5A3	20J	17,35	1,52	0,12
	9	5A5	25J	17,35	1,70	0,15
	10	5A7	30J	17,35	1,86	0,18
	11	5A9	35J	17,35	2,16	0,24
	12	5A11	40J	17,35	2,16	0,24
6	13	6A1	10J	17,35	1,07	0,06
	14	6A3	20J	17,35	1,52	0,12
	15	6A5	30J	17,35	1,86	0,18
	16	6A7	40J	17,35	2,16	0,24
	17	6A9	50J	17,35	2,42	0,30
	18	6A11	60J	17,35	2,65	0,36
7	19	7A1	5J	17,35	0,76	0,03
	20	7A3	10J	17,35	1,07	0,06
	21	7A5	15J	17,35	1,31	0,09
	22	7A7	20J	17,35	1,52	0,12
	23	7A9	25J	17,35	1,70	0,15
	24	7A11	30J	17,35	1,86	0,18
8	25	8A1	10J	17,35	1,07	0,06
	26	8A3	20J	17,35	1,52	0,12
	27	8A5	25J	17,35	1,70	0,15
	28	8A7	30J	17,35	1,86	0,18
	29	8A9	35J	17,35	2,02	0,21
	30	8A11	40J	17,35	2,16	0,24
9	31	9A1	10J	17,35	1,07	0,06
	32	9A3	20J	17,35	1,52	0,12
	33	9A5	30J	17,35	1,86	0,18
	34	9A7	40J	17,35	2,16	0,24
	35	9A9	50J	17,35	2,42	0,30
	36	9A11	60J	17,35	2,65	0,36

Çizelge 5.1. (Devam) Darbe parametreleri

Parça Adı	Test No	Numune Adı	Uygulanan Enerji (J)	Vurucu Kütle (kg)	Çarpma Hızı (m/s)	Çarpma Yüksekliği (m)
10	37	10A1	5J	17,35	0,76	0,03
	38	10A3	10J	17,35	1,07	0,06
	39	10A5	15J	17,35	1,31	0,09
	40	10A7	20J	17,35	1,52	0,12
	41	10A9	25J	17,35	1,70	0,15
	42	10A11	30J	17,35	1,86	0,18
11	43	11A1	10J	17,35	1,07	0,06
	44	11A3	20J	17,35	1,52	0,12
	45	11A5	25J	17,35	1,70	0,15
	46	11A7	30J	17,35	1,86	0,18
	47	11A9	35J	17,35	2,02	0,21
	48	11A11	40J	17,35	2,16	0,24
	49	11A12	45J	17,35	2,28	0,27
	50	11A14	55J	17,35	2,52	0,32
	51	11A16	65J	17,35	2,74	0,38
	52	11A19	75J	17,35	2,95	0,44
	53	11A10	80J	17,35	3,04	0,47
	54	11A15	85J	17,35	3,12	0,50
	55	11A22	90J	17,35	3,23	0,53
	56	11A20	92,5J	17,35	3,27	0,55
	57	11A23	95J	17,35	3,32	0,56
	58	11A24	100J	17,35	3,40	0,59
	59	11A25	110J	17,35	3,55	0,64
12	60	12A1	10J	17,35	1,07	0,06
	61	12A3	20J	17,35	1,52	0,12
	62	12A5	30J	17,35	1,86	0,18
	63	12A7	40J	17,35	2,16	0,24
	64	12A9	50J	17,35	2,42	0,30
	65	12A11	60J3	17,35	2,65	0,36
13	66	13A1	5J	17,35	0,76	0,03
	67	13A3	10J	17,35	1,07	0,06
	68	13A5	15J	17,35	1,31	0,09
	69	13A7	20J	17,35	1,52	0,12
	70	13A9	25J	17,35	1,70	0,15
	71	13A11	30J	17,35	1,86	0,18
14	72	14A1	60J	17,35	2,65	0,36
	73	14A3	50J	17,35	2,42	0,30
	74	14A5	40J	17,35	2,16	0,24
	75	14A7	30J	17,35	1,86	0,18
	76	14A9	20J	17,35	1,52	0,12
	77	14A11	10J	17,35	1,07	0,06

Çizelge 5.1. (Devam) Darbe parametreleri

Parça Adı	Test No	Numune Adı	Uygulanan Enerji (J)	Vurucu Kütle (kg)	Çarpma Hızı (m/s)	Çarpma Yüksekliği (m)
15	78	15A1	10J	17,35	1,07	0,06
	79	15A3	20J	17,35	1,52	0,12
	80	15A5	25J	17,35	1,70	0,15
	81	15A7	30J	17,35	1,86	0,18
	82	15A9	35J	17,35	2,02	0,21
	83	15A15	10J	21,95	0,95	0,05
	84	15A17	10J	25,87	0,88	0,04
	85	15A13	10J	7, 4	1,64	0,14
	86	15A11	40J	17,35	2,16	0,24

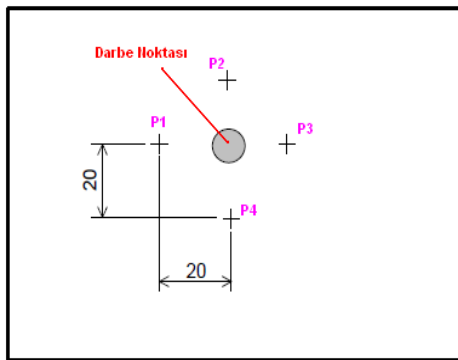
5.2. Çentik Derinliklerinin Ölçülmesi

Darbeden hemen sonra numunelerde oluşan çöküntü derinlikleri

Şekil 5.5 'deki komparatör ile prEN 6038 [46] standardına uygun, aşağıda anlatıldığı şekilde ölçülmüştür;

1. Komparatör (Resim 5.3) darbe yapılan yüzeyde gezdirilerek, maksimum girintiye sahip nokta tespit edilmiştir ve d_{maksimum} olarak kayıt edilmiştir,
2. Darbe noktasının 20 mm'lik çevresinden P1, P2, P3 ve P4 olarak 4 nokta ölçülmüştür (Şekil 5.5),
3. Ölçülen değerlerin ortalaması alınarak P_{ortalama} hesaplanıp kayıt edilmiştir,
4. Girinti miktarı (d_{girinti}) d_{maksimum} değerinden P_{ortalama} değerinin çıkarılmasıyla hesaplanmıştır.

Ayrıca bazı numunelerin darbe yapıldıktan sonra belli zaman aralıklarla çöküntü derinlikleri ölçülerek, zamana karşı çöküntü miktarının değişimi incelenmiştir.



Şekil 5.5. Çöküntü miktarının ölçümü



Resim 5.3. Komparatör

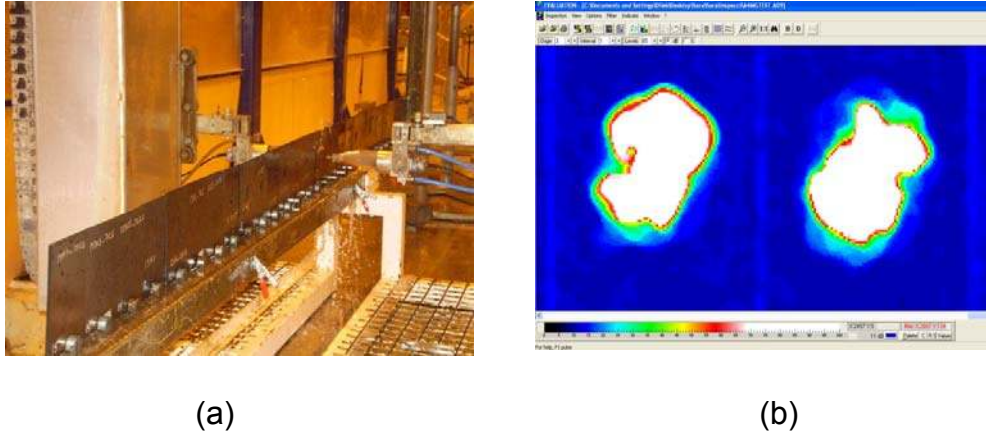
5.3. Ultrasonik c-scan sistemi ile hasar alanlarının ölçülmesi

Tabakalı kompozitlerde hasar tespiti yapabilmek için kullanılan metotlardan biride ultrasonik c-scan sistemidir. Bu teknik numune üzerinden kaybedilen ultrasonik dalgaların hesaplanması prensibi ile çalışmaktadır.

Bu tez çalışmasında, hasar alanları c-scan metodu “Tecal Auto-Ultra Scanning Sistemi, SARA 8.1 programı, EVOLUTION yazılımı (Resim 5.4 (b)) yazılımının ekranından görüntü verilmiştir) ile TUSAŞ Türk Havacılık ve Uzay Sanayi A.Ş.’de ölçülmüştür.

Bu metot ile öncelikle, kompozit parçalar Resim 5.4 (a)’da gösterildiği gibi bağlanmaktadır. Daha sonra numuneye iki prob yaklaşmaktadır. Bunlardan bir tanesi ultrasonik dalga gönderirken, diğeri de almaktadır. Ultrasonik dalga havada ilerlerken enerji ve hızını kaybedeceğinden iki prob sürekli su akışı sağlamaktadır. Numunenin kalınlığı boyunca, süreksizliklerin olduğu yerlerde dalgalarda oluşacak yansımalar, saçılmalar ve farklı ortamlarda dalga hızında meydana gelecek değişikliklere bağlı olarak hedef proba gelen ultrasonik dalgada enerji kayıpları (dB kaybı) oluşmaktadır.

Bu kayıplar değerlendirilerek, hasarın şekli uzunluğunu ve genişliği değerlendirilir. Ancak c-scan tarama metodu ile hasarın derinlik ve dağılımı hakkında bilgi vermemektedir.



(a) (b)
Resim 5.4. Ultrasonik c-scan muayenesi sırasında çekilen bir görüntü, (b) evolution yazılımından alınan ultrasonik c-scan görüntüsü

5.4. Burkulma testi ile kritik burkulma yükünün hesaplanması

Darbe sonrası kritik burkulma yüklerini belirlemek için de Resim 5.3'de gösterilen basma aparatı kullanılmış ve Resim 5.4'de görüldüğü gibi numuneler yerleştirilmiştir. Darbe sonrası burkulma deneyleri TUSAŞ Türk Havacılık ve Uzay Sanayi A.Ş. yapısal test bölümündeki 250kN yük kapasitesine sahip olan MTS marka çekme-basma cihazında yapılmıştır.

Resim 5.5'deki numunelerin burkulmasından sonra, elde edilen tipik yük-çökme eğrisi Şekil 5.6'da görüldüğü gibidir. Burkulma yükünü bulmak için yük-çökme eğrisinin lineer kısmına bir doğru çizilir. Çizilen doğru ile yük-çökme eğrisinin ayrıldığı nokta kritik burkulma yük değerini vermektedir [45].

Tüm test numunelerinin darbeden önce ve darbeden sonra kritik burkulma yükü bulunmuş, darbe sonrası bulunan değer, darbe öncesi bulunan değere bölünerek yüzdesi hesaplanmıştır. Bu değer test numunelerinin kalan kritik burkulma dayanım yüzdesi olarak tanımlanmıştır.

Hasar görmemiş 4 farklı oryantasyon yüzdesindeki 12 farklı kompozit levhanın kat sayılarına göre kritik burkulma yükü Şekil 5.7'de verilmiştir. Kat sayılarına göre elde edilen datalardan ikinci derecede polinomik regresyon

eğrileri bulunmuştur. Bu eğrilerden yararlanılarak, ara kat değerleri değerleri için kritik burkulma kuvvetleri bulunabilir.

Sonuçlar incelendiğinde, fiber oryantasyon açısına bağlı olarak kritik burkulma kuvvetinin değiştiği görülmektedir. En büyük kritik burkulma yükü 60/30/10 oryantasyon yüzdesine sahip numunede görülmekteyken, en az 25/50/25 oryantasyon yüzdesindeki numunede görülmüştür. Büyüklük sırasında ikinci ve üçüncüyü sırasıyla 50/40/10 ve 40/40/20 oryantasyon yüzdelere sahip numuneler almaktadır. Ayrıca 20 kat numunelerdeki farklı oryantasyon yüzdelere sahip ki kritik burkulma yükü küçük farklılıklar gösterirken, 40 katlı numunelerde farklılık bariz bir şekilde görülmektedir.

Uygulanan yükün fiberler tarafından taşınması nedeniyle, fiber oryantasyon açısının sıfır derece olması, kritik burkulma kuvvetini diğer açılara bağlı olarak oldukça fazla değiştirmiştir. Buradan sonuç olarak yüzde olarak "0" dizilimine en çok sahip olanın kritik burkulma yükünün en fazla olduğu çıkarılabilir. Eğilme rijitliği, büyük olan malzemeler, burkulmaya karşı daha olduğu bilinmektedir. Buradaki tüm numuneler aynı boyut ve kesitte olduğu için, kritik burkulma yük değeri yalnızca malzemenin elastisite modülüne bağlı olarak değişeceği için, elastisite modülü büyük olan malzemenin kritik burkulma yükünde büyük olacağı söylenebilir [47].



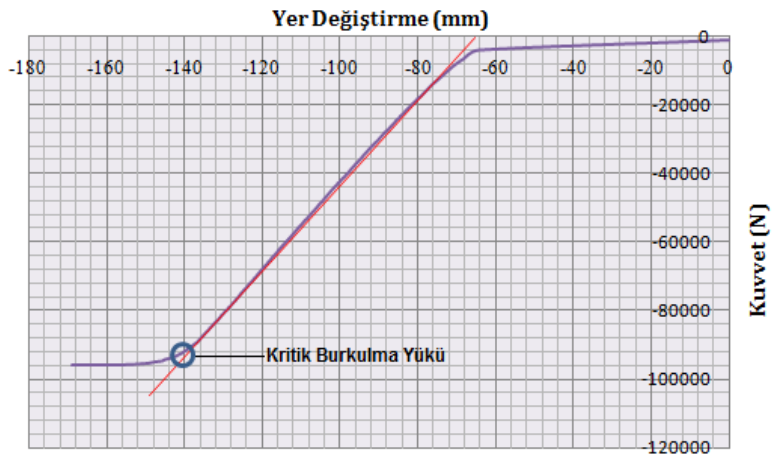
Resim 5.5. Burkulma testi için kullanılan aparat



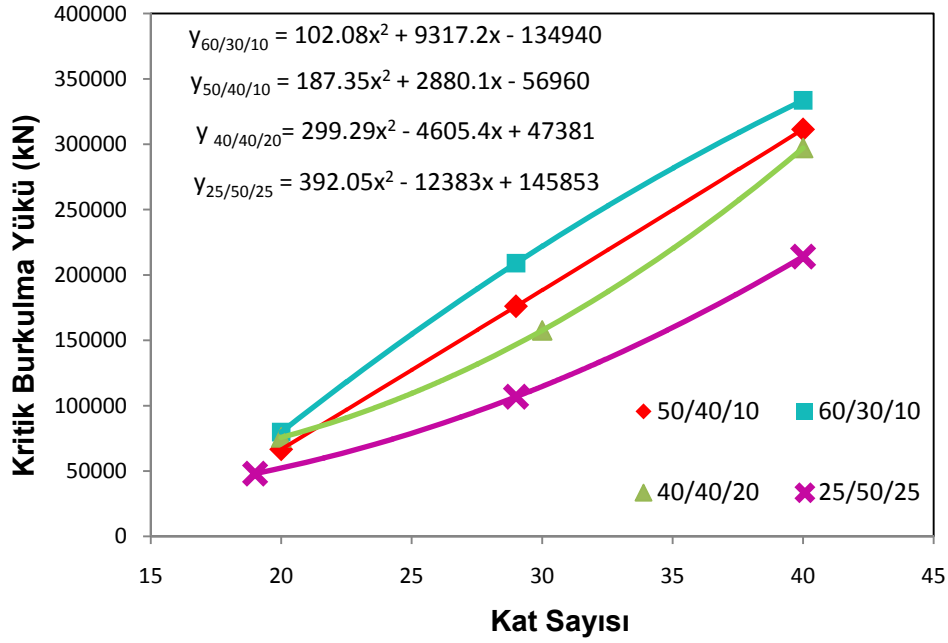
Resim 5.6. Burkulma testi için test numunesinin bağlanması



Resim 5.7. Burkulma testinden sonra test numunesinin görüntüsü



Şekil 5.6. Tipik bir burkulma yükü-yer değiştirme grafiği

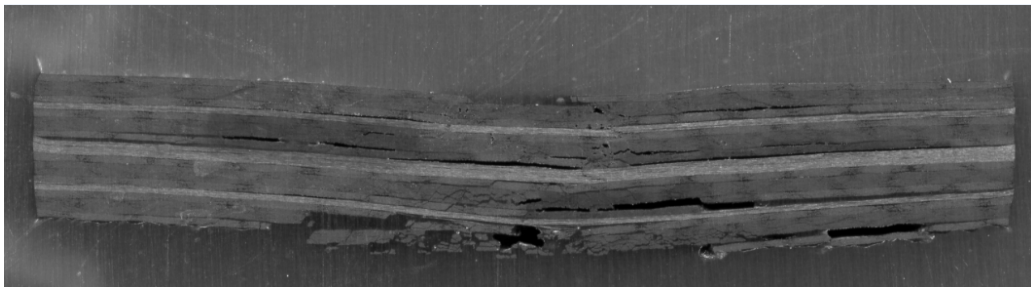


Şekil 5.7. Hasar görmemiş 4 farklı oryantasyon yüzdesine sahip test numunelerinin kat sayılarına karşı kritik burkulma yük eğrileri

5.5. Hasarların Mikroskop ile İncelenmesi

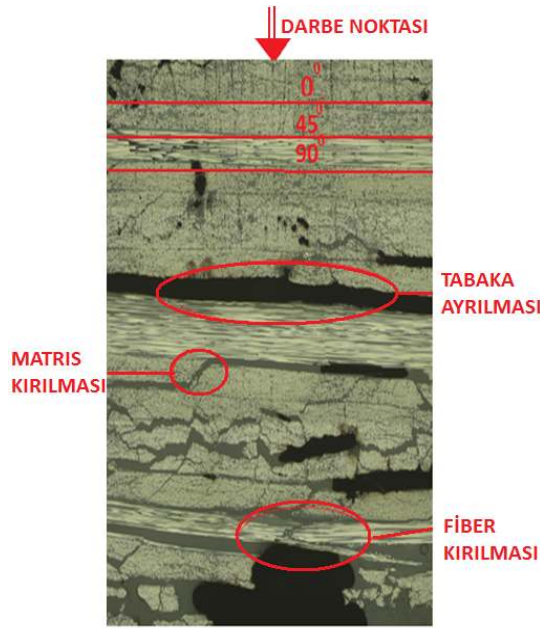
Darbe sonrası numunelerin içyapılarını görmek için mikroskoplar kullanılmıştır. Yapılan tüm testlerde benzer hasar türleri görüldüğü için, tüm hasar türlerini aynı anda görebileceğimiz 10 numaralı numunenin 30J'luk darbeye maruz kalmış test numunesi üzerinde çalışma yapılmıştır.

Numunenin üzerinden hasarlı bir bölge kesilmiştir. Bu hasarlı bölgenin resmi, Resim 5.8'de görülmektedir.



Resim 5.8. Hasarlı numuneden alınan bir parçanın tarayıcıdaki resmi

Daha sonra alınan mikroskop görüntüsünde görüleceği gibi (Resim 5.9) numunenin alt kısmında fiber kırılmaları oluşmuştur. Tabakalar arasında delaminasyonlar (tabaka ayrılmaları) boşluklar şeklinde, matris kırılmaları çatlaklar şeklinde görülmektedir. 0° açıyla dizilmiş katmanlar yuvarlak, 45° açıyla dizilmiş katmanlar oval, 90° açıyla dizilmiş katmanlar ise paralel olarak seçilmektedir.



Resim 5.9. Darbe uygulanmış test numunesinin mikroskop görüntüsü ve hasar tipleri

6. DENEYSEL ÇALIŞMANIN SONUÇLARI

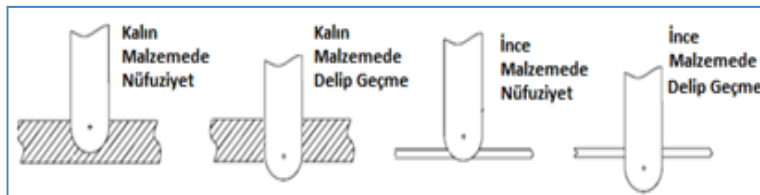
6.1. Genel Darbe Davranışının İncelenmesi

6.1.1. Ağırlık düşürme cihazından alınan verilerin yorumlanması

Tabakalı kompozit levhaların darbe davranışını inceleyebilmek için bir “11” numaralı numune üzerinde, numune delininceye kadar (perforation) kadar enerji seviyesi artırılarak darbe uygulanmıştır. Uygulanan 17 farklı enerji seviyeleri şu şekildedir; 10J, 20J, 25J, 30J, 35J, 40J 45J, 55J, 65J, 75H, 80J, 85J, 90J, 92,5, 95J, 100J, 110J. Penetrasyon eşik enerjisini yakalayabilmek için, penetrasyona yaklaşırken darbe enerji aralıklarını birbirine daha yakın tutulmuştur.

Yapılan deney sonuçlarına göre geri dönüş (rebounding), nüfuziyet (penetration) ve delip geçme (perforation) olarak üç çeşit darbe davranışı görülmüştür. Kalın ve ince numuneler için nüfuziyet ve delip geçme arasındaki farkı netleştirmek için Şekil 6.1’de kalın ve ince numuneler için nüfuziyet ve delik geçme örnekleri verilmiştir.

5. bölümde, ağırlık düşürme test cihazından temas kuvveti, hız, yer değiştirme ve enerjinin temas süresine göre grafiklerinin elde edilebileceğinden bahsedilmişti. Bu başlıkta, elde edilen bu grafiklerin yorumları anlatılmıştır.



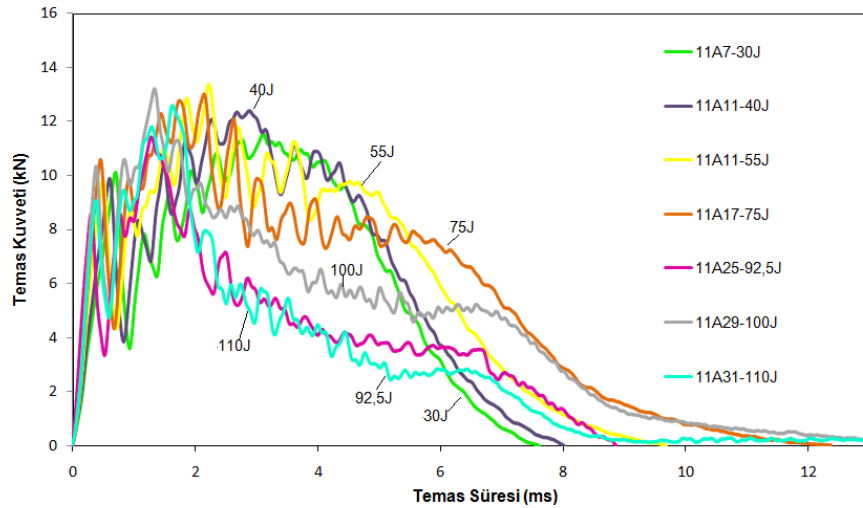
Şekil 6.1. Kalın ve ince numunelerde nüfuziyet ve delip geçme örnekleri

Temas kuvvetinin incelenmesi

Temas kuvveti-temas süresi grafikleri

Kuvvet'in zamana karşı verisi daha önce bahsedildiği gibi piezo elektrik sensör tarafından ölçülmektedir. "11" numaralı numunenin temas kuvvetinin temas süresine karşı grafiği Şekil 6.2'de verilmiştir. Enerji seviyelerinde ki değişimi görebilmek için farklı enerji seviyelerinde üst üste eklenerek karşılaştırma yapılmıştır. 17 farklı enerji seviyesini aynı grafikte göstermenin grafiği yorulmada açısından zorluk oluşturabileceği düşüldüğü için, sadece 7 enerji seviyesi (30 J, 40 J, 55 J, 75 J, 92,5 J, 100 J ve 110 J) gösterilmiştir.

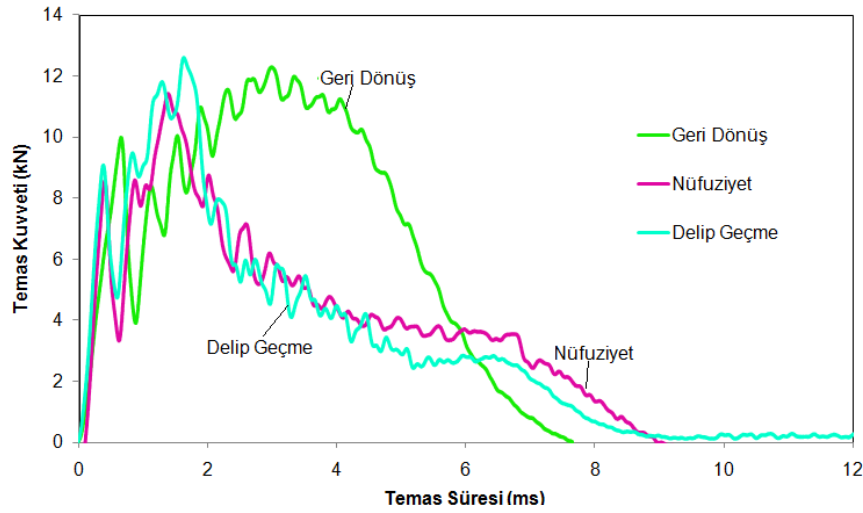
Bu grafikteki 3 farklı darbe davranışı daha açık görebilmek için, geri dönüş, penetrasyon ve delip geçme enerji seviyeleri Şekil 6.3'de ki grafikte gösterilmiştir. Çok açık bir şekilde, görüldüğü gibi temas kuvvetinin temas süresine karşı eğrisi, geri dönüş, nüfuziyet ve delip geçme durumlarında farklı şekiller oluşturmaktadır.



Şekil 6.2. "11" numaralı test numunesine 7 farklı darbe enerji seviyesindeki temas kuvveti/temas süresi grafikleri

Geri dönüş durumunda kuvvet eğrisi parabolik bir şekil oluşturmaktadır. Nüfuziyet ve delip geçme durumlarında ise kuvvet eğrilerin şekilleri birbirine

benzemektedir. Delip geçme durumlarında temas kuvveti hemen sıfırlanmamakta ve bir süre sabit değerde kalmaktadır. Bunun nedeni, vurucu ile numune arasında oluşan sürtünme kuvvetidir.



Şekil 6.3. “11” numaralı test numunesinin geri dönüş-nüfuziyet-delip geçme darbe davranışları için temas kuvveti/temas süresi grafikleri

Bundan dolayı delip geçme durumunda beklenen temas kuvvetinin sıfıra düşme durumu asla gerçekleşmemektedir [45]. Nüfuziyet ve geri dönüş eğrilerinde maksimum kuvvete ulaşıldıktan sonra ani bir düşüş olduğu görülmektedir. Bunun nedeni ise numunenin arkasında (darbe görmeyen kısmında) oluşan ciddi fiber kırılmalarından dolayı, vurucu ile numunenin anlık temasının azalmasıdır [21].

Enerji artıça maksimum temas kuvvetinin arttığı görülmektedir. Ancak belli maksimum temas kuvveti, belli bir seviyeye ulaşmış ve sabitlenmiştir. Buradan maksimum temas kuvvetinin malzemeye ait bir özellik olduğu ve malzemenin dayanım kuvveti olduğu çıkarılabilir. Belli bir doyuma ulaştıktan tek yönlü karbon tabakalı kompozit levha sonra enerji artışından etkilenmemektedir [15]. Temas süresi ise, darbe enerjisi artıça artmıştır. Şekil 6.3'da delip geçme ve nüfuziyet temas süreleri karşılaştırıldığında, delip geçme durumunda temas süresinin, nüfuziyet temas süresine göre daha az

çıktığı görülmektedir. Buradan nüfuziyet durumuna kadar temas süresinin enerji artışıyla arttığı, daha sonra azaldığı sonucu çıkartılabilir.

Temas kuvveti-yer değiştirme grafikleri

Şekil 6.4'de 11 numaralı numune için 7 farklı darbe enerjisi için, Şekil 6.5 de ise 3 farklı darbe davranışı için temas kuvveti-yer değiştirme grafikleri verilmiştir. Temas kuvveti-yer değiştirme eğrisinin kompozit malzemelerin darbe yüküne karşı gösterdiği davranışın bir imzası olduğu söylenir [21]. Bu grafikten Şekil 6.5'de görüldüğü gibi maksimum temas kuvveti, kritik temas kuvveti ve eğilme rijitliği gibi parametreler incelenebilir.

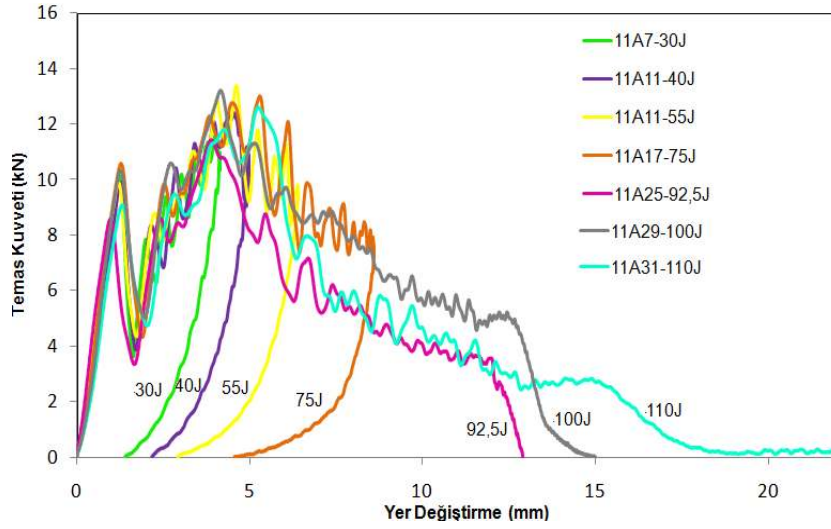
Maksimum temas kuvveti, kompozit malzeme tarafından taşınabilen en büyük temas kuvvetidir [15].

Eğilme rijitliği; Temas kuvveti-yer değiştirme eğrisi altında yüklemenin yapıldığı grafiğin sol tarafındaki konkav eğride eğim çizgisi görülmektedir. Bu eğim çizgisi kompozit malzemenin darbe kuvvetine karşı direncini gösterir ve rijitlik olarak adlandırılır [2].

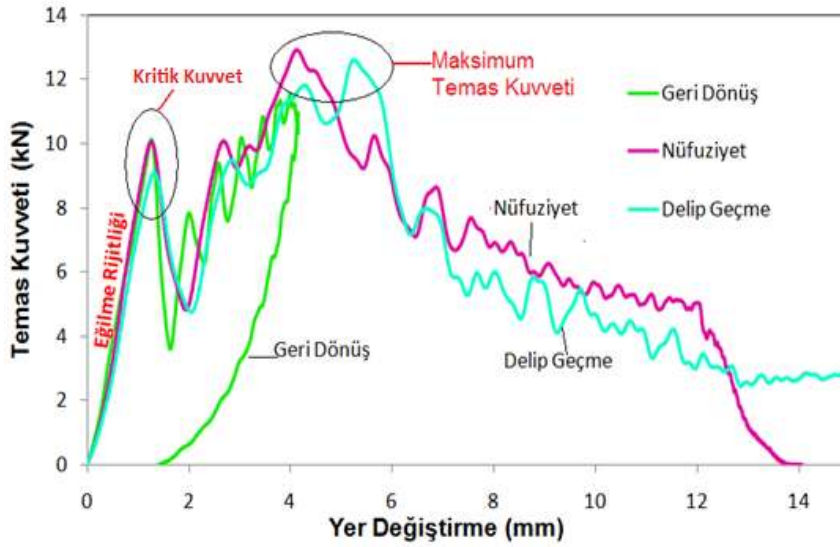
Kritik Kuvvet: Kuvvet yer değiştirme eğrisindeki kuvvetin ani olarak düşüş gösterdiği nokta olarak tanımlanmaktadır Abrate ve Schoeppner, kritik kuvvetin varlığını ilk kuvvet düşüşünde olduğu göstermiş ve bu kuvvetin en çok tabaka ayrılmaları ve matris çatlamaları ile ilgili olduğu sonucu çıkartmıştır [15].

Genel olarak kuvvet-yer değiştirme eğrilerini açık olanlar ve kapalı olanlar olarak gruplandırılmaktadır. Geri dönüş durumlarında yükün geri çekilmesi sırasında hem yer değiştirme miktarının hem de darbe yükünün aynı anda azalmasından dolayı kapalı eğri oluşmaktadır. Temas kuvveti-temas süresi grafiklerinde görüldüğü gibi, darbe kuvveti-yer değiştirme eğrilerinde de, delip-geçme durumunda kuvvet sıfırlanmamaktadır. Daha önce bahsedildiği

gibi bu durum, vurucu ile numune arasındaki sürtünme kuvvetlerinden kaynaklanmaktadır.



Şekil 6.4. "11" Numaralı test numunesine ait 7 farklı darbe enerji seviyesindeki temas kuvveti/yer değiştirme grafikleri



Şekil 6.5. "11" numaralı test numunesinin geri dönüş-nüfuziyet-delip geçme darbe davranışları için temas kuvveti-yer değiştirme grafikleri

Hızın incelenmesi

Hız-temas süresi grafikleri

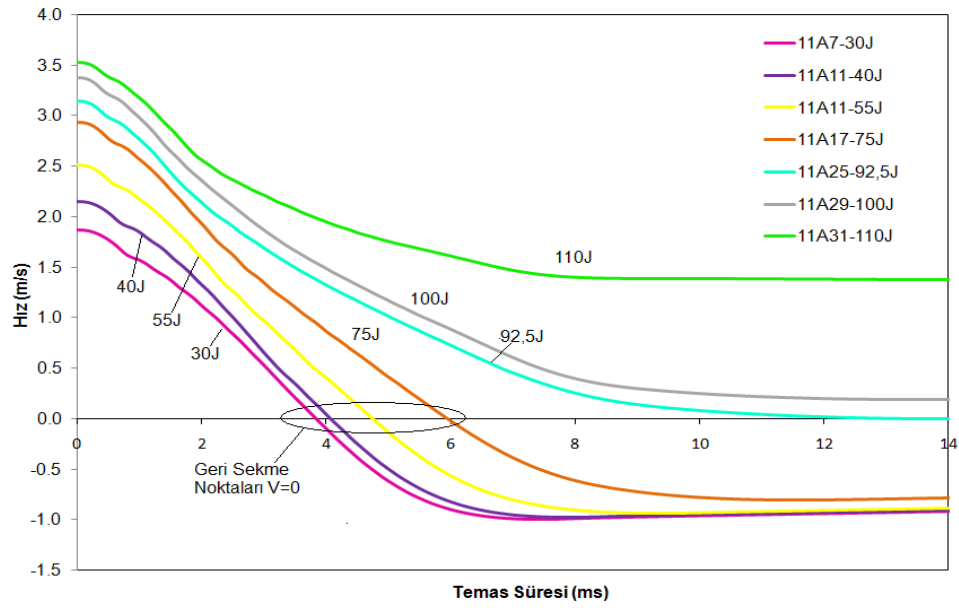
Şekil 6.6'da 11 numaralı test numunesinin 7 farklı darbe enerjisi için, Şekil 6.7' de 3 farklı darbe davranışı için hız-temas süresi grafikleri verilmiştir. Tüm eğrilerde beklediğimiz üzere hız maksimum değerinde başlamakta ve zaman geçtikçe azalmaktadır. Geri dönüş durumunda vurucunun hızı çarpma yönüne ters olduğundan dolayı negatif değerde olmaktadır. Nüfuziyet durumunda vurucu malzemeye saplanmakta ve sonunda hızı sıfır olmaktadır.

Delip geçme durumunda vurucu numuneye çarptıktan sonra sahip olduğu enerjinin tamamını sönmüleyemediği için numuneyi delmiş ve hareketine lineer olarak devam etmiştir [21].

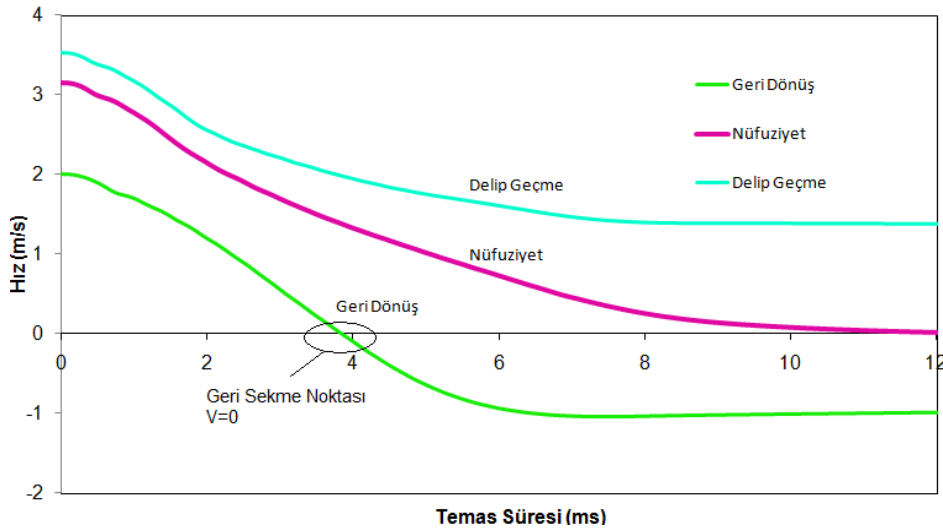
Hız-yer değiştirme grafikleri

Şekil 6.8'de 11 numaralı test numunesinin 7 farklı darbe enerjisi için, Şekil 6.9' de 3 farklı darbe davranışı için hız-yer değiştirme grafikleri verilmiştir. Hızın-yer değiştirmeye karşı grafiği parabolik bir eğri şeklinde oluşmuştur ve geri sekme ve nüfuziyet eğrilerinde maksimum yer değiştirmeye ulaşıldığında hız sıfırlanmıştır. Geri dönüş durumunda, vurucunun yönü değiştiği için hızın mutlak değeri negatif yönde yer değiştirme azaldıkça artmakta ve bir süre sonra sabit değere ulaşmaktadır. Geri dönüş hızının darbe hızına oranı, darbe enerjisi artıkça azalmaktadır. Çünkü darbe enerjisini artıran etken hızın artmasıdır.

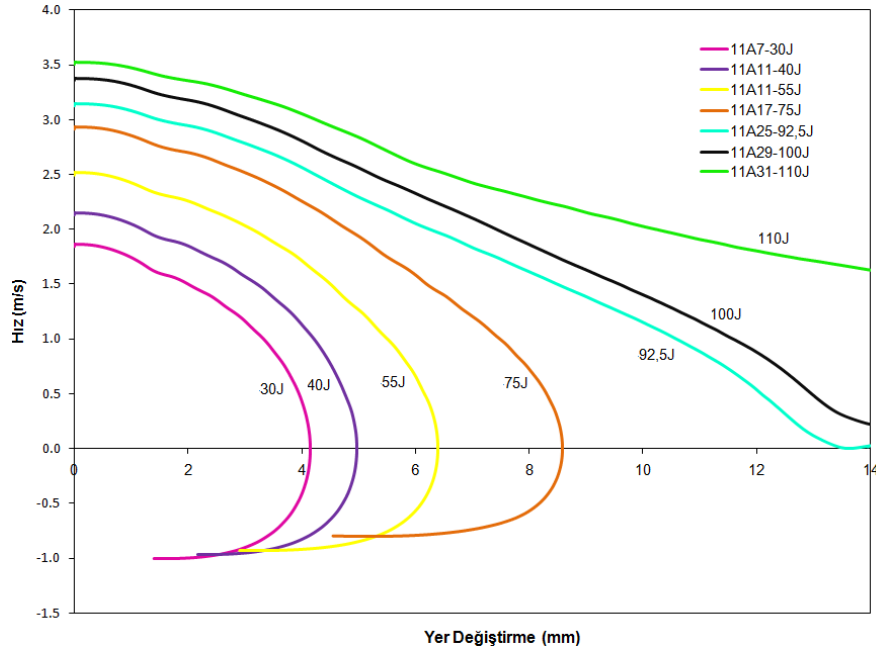
Ancak hız artıkça malzeme üzerinde hasarlar artacak ve vurucunun geri sekme hızı azalacaktır. Bu oran darbe boyunca 1 ile 0 arasında değişmektedir. Az enerji miktarlarında 1 civarında olmaktadır, yüksek enerji miktarlarında 0'a doğru ilerlemektedir. Eğer darbe tüm olarak elastik bir davranış gösterirse bu değer 1 olur [21].



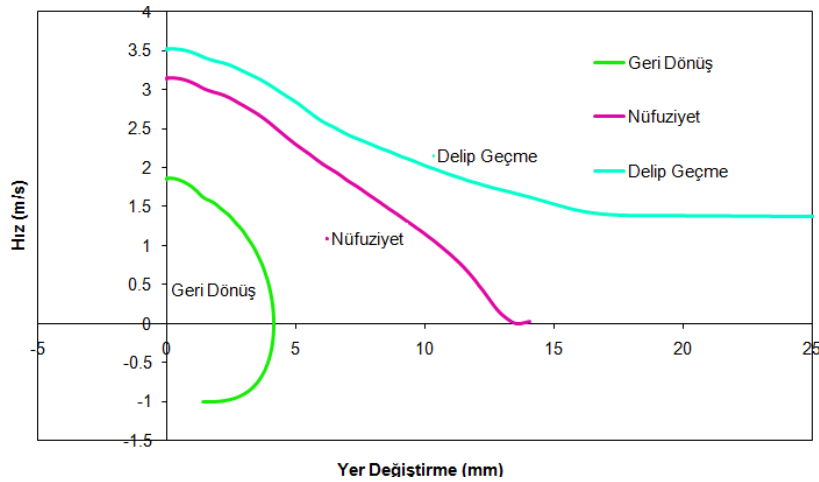
Şekil 6.6. “11” Numaralı test numunesine ait 7 farklı darbe enerjisi seviyesindeki hız/temas süresi grafikleri



Şekil 6.7. “11” numaralı test numunesinin geri dönüş-nüfuziyet-delip geçme darbe davranışları için hız-temas süresi grafikleri



Şekil 6.8. “11” Numaralı Numuneye ait 7 darbe enerji seviyesindeki hız/yer değiştirme grafikleri

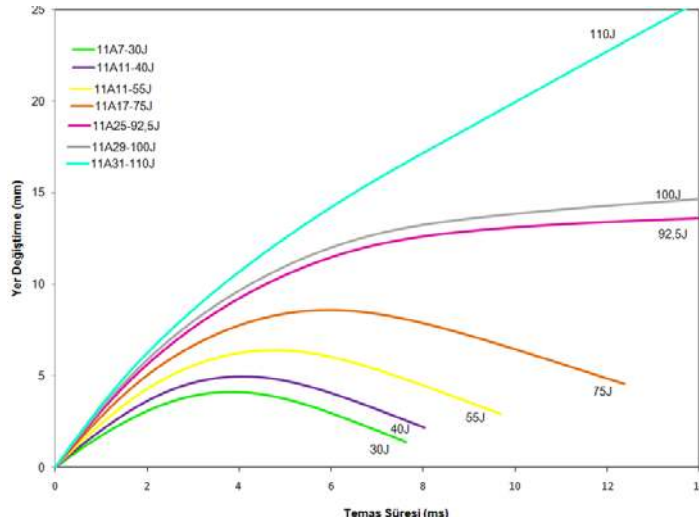


Şekil 6.9. “11” numaralı test numunesinin geri dönüş-nüfuziyet-delip geçme darbe davranışları için hız-yer değiştirme grafikleri

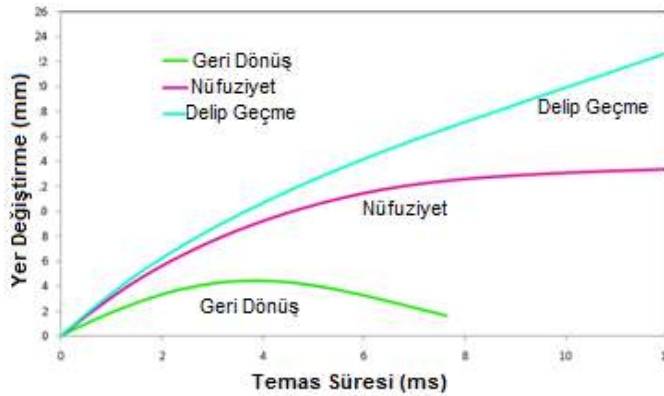
Yer değiştirmenin incelenmesi

Şekil 6.10’da 11 numaralı numunenin 7 farklı darbe enerjisi için, Şekil 6.11’de ise 3 farklı darbe davranışı için yer değiştirme-zaman grafikleri verilmiştir. Şekil 6.3’deki temas kuvveti-temas süresi ile karşılaştırıldığında, maksimum

yer değiştirmenin maksimum temas kuvvetine göre daha geç olduğu görölmektedir. Bu aradaki gecikme darbe enerjisi artıkça artmaktadır. Bu da vurucunun maksimum kuvvete ulaştıktan sonra biraz hareketine devam ettiği göstermektedir [21]. Geri dönüş eğrisinde, maksimum yer değiştirmeye ulaşıldıktan sonra azalma görölmektedir. Nüfuziyet durumunda, maksimum yer değiştirme değerine ulaşıldıktan sonra sabit bir değerde kalır. Bunun nedeni, vurucunun numuneye saplanması ve hızının sıfırlanmasıdır. Delip geçme durumunda ise vurucunun hızı sıfırlanmadığı için, yer değiştirme sürekli olarak arttığı görölmektedir.



Şekil 6.10. “11” Numaralı ait 7 darbe enerji seviyesindeki hız/yer değiştirme grafikleri

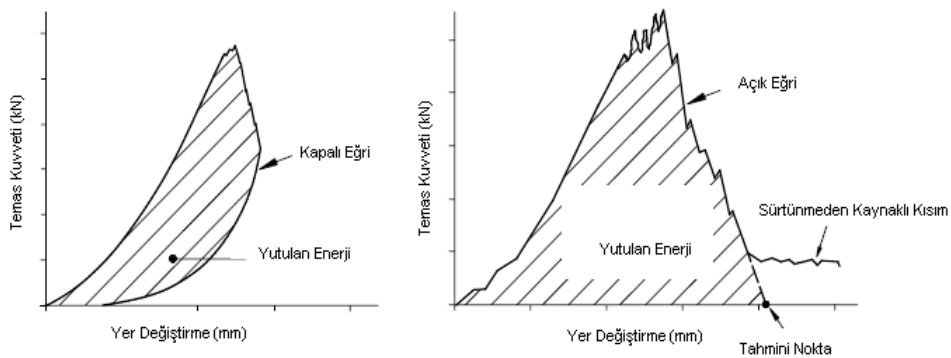


Şekil 6.11. “11” numaralı test numunesinin geri dönüş-nüfuziyet-delip geçme darbe davranışları için yer değiştirme-temas süresi grafikleri

Enerjinin incelenmesi

Kompozit malzemelerde darbe olayından sonra malzemedeki hasar sürecini belirlemek için darbe enerjisi ve yutulan enerji miktarları kullanılmaktadır. Darbe enerjisi daha önce bahsedildiği gibi vurucunun çarpmadan az önceki kinetik enerjisidir. Yutulan enerji ise darbe sonrasında numunenin yuttuğu enerji miktarıdır. Yutulan enerji miktarı temas kuvveti-yer değiştirme eğrisi altındaki toplam alandan hesap edilmektedir. Şekil 6.12'da açık ve kapalı alanların altından yutulan enerji miktarlarının hesaplanması gösterilmiştir. Kapalı eğri altından yutulan enerji miktarı rahatlıkla hesaplanabilir. Ancak delip geçme durumunda oluşan açık eğrilerde sürtünmeden kaynaklı yatay bir çizgi oluşmaktadır.

Test numunesi tarafından yutulan enerji miktarının doğru hesaplanabilmesi için sürtünmeye ayrılan kısmın kaldırılarak, kuvvet eğrisinin aşağıya doğru uzatılması gerekir. Şekil 6.15'da temas kuvveti kesikli çizgiyle kuvvet eğrisi uzatılmış ve yer değiştirme eğrisinde tahmini bir nokta gösterilmiştir [21]. Değiştirilmiş bu kapalı eğri altındaki alan nüfuziyet eşik enerjisi verir. Bu durum uzatılan (extended) metod olarak isimlendirilmektedir [21, 48].



Şekil 6.12. Temas kuvveti-yer değiştirme eğrilerinden yutulan enerji miktarının hesaplanması [21]

Geri dönüş durumunda oluşan kapalı eğrilerde yutulan enerji miktarının hesaplanmasının başka bir yolu ise ilk kinetik enerjiden, geri dönüş kinetik

enerjisinin çıkarılmasıdır. Bu tez çalışmasında, impulse programının hesapladığı temas kuvveti-yer değiştirme eğrisinin altında kalan alandan hesapladığı yutulan enerji miktarı kullanılmıştır. Şekil 6.13'de 11 numaralı numuneye uygulanan 7 farklı darbe enerjisi için, Şekil 6.14 de 3 farklı darbe davranışı için enerji-temas süresi ve enerji yer değiştirme grafikleri verilmiştir. Tüm grafiklerde enerjisinin giderek arttığı (yükleme durumunda) daha sonra azaldığı ve daha sonra sabit bir değere ulaştığı görülmektedir. Grafiklerde maksimum görülen enerji miktarı darbe enerji miktarı, en sonda sabit noktaya ulaştığı kısım ise yutulan enerji miktarını vermektedir. Aradaki fark ise aradaki artan enerji miktarıdır.

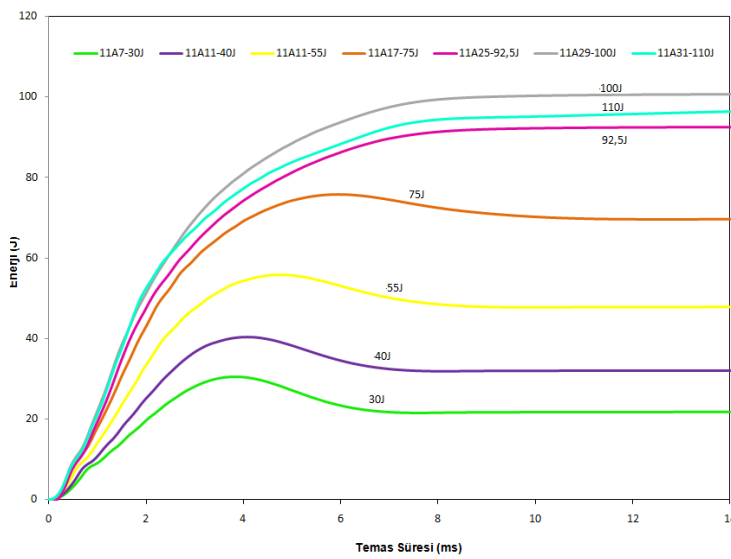
Geri dönüş durumunda darbe enerjisi yutulan enerjiden büyüktür. Dolayısıyla numune vurucunun sahip olduğu tüm enerjiyi yutamaz. Darbe altında eğilmeye uğrayarak şekil değiştiren kompozit levhanın kazandığı elastik enerji, vurucunun geri sekmesine neden olmaktadır [44]. Nüfuziyet durumunda ise numune vurucunun sahip olduğu tüm enerjiyi yutabilmekte ve vurucu numune içerisine gömülerek hızı sıfırlanmaktadır.

Delip geçme durumunda, malzemenin yutulan enerjiden fazlasının görülme durumu normal değildir. Burada Şekil 6.12'de bahsedildiği gibi sürtünmeden kaynaklı bir fazlalık görülmektedir. Bunun Şekil 6.14'de mavi kesikli çizgiyle gösterdiği gibi ihmal edilmesi gereklidir [21].

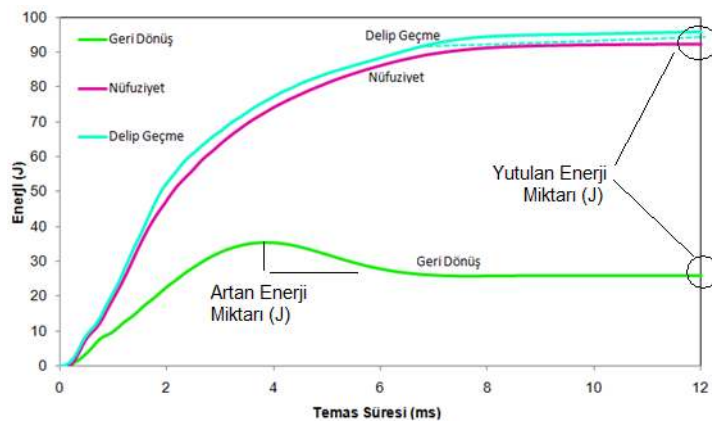
Enerji profil diyagramı ise yutulan enerji ile vurucunun sahip olduğu enerji arasındaki ilişkiyi gösterir. (Şekil 6.15). Genel olarak bir enerji profil diyagramı üç bölgeden oluşur: AB, BC ve CD. Burada AB, geri dönüş bölgesini, BC nüfuziyet bölgesini ve CD delip geçmenin meydana geldiği enerji bölgelerini ifade ederler.

Grafikteki kesikli çizgiler de eşdeğer enerji doğrusunu (Darbe enerjisi ile yutulan enerjinin eşit olduğu doğru) ifade eder. B noktası nüfuziyet eşiğini ve C noktası ise delme eşiğini göstermektedir. Nüfuziyet eşiği vurucunun sahip

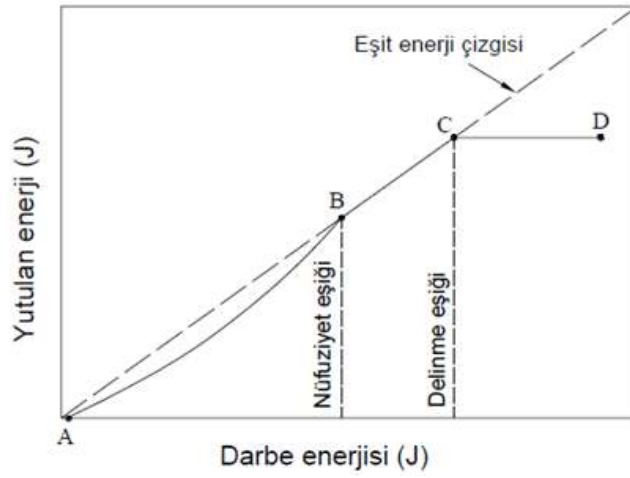
olduğu enerji ile numunenin yuttuğu enerjinin aynı olduğu ilk enerji değeridir. Yani vurucu numuneye çarptıktan sonra her hangi bir şekilde geri dönmeden numuneye tamamen saplanmaktadır [45]. Şekil 6.16'de 11 numaralı levha için enerji nüfuziyet ve delinme eşikleri bulunmuştur. Geri dönüş, nüfuziyet ve delip geçme darbe türleri için ilgili bölgeler gösterilmiştir. Görüldüğü gibi enerji miktarı artıkça, test sonucu elde edilen noktaların eşit enerji çizgisine yaklaşmaktadır.



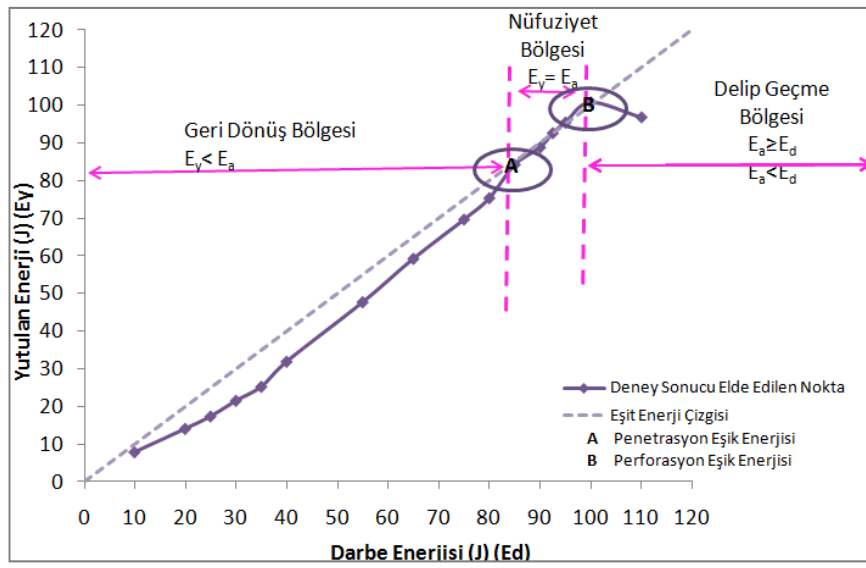
Şekil 6.13. "11" Numaralı Numuneye ait 7 darbe enerji seviyesindeki enerji/temas süresi grafikleri



Şekil 6.14. Geri dönüş-nüfuziyet-delip geçme darbe davranışları için enerji enerji-temas süresi grafikleri



Şekil 6.15. Kompozit levhalar için enerji profil diyagramı [45]

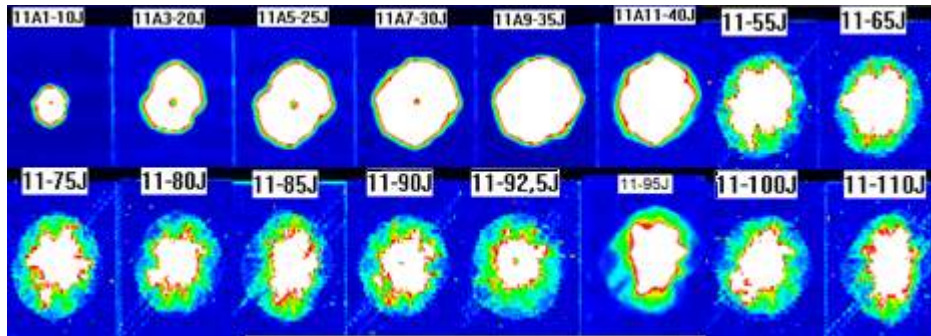


Şekil 6.16. “11” numaralı test numunesi için enerji profili

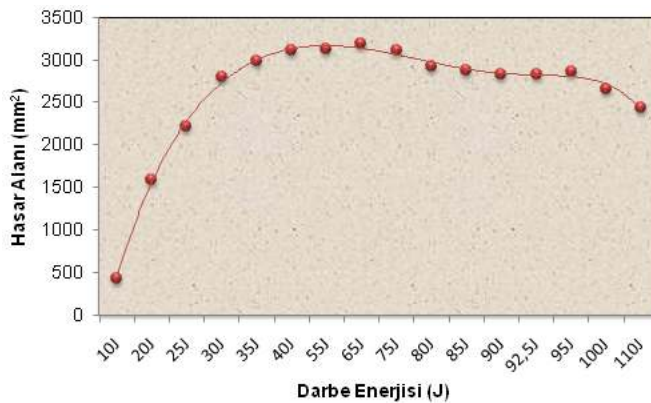
6.1.2. Ultrasonik C-scan muayenesi hasar alanlarının incelenmesi

“11” numaralı numunenin 10-110J darbe enerjisi aralığında ultrasonik c-scan sonuçları Resim 6.1 ‘de verilmiştir. Sonuçlardan alınan hasar alanının darbe enerjisine karşı grafiği Şekil 6.17’de gösterilmiştir.

Bu numune için test edilen enerji seviyelerinde ve test koşullarında, darbe enerjisi arttıkça hasar alanı da doğrusal olarak belli bir seviyeye kadar artmakta, sonra birden bire düşmektedir. Bu gösterir ki; karbon takviyeli kompozit plaklarda hasar alanı belli bir darbe enerji seviyesinde bir eşik değerine ulaşır ve bundan sonra hasarın yayılımı daha yüksek enerji seviyelerinde gerçekleşmez. Bunun yerine test numunesinin nüfuziyetine yol açan yüksek dereceli bölgeselleşmiş gerilmeler oluşur [49].



Resim 6.1. “11” numaralı test numunesine ait c-scan sonuçları



Şekil 6.17. “11” numaralı test numunesinin hasar alanı-darbe enerjisi grafiği

6.2. Enerji Artışının Etkisi

6.2.1. Ağırlık düşürme cihazından alınan dataların yorumlanması

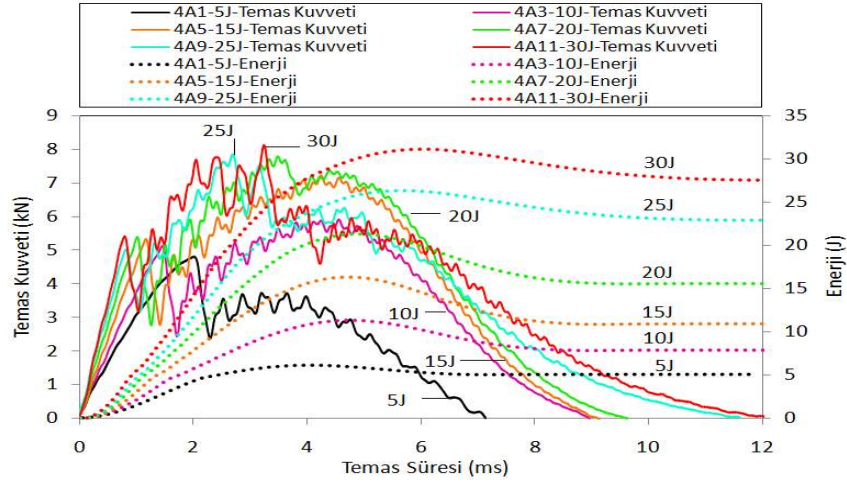
Bu başlık altında enerji seviyesinin artışının aşağıdaki sıralanmış darbe parametrelerine etkisi incelenmiştir.

- ✓ Maksimum temas kuvveti
- ✓ Kritik temas kuvveti
- ✓ Temas süresi
- ✓ Maksimum kuvvetteki yer değiştirme
- ✓ Maksimum kuvvet'teki enerji
- ✓ Toplam yer değiştirme
- ✓ Yutulan enerji

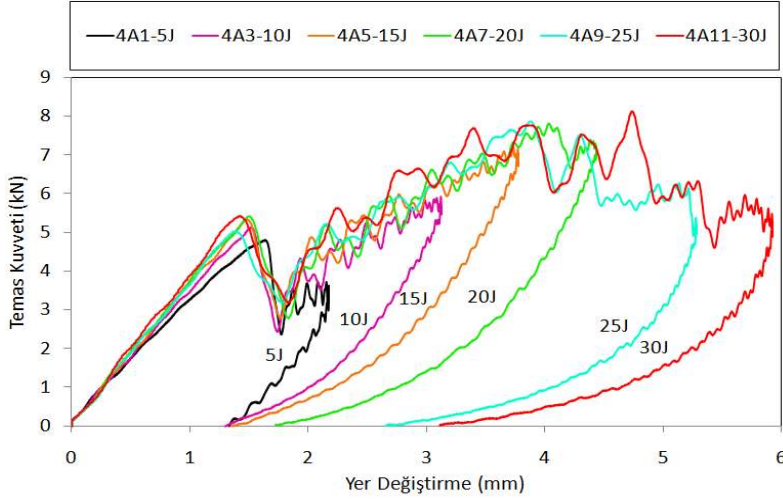
Şekil 6.18 ve Şekil 6.20 arası grafiklerde 3 farklı kalınlıktaki “4”, “5” ve “6” numaralı test numuneleri için (a) temas kuvveti ve enerji'nin temas süresine (b) temas kuvveti'nin yer değiştirmeye (c) yer değiştirme ve hızın temas süresine karşı grafikleri gösterilmiştir. Enerji artışının etkileri incelemek amacıyla aynı numune üzerine uygulanan farklı enerji seviyeleri grafikte üst üste çizilmiştir. Uygulanan darbe test enerjileri sırasıyla aşağıdaki gibidir;

- ✓ 4 (20 kat) numaralı numune için; 5J, 10J, 15J, 20J, 25J ve 30J,
- ✓ 5 (29 kat) numaralı numune için; 10J, 20J, 25J, 30J, 35J ve 40J,
- ✓ 6 (40 kat) numaralı numune için; 10J, 20J, 30J, 40J, 50J ve 60J.

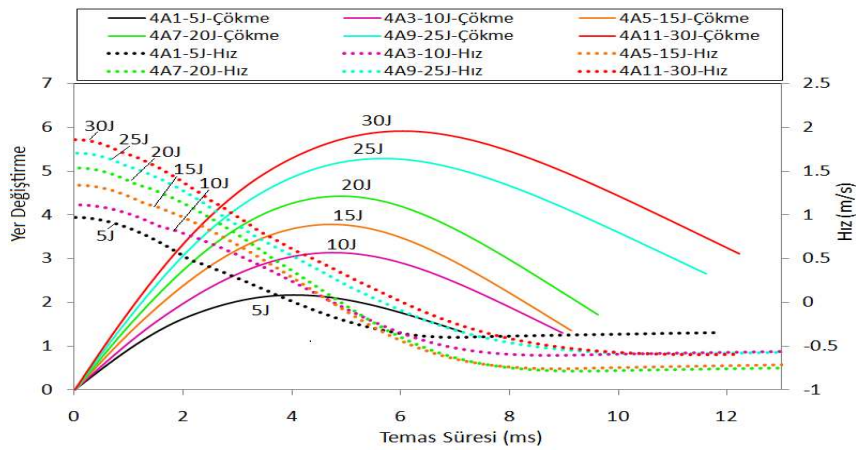
Enerji değişiminin etkileri, diğer oryantasyon yüzdelere sahip test numunelerde benzer özellikler gösterdiği o numunelere ait ağırlık düşürme test grafikleri eklenmemiştir.



(a)

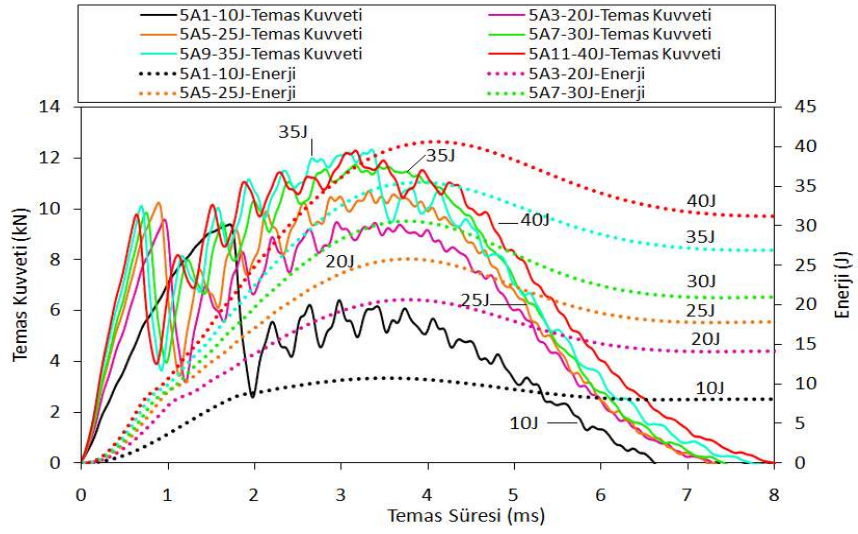


(b)

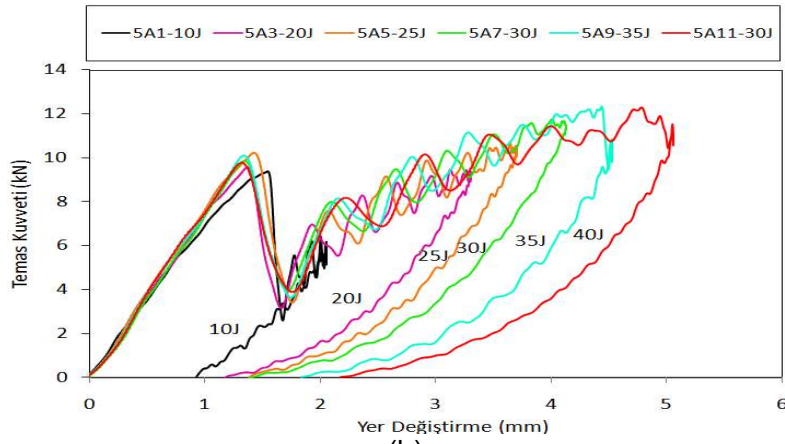


(c)

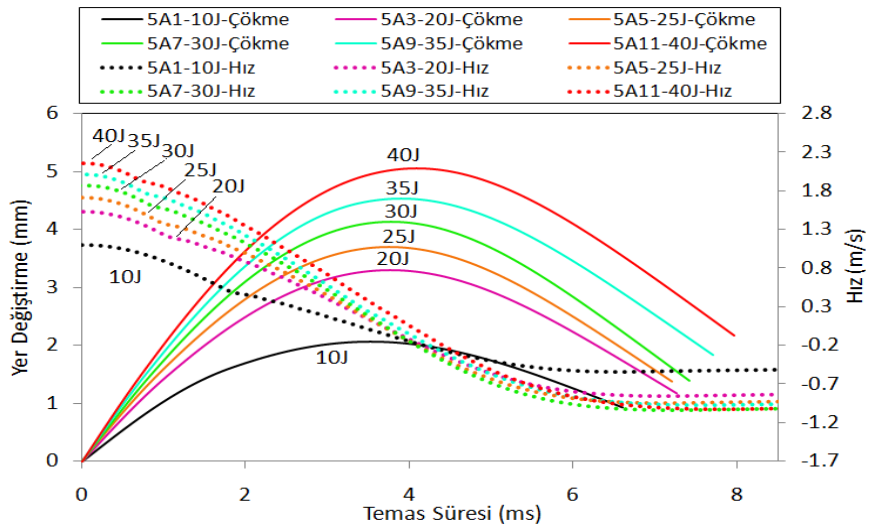
Şekil 6.18. “4” (20 katlı) nolu test numunesinin, (a) temas kuvveti & enerji / temas süresi (b) temas kuvveti / yer değiştirme grafikleri, (c) yer değiştirme & hız / temas süresi grafikleri



(a)

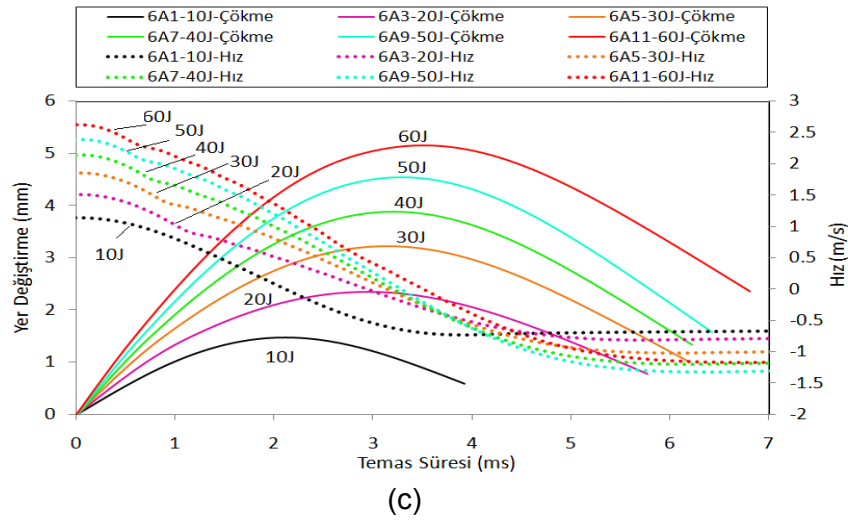
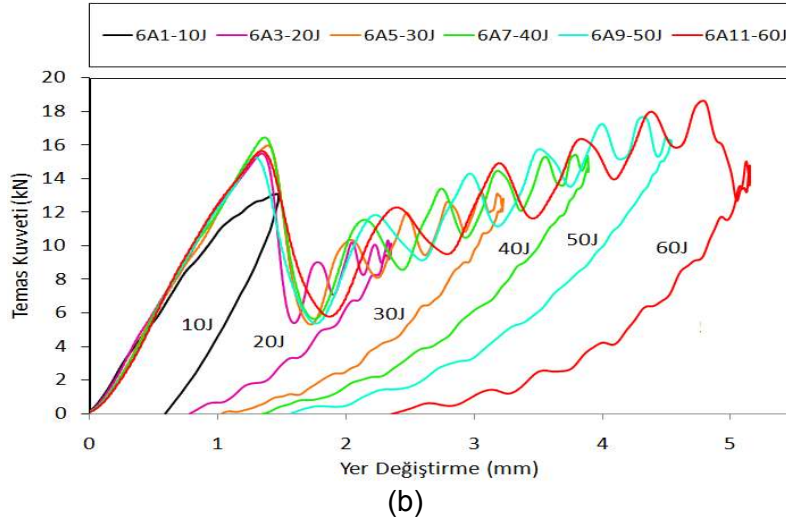
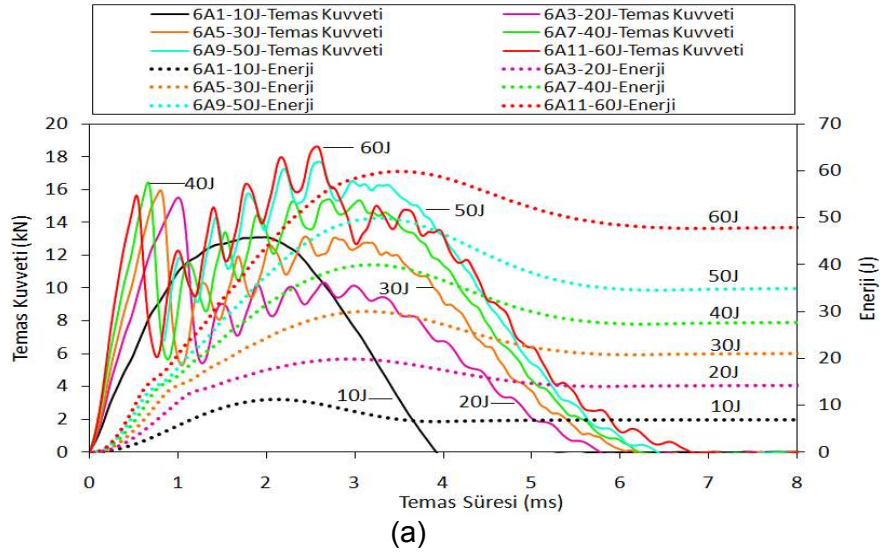


(b)



(c)

Şekil 6.19. “5” (29 katlı) nolu test numunesinin, (a) temas kuvveti & enerji / temas süresi (b) temas kuvveti / yer değiştirme grafikleri, (c) yer değiştirme & hız / temas süresi grafikleri



Şekil 6.20. “6” (40 katlı) nolu test numunesinin, (a) temas kuvveti & enerji / temas süresi (b) temas kuvveti / yer değiştirme grafikleri, (c) yer değiştirme & hız / temas süresi grafikleri

Tüm numunelerdeki temas kuvveti-yer değiştirme grafiklerden bütün numunelerin geri sekme davranışı gösterdiği açıkça görülmektedir. Temas kuvveti-yer değiştirme eğrileri içeri doğru kıvrılmaktadır. Ayrıca yükleme ve geri çekilme durumlarındaki temas kuvveti eğrileri birbirine paralel olmaktadır.

Kuvvet yükleme durumunda maksimum yer değiştirme noktasına kadar artmaya devam etmektedir. Ayrıca enerji miktarı artıkça buna bağlı olarak temas süresi de artmaktadır. Resim 6.2’de ki c-scan sonuçlarına bakıldığında yayılmış hasarlar görülmesine rağmen, tüm testlerde numune vurucu ucu geri itebilmeyi başaramamıştır.

Tüm kompozit numunelerin özellikleri ve test koşullarının aynı olmasından dolayı kuvvet artışı, tüm numunelerde çok benzer bir eğri göstermiştir. Darbe enerjisi artıkça, vurucunun darbeden önceki konumuna gelmesi için geçen süre artmaktadır. Bunun nedeni, numune içerisinde oluşan hasarlardır. Tüm test numunelerinde geri sekmeden dolayı yutulan enerji, darbe enerjisinden küçük çıkmıştır.

Yer değiştirme-hız değerlerinin temas süresine göre karşılaştırıldığı grafiklerden, hız değerinin giderek azalmakta, maksimum yer değiştirme noktasında sıfıra düşmekte ve daha sonra geri sekme hareketinden dolayı hızı ters yönde hızlanmakta olduğu görülmektedir.

Tüm enerji seviyelerinde geri sekme yaşandığı için test sonunda hız sıfırlanmamıştır. Darbe sonundaki yer değiştirme miktarı, maksimum kuvvete denk gelen yer değiştirme miktarından daha küçük çıkmaktadır. Bunun nedeni, maksimum kuvvetten sonra vurucu ucun geri çekilmesi ve malzemedeki elastik değişimin etkisidir.

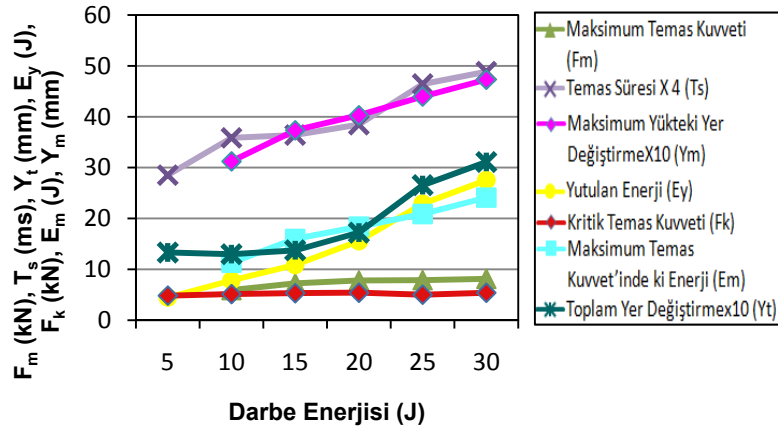
Şekil 6.21’de 4,5 ve 6 nolu test numuneleri için, darbe parametrelerinden maksimum temas kuvveti, kritik kuvveti, temas süresi, maksimum yer

değiştirme, maksimum kuvvetteki temas süresi, maksimum kuvvetteki enerji, yutulan enerji miktarlarının darbe enerjisine karşı davranışı verilmiştir.

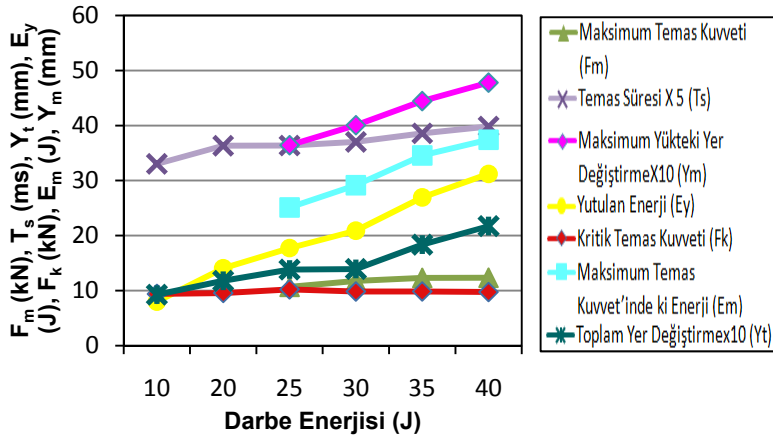
Beklenildiği üzere, test edilen enerji aralığında (geri sekme davranışının görüldüğü aralık) maksimum temas kuvveti enerji artıkça az da olsa artmaktadır. 6.1.1 başlığında 11 numaralı numune üzerinde delinceye kadar yapılan testlerde bir süre sonra maksimum temas kuvvetinin sabit bir değere ulaştığı görülmüştü.

Tüm test numunelerinde, yutulan enerji, temas süresi, maksimum temas kuvvetindeki enerjinin ve toplam yer değiştirmenin darbe enerjisi artıkça arttığı görülmektedir. Bu sonuçlar [11] ile uyumludur. Kritik kuvvetin darbe enerjine bağlı olmadığı açıkça görülmektedir. Ayrıca yapılan birçok araştırmalarda, kritik kuvvetin test numunesinin boyutlarından, bağlama koşullarından bağımsız olduğu kanıtlanmıştır [50-52].

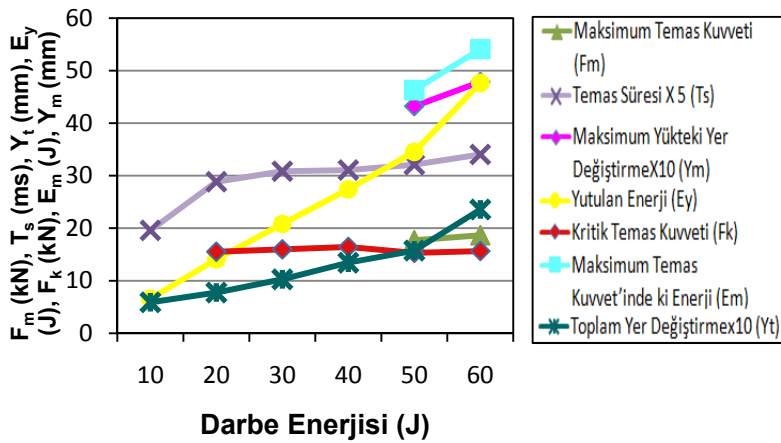
Test numunelerine bakıldığında, 4 nolu numunenin 5 J'da, 5 nolu numunenin 10 ve 20J'larda, 6 nolu numunenin 10, 20, 30 ve 40 J'luk enerji seviyelerinde temas kuvvetinin kritik kuvveti geçemediği görülmektedir. Bu yüzden bu enerji aralıklarında maksimum temas kuvveti değeri görülememektedir. Bu enerji seviyelerinde vurucunun kalan potansiyel enerjisi kritik temas kuvvetini geçmeye yetmemiştir [52]. Bu değerler hasar oluşumu hakkında önemli sinyaller vermektedir. Bu değerlerin geçildiği enerji seviyesinde (4 nolu test numunesinde 10J, 5 nolu test numunesinde 30 J ve 6 nolu test numunesinde 50 J) toplam yer değiştirmenin ve yutulan enerjinin ani bir artış gösterdiği görülmektedir. Bu durum bu noktalardan sonra en tehlikeli hasar oluşumu olan fiber kırılmalarının başladığının göstergesidir. 6 numaralı numuneye uygulanan 10J'luk enerjinin yarattığı temas kuvvetinin grafikte salınım yapmadığı görülmektedir. Yani kritik kuvvet oluşmamıştır. Onun dışındaki tüm enerji seviyelerinde ilk hasar kuvveti ve salınımlar bariz şekilde görülmektedir. Temas süresinin artışı, hasar oluşumlarının göstergesi olduğu için, bu durum 20J'da hasar oluştuğunun işareti olarak gösterilebilir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 6.21. (a) “4” nolu (20 kat), (b) “5” (29 kat), (c) “6” nolu (40 kat) test numunelerinin enerji artışıyla darbe parametrelerinin incelenmesi

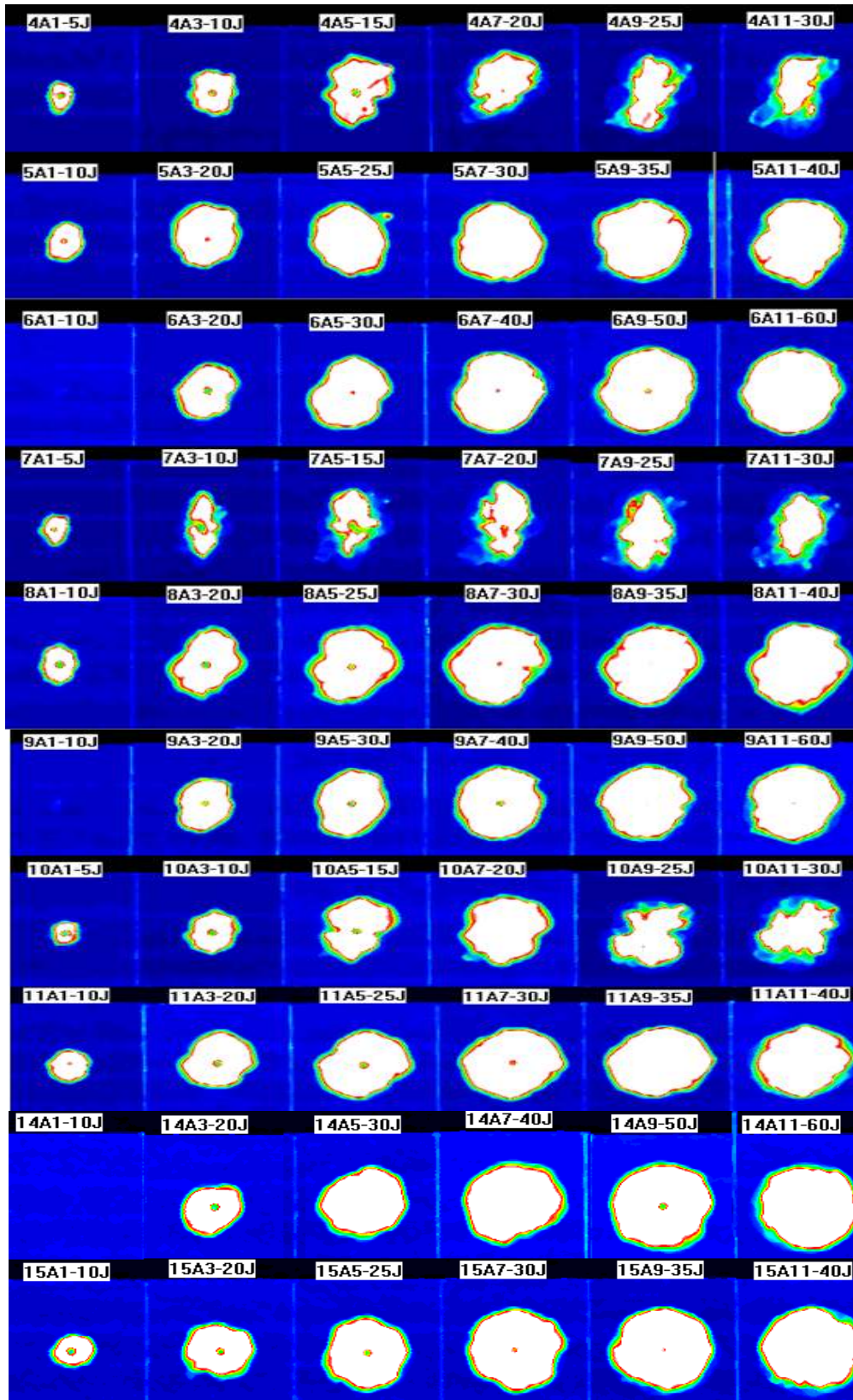
6.2.2. Ultrasonik C-scan muayenesi hasar alanlarının incelenmesi

12 adet test numunesine uygulanan 6 farklı darbe enerji seviyesi sonunda hasar alanları, ultrasonik c-scan muayenesi ile elde edilmiş ve Şekil 6.22'de grafiksel olarak, Resim 6.2'de resim olarak gösterilmiştir.

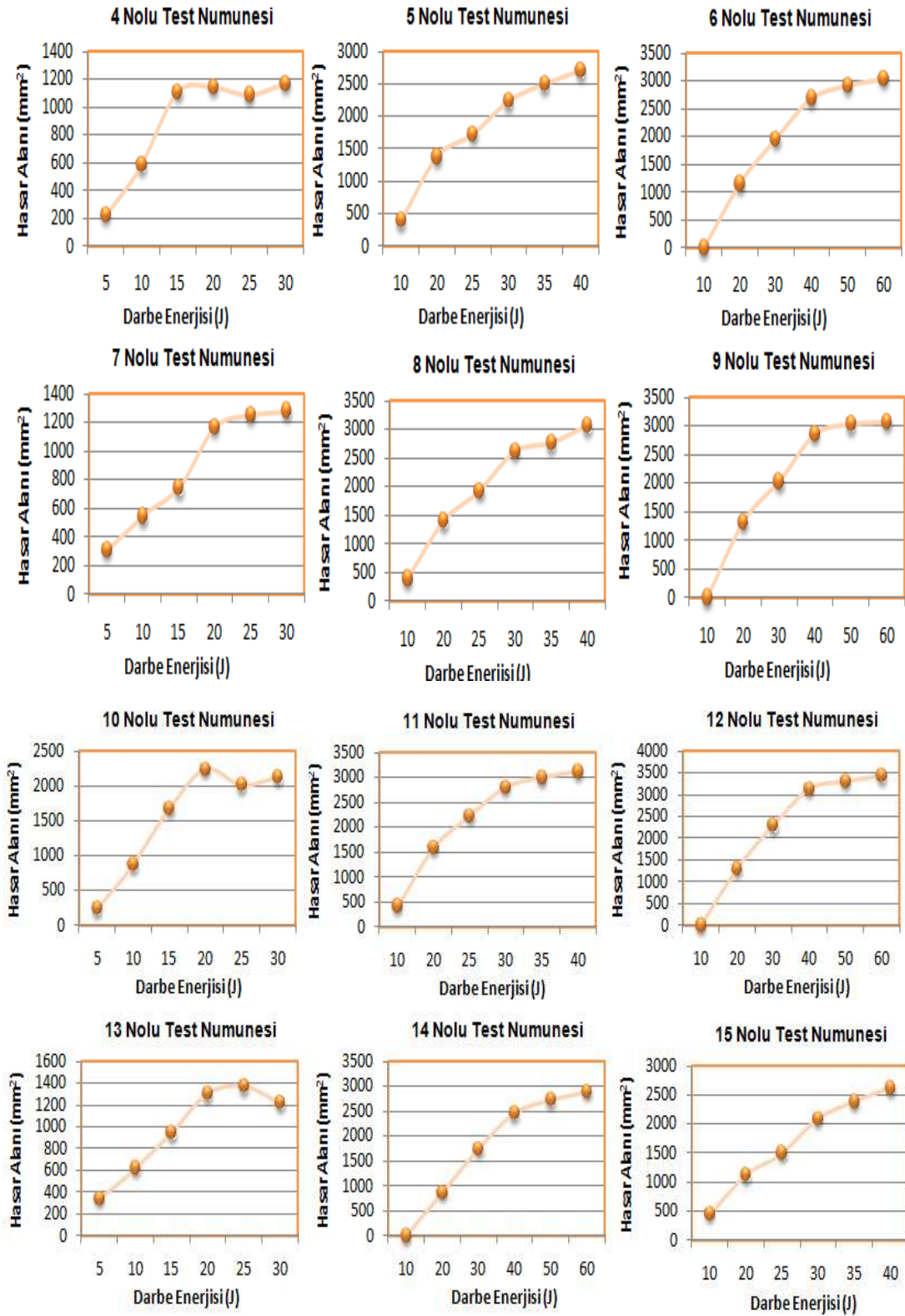
6, 9, 12 ve 14 numaralı (40 katlı) test numunelerinde, 10J'luk darbe enerjisi sonunda tabaka ayrılması olarak nitelendireceğimiz bir hasar oluşmadığı gözlemlenmektedir. Buradan kritik kuvvetinin oluşmadığı durumlarda tabaka ayrılması hasarın henüz oluşmadığı sonucu çıkarılabilir.

Temas kuvvetinin, kritik kuvveti geçer geçmez hasar alanın süratle arttığı gözlemlenmiştir. Darbe testi sonucunda temas kuvveti, kritik kuvveti geçebilirse fiber kırılması gibi ana hasarların görüldüğü ancak temas kuvveti kritik kuvvetini geçemez ise çok önemli bir hasarın oluşmadığı tespit edilmiştir [53].

İnce numuneler hariç (4, 7, 10, 13) diğer numunelerde enerji artışının hasar alanı arttırdığı görülmektedir. İnce numunelerde belli bir seviyeye kadar hasar alanı artmış sonra ani bir düşüş görülmüştür. Bu durum daha önce 11 numaralı numunede görülen durumun aynısıdır. Karbon takviyeli kompozit plaklarda hasar alanı belli bir darbe enerji seviyesinde bir eşik değerine ulaşır ve bundan sonra hasarın yayılımı daha yüksek enerji seviyelerinde gerçekleşmez. Bunun yerine test numunesinin nüfuziyetine yol açan yüksek dereceli bölgeselleşmiş gerilmeler oluşur [49].



Resim 6.2. 6 farklı darbe enerjisi sonrası 4-15 nolu test numunelerin ultrasonik c-scan sonucu



Şekil 6.22 Darbe testi sonrası numunelerde oluşan hasar alanları

6.2.3. Çentik derinliği ve zamana göre değişimi

'4 (20 kat), 5 (29 kat) ve 9 (kat) numaralı test numunelerinde darbe sonrası oluşan çentik miktarları zamana karşı incelenmiştir. Bunun için ilk 2 saat boyunca her 15 dakikada bir, takip eden 2 saat boyunca her yarım saatte bir, sonraki 3 saat boyunca da her saatte bir ve daha sonrasında ise bir hafta boyunca her gün ölçüm alınmıştır. Tüm test numunelerinde 2 gün üst üste aynı değer okunduğu için zaman ölçmeye devam edilmemiştir. Ölçüm sonuçları Çizelge 6.1'de gösterilmiştir. Buna göre çıkan sonuçları şöyle özetleyebiliriz;

- ✓ 4 numaralı 20 katlı tek yönlü karbon tabakalı kompozit levhada ki çöküntü miktarında %26,3 ile %7,2;
- ✓ 5 numaralı 29 katlı tek yönlü karbon tabakalı kompozit levhada ki çöküntü miktarında %22,7 ile %11,1;
- ✓ 9 numaralı 40 katlı tek yönlü karbon tabakalı kompozit levhada ki çöküntü miktarında %5,5 ile %3,6

arasında bir azalma gözlemlenmiştir. İnce test numunelerinin çöküntü derinliğinin iyileşme oranın kalın test numunelerine göre daha fazla olduğu görülmüştür. Bu durum ince malzemelerin, kalın malzemeye göre darbe sırasında daha fazla esnemesi ile açıklanabilir. Darbe enerjisi ile çöküntü miktarının azalması arasında net bir bağlantı görülememekte birlikte, genel olarak düşük enerjili darbelerde oluşan çöküntü miktarının yüksek enerjili darbelerde oluşana göre daha fazla azalma olduğu söylenebilir. Bu durum enerji artıkça fiber kırılmalarının oluşması ve bu durumda matris yayılımın daha az olması olarak düşünülebilir.

Sonuç olarak, tek yönlü karbon tabakalı kompozit plaklarda darbe sonrası çöküntü derinliğinde bir miktar iyileşme gözlemlenmiştir. Ancak bu kompozit levhada oluşan hasarın iyileşmesi olarak yorumlanamaz. Bu durum darbeden sonra levhada ki reçinenin bir miktar yer değiştirmesi olarak yorumlanabilir.

Bu durum çöküntü miktarı zamana bağlı olarak bir miktar azalabilir şeklinde de özetlenebilir [55]. Hasar görmüş bir parça ölçüldüğünde, ne zaman hasar gördüğü ve çöküntü derinliğinde bir miktar azalma olabileceği dikkate alınmalıdır.

Çizelge 6.1. Farklı kalınlıklardaki test numunelerinde darbe sonrası oluşan çöküntü miktarının zamana karşı değişimi

	Test Numunesi	1.gün												
		10:30	10:45	11:00	11:15	11:30	11:45	12:00	12:15	12:30	13:00	13:30	14:00	14:30
Çöküntü Miktarı (mm)	4A1-5J	0,095	0,090	0,090	0,090	0,085	0,085	0,085	0,085	0,080	0,075	0,075	0,075	0,075
	4A3-10J	0,180	0,175	0,175	0,170	0,170	0,170	0,165	0,165	0,165	0,160	0,160	0,155	0,150
	4A5-15J	0,230	0,250	0,250	0,245	0,245	0,245	0,240	0,240	0,240	0,235	0,235	0,235	0,230
	4A7-20J	0,555	0,555	0,540	0,540	0,530	0,530	0,525	0,520	0,510	0,505	0,500	0,490	0,480
	4A9-25J	1,100	1,100	1,095	1,090	1,085	1,085	1,080	1,075	1,075	1,075	1,060	1,050	1,040
	4A11-30J	1,380	1,370	1,360	1,350	1,350	1,340	1,330	1,320	1,310	1,300	1,295	1,295	1,290
	5A1-10J	0,110	0,110	0,100	0,100	0,100	0,090	0,090	0,095	0,095	0,095	0,095	0,090	0,090
	5A3-20J	0,220	0,220	0,220	0,215	0,215	0,215	0,210	0,210	0,210	0,210	0,205	0,205	0,205
	5A5-25J	0,250	0,250	0,245	0,245	0,240	0,235	0,235	0,230	0,230	0,225	0,225	0,220	0,220
	5A7-30J	0,340	0,340	0,330	0,320	0,320	0,320	0,310	0,305	0,300	0,290	0,290	0,295	0,295
	5A9-35J	0,520	0,520	0,515	0,510	0,510	0,505	0,500	0,500	0,490	0,485	0,480	0,470	0,470
	5A11-40J	0,720	0,720	0,720	0,715	0,715	0,710	0,705	0,705	0,700	0,690	0,690	0,680	0,67,5
	9A1-10J	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	9A3-20J	0,180	0,180	0,180	0,180	0,180	0,180	0,180	0,180	0,180	0,180	0,180	0,175	0,175
	9A5-30J	0,285	0,285	0,285	0,285	0,285	0,285	0,280	0,280	0,280	0,280	0,280	0,280	0,275
	9A7-40J	0,370	0,370	0,365	0,365	0,365	0,360	0,360	0,355	0,355	0,350	0,350	0,350	0,350
	9A9-50J	0,550	0,550	0,545	0,545	0,540	0,540	0,535	0,535	0,530	0,530	0,530	0,525	0,525
	9A11-60J	0,830	0,830	0,830	0,825	0,825	0,820	0,820	0,815	0,815	0,810	0,810	0,805	0,805

Çizelge 6.1 (Devam) Farklı kalınlıklardaki test numunelerinde darbe sonrası oluşan çöküntü miktarının zamana karşı değişimi

	Test Numunesi	1.gün			2.gün	3.gün	4.gün	5.gün	6.gün	7.gün	8.gün	Değişim Oranı
		15:30	16:30	17:30	20:00	20:00	20:00	20:00	20:00	20:00	20:00	
Çöküntü Miktarı (mm)	4A1-5J	0,075	0,075	0,075	0,075	0,070	0,070	0,070	0,070	0,070	0,070	26,316%
	4A3-10J	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,145	0,145	0,145	0,140	0,140	22,222%
	4A5-15J	0,230	0,230	0,225	0,225	0,225	0,220	0,210	0,210	0,205	0,205	13,043%
	4A7-20J	0,480	0,480	0,475	0,475	0,475	0,470	0,465	0,460	0,455	0,455	18,919%
	4A9-25J	1,040	1,040	1,030	1,030	1,030	1,025	1,025	1,025	1,020	1,020	7,727%
	4A11-30J	1,290	1,290	1,285	1,285	1,285	1,280	1,280	1,275	1,275	1,270	7,971%
	5A1-10J	0,090	0,090	0,085	0,085	0,085	0,085	0,085	0,085	0,085	0,085	22,727%
	5A3-20J	0,205	0,205	0,200	0,200	0,200	0,195	0,195	0,195	0,195	0,195	13,636%
	5A5-25J	0,220	0,220	0,220	0,220	0,220	0,220	0,215	0,215	0,215	0,215	14,000%
	5A7-30J	0,295	0,295	0,295	0,295	0,295	0,290	0,290	0,290	0,290	0,290	16,176%
	5A9-35J	0,470	0,470	0,465	0,465	0,465	0,460	0,460	0,455	0,455	0,455	13,462%
	5A11-40J	0,675	0,675	0,675	0,675	0,670	0,660	0,660	0,650	0,650	0,650	11,111%
	9A1-10J	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000%
	9A3-20J	0,175	0,175	0,175	0,175	0,175	0,175	0,175	0,175	0,170	0,170	5,556%
	9A5-30J	0,275	0,275	0,275	0,275	0,275	0,275	0,275	0,275	0,275	0,275	3,509%
	9A7-40J	0,350	0,350	0,350	0,350	0,350	0,350	0,350	0,350	0,350	0,350	5,405%
	9A9-50J	0,525	0,525	0,525	0,525	0,525	0,525	0,520	0,520	0,520	0,520	5,455%
	9A11-60J	0,805	0,805	0,805	0,805	0,805	0,800	0,800	0,800	0,800	0,800	3,614%

6.2.4. Kalan kritik burkulma dayanım yüzdesinin incelenmesi

Tüm test numunelerinde beklenildiği be görüldüğü üzere, enerji artıkça kritik burkulma yükü de azalmıştır. Her bir test numunesinin kalan dayanımı yüzdesel olarak aşağıdaki formüle göre hesaplanmıştır.

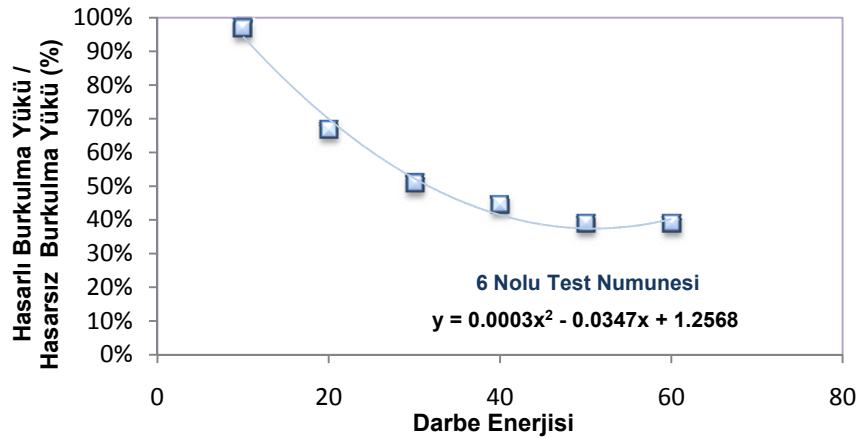
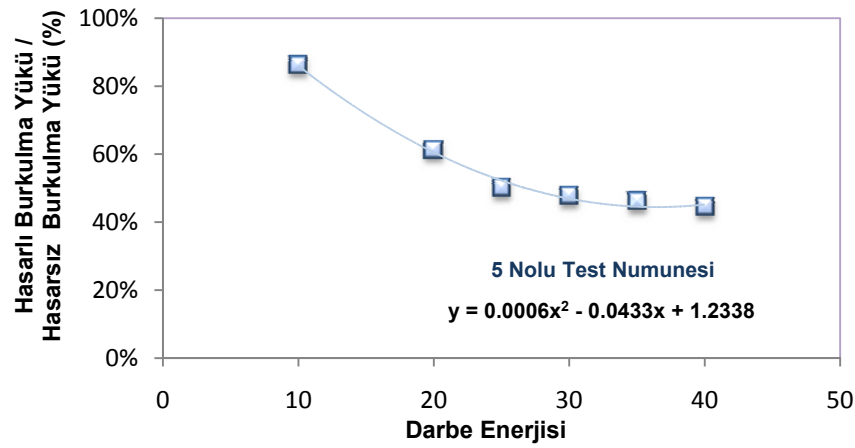
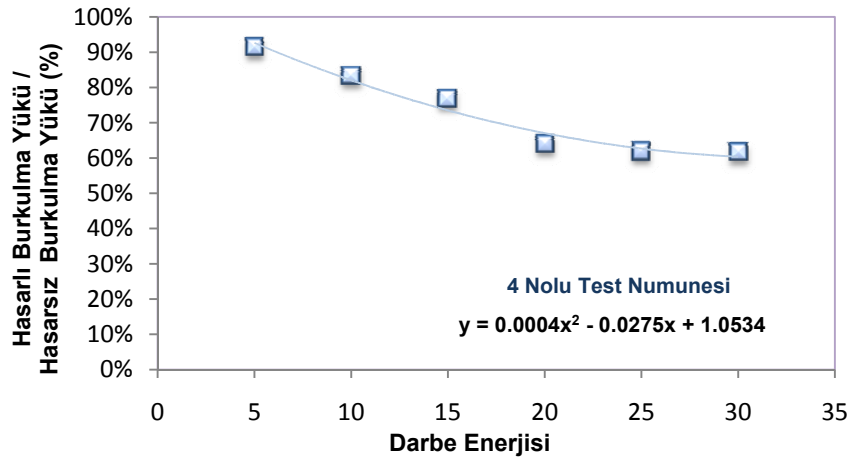
Kalan Burkulma Dayanım Yüzdesi (KBDY);

$$KBDY = \frac{\text{Hasarlı Test Numunesinin Kritik Burkulma Yüğü}}{\text{Hasarsız Test Numunesinin Kritik Burkulma Yüğü}} \times 100 \quad (6.1)$$

Hasarsız test numunelerin kritik burkulma yükleri Şekil 5.7’de verilmişti. Her bir test numunesine ait dayanım yüzdesi 6.1 formülüne göre hesaplanmış ve elde edilen verilerden ikinci derecede polinomik regresyon eğrileri oluşturulmuştur (Şekil 6.23). Bu eğrilerden yararlanılarak, ara enerji değerleri için kalan kritik burkulma yükü dayanım yüzdeleri bulunabilir.

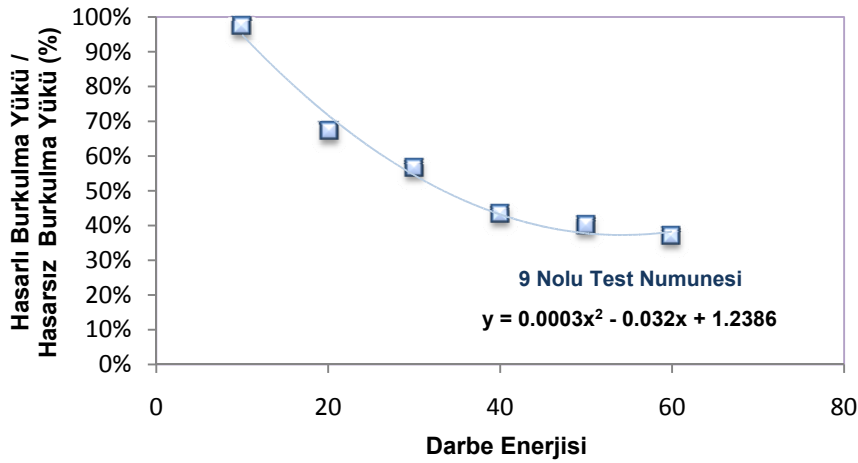
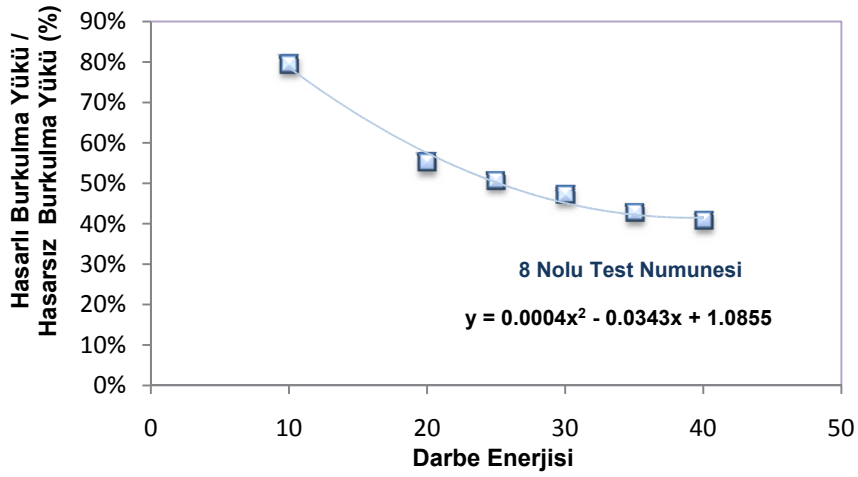
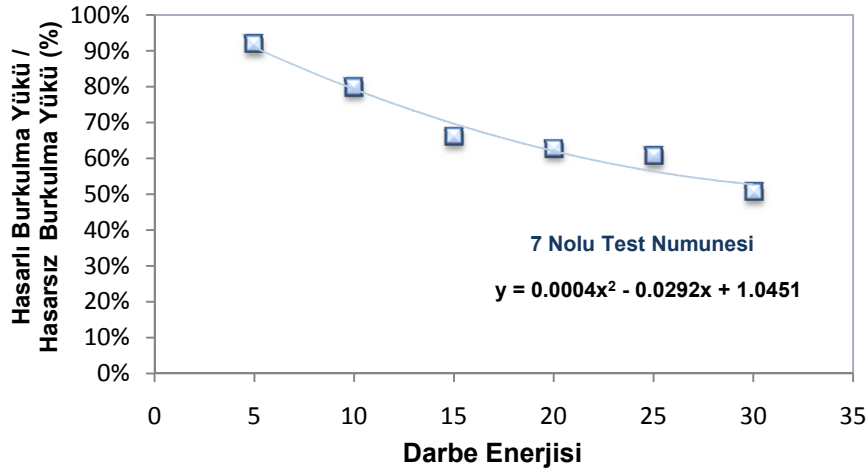
6, 9, 12 ve 14 numaralı 40 katlı plakalara bakıldığında 10J’da (tabaka ayrılması başlamamışken) kalan kritik burkulma dayanım yüzde değeri oldukça yüksek iken ilk hasar kuvvetinin olduğu 20J’da bu değer ani bir şekilde düştüğü gözlemlenmektedir.

Temas kuvvetinin kritik temas kuvveti yakaladığı enerji değerlerinde de kalan kritik burkulma dayanım yüzdelerinde ani bir düşüş gözlemlenmiştir. Sonuç olarak 20 katlı test numunelerinde 30 J’a kadar uygulanan darbe enerjisi sonucunda maksimum %43’lere, 29 katlı test numunelerinde 40J’a kadar uygulanan darbe enerjisini sonucunda %60’lara, 40 katlı test numunelerinde 60J’a kadar uygulanan darbe testleri sonucunda %69’lara varan burkulma dayanımlarında azalmalar tespit edilmiştir.



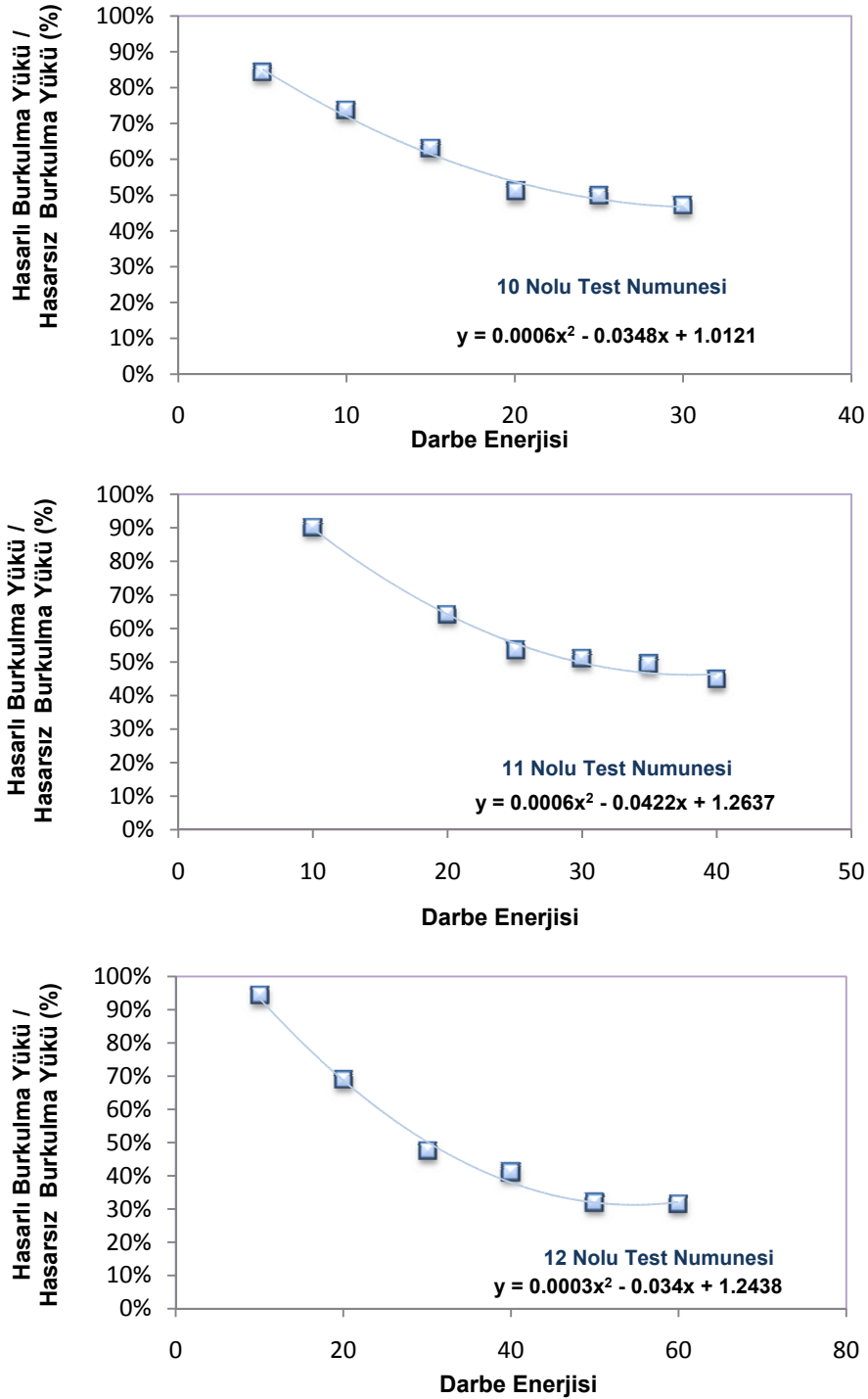
(a)

Şekil 6.23. (a) 50/40/10, (b) 60/30/10, (c) 40/40/20, (d) 25/59/25 oryantasyon yüzdesine sahip tek yönlü karbon tabakalı kompozit test numunelerinin darbe testi sonrası kalan kritik burkulma dayanım yüzdelерinin darbe enerjisi karşı grafikleri



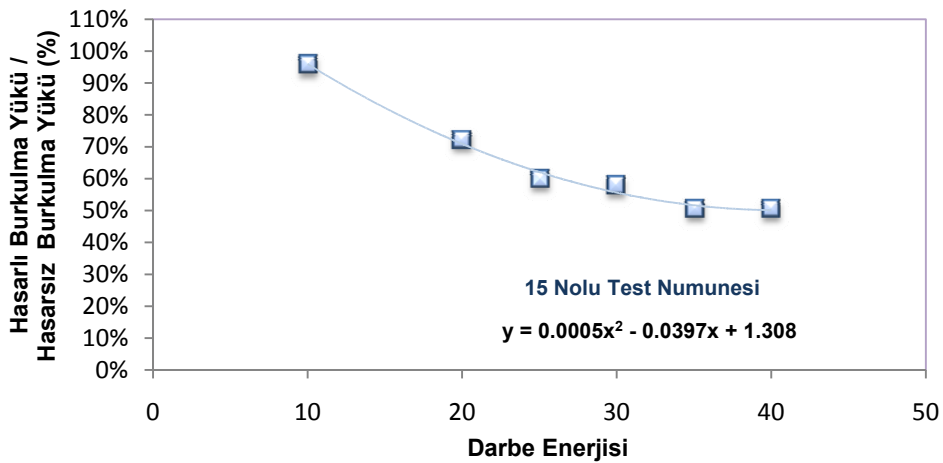
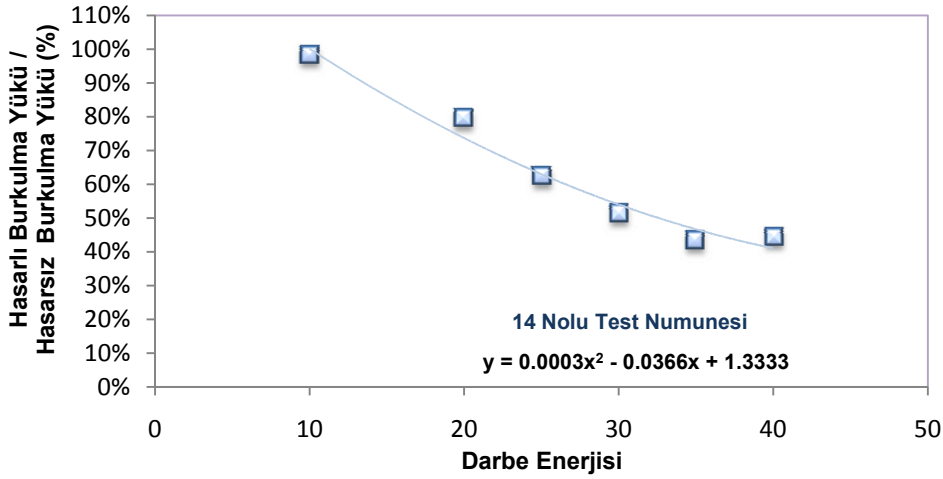
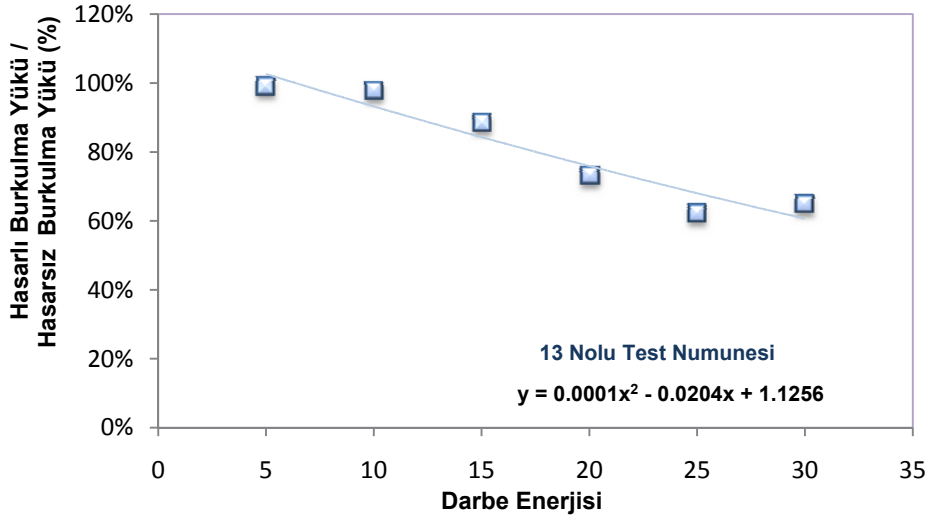
(b)

Şekil 6.23. (Devam) (a) 50/40/10, (b) 60/30/10, (c) 40/40/20, (d) 25/59/25 oryantasyon yüzdesine sahip tek yönlü karbon tabakalı kompozit test numunelerinin darbe testi sonrası kalan kritik burkulma dayanım yüzdelерinin darbe enerjisi karşı grafikleri



(c)

Şekil 6.23. (Devam) (a) 50/40/10, (b) 60/30/10, (c) 40/40/20, (d) 25/59/25 oryantasyon yüzdesine sahip tek yönlü karbon tabakalı kompozit test numunelerinin darbe testi sonrası kalan kritik burkulma dayanım yüzdelерinin darbe enerjisi karşı grafikleri



(d)

Şekil 6.23. (Devam) (a) 50/40/10, (b) 60/30/10, (c) 40/40/20, (d) 25/59/25 oryantasyon yüzdesine sahip tek yönlü karbon tabakalı kompozit test numunelerinin darbe testi sonrası kalan kritik burkulma dayanım yüzdelerinin darbe enerjisi karşı grafikleri

6.3. Numune kalınlığının etkisi

6.3.1. Ağırlık düşürme cihazından alınan dataların yorumlanması

Bu başlık altında tek yönlü karbon tabakalı kompozit levhaların kalınlık artışının darbe sonuçlarına etkisi incelenmiştir.

Şekil 6.24-Şekil 6.27 arasında “50/40/10” yüzdesine sahip “4”, “5” ve “6” numaralı sırasıyla 20, 29 ve 40 kat kalınlığındaki test numunelerinin, 10, 20 30J ve 40J darbe enerjisindeki temas kuvveti-enerji'nin temas süresine, temas kuvveti'nin yer değiştirmeye ve hızın temas süresine karşı grafikleri gösterilmiştir. Aynı oryantasyon yüzdesinde dizilmiş numunelerin farklı kalınlıkları grafikte üst üste koyularak kalınlık artışının etkileri ortaya konmuştur.

“4”, “5” ve “6” numaralı test numunelerindeki kalınlık değişiminin etkileri diğer farklı kalınlıktaki test numunelerindeki değişimlerle benzer özellik gösterdiği için sadece 50/40/10 oryantasyon yüzdesine sahip numunelerin ağırlık düşürme test cihazından alınan sonuçları grafiksel olarak sunulmuştur. Bu oryantasyon yüzdesinde 3 farklı kalınlıktaki test numunelerine uygulanan ortak enerjiler 10J, 20J ve 30J'dur. Ayrıca 5 (29 kat) ve 6 (40 kat) numaralı test numunelerinin 40J'da da ortak darbe enerjisi vardır.

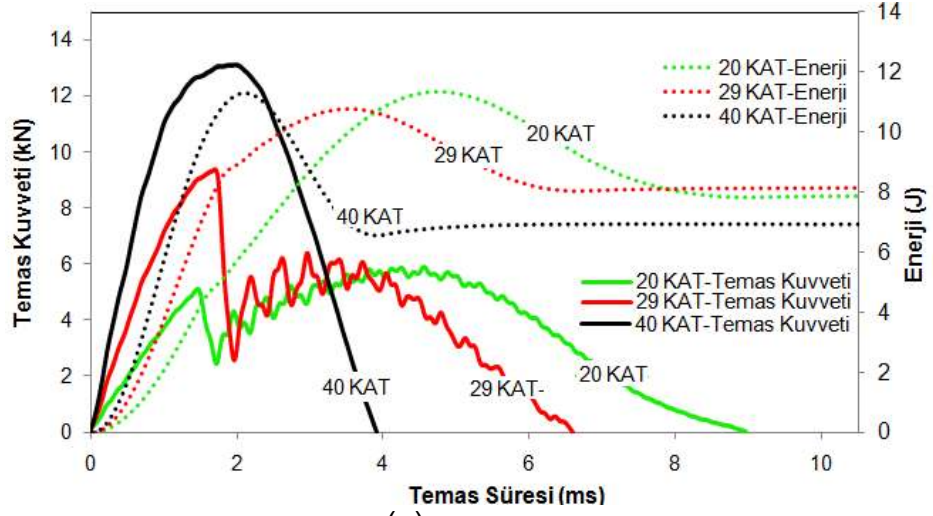
Açıkça görüldüğü ve beklenildiği üzere, en büyük temas kuvveti ve kritik temas kuvveti en kalın numunede oluşmuştur. Temas süresi, toplam yer değiştirme ve maksimum yer değiştirme miktarı ise temas kuvvetinin tersine kalınlık azaldıkça arttığı görülmektedir.

Şekil 6.24 (b)'de görüldüğü gibi, temas kuvvetinin artışı malzemenin eğilme rijitliği de artırmaktadır, bu nedenle ince numunelerin kalın numunelere göre daha fazla yer değiştirme görülmektedir.

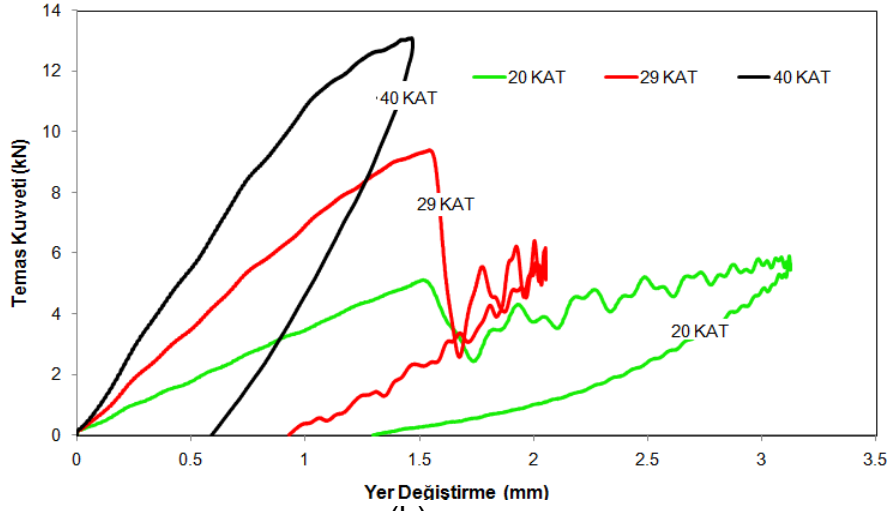
Şekil 6.24 (c) de hızın zaman karşı grafiği incelendiğinde, vurucunu sıfırlanma süresinin numunenin kalınlığı artıkça azaldığı görülmektedir. Bunun nedeni, kalın malzemelerde darbe sırasında maksimum yer değiştirme miktarının daha az olmasından dolayı olduğu söylenebilir.

Yutulan enerji genel olarak kalın numunede en az, ince numunede en fazla olmuştur. Yalnızca 10 J'luk enerjide 29 katlı numunede ki yutulan enerji miktarı 20 katlı numunedekine göre daha fazla çıkmıştır.

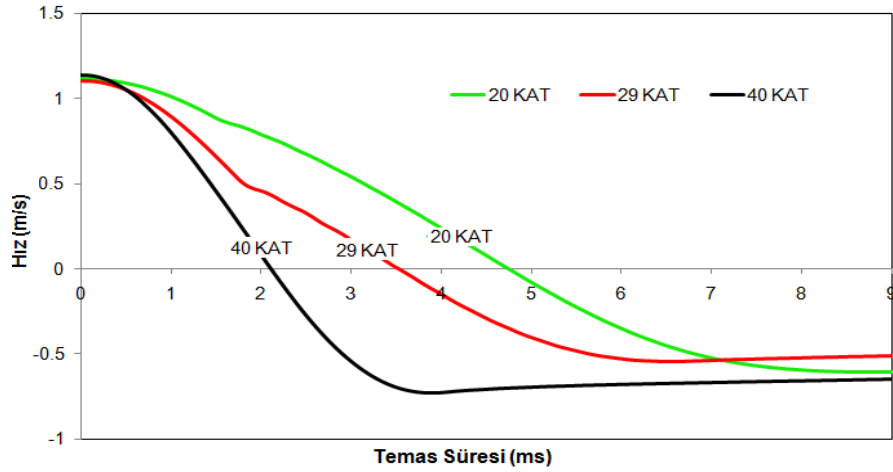
10'luk enerji'de 40 katlı numunede henüz hasar oluşumu başlamamışken (kritik kuvvetin oluşmaması), 29 ve 40 katlı numunelerde bariz şekilde kritik kuvvetler seçilmektedir. Ayrıca 30J'luk enerji seviyesinde 20 ve 29 katlı numunelerde temas kuvvetini kritik temas kuvvetini geçtiği görülürken, 40 katlı numunede henüz geçemediği gözlemlenmiştir.



(a)

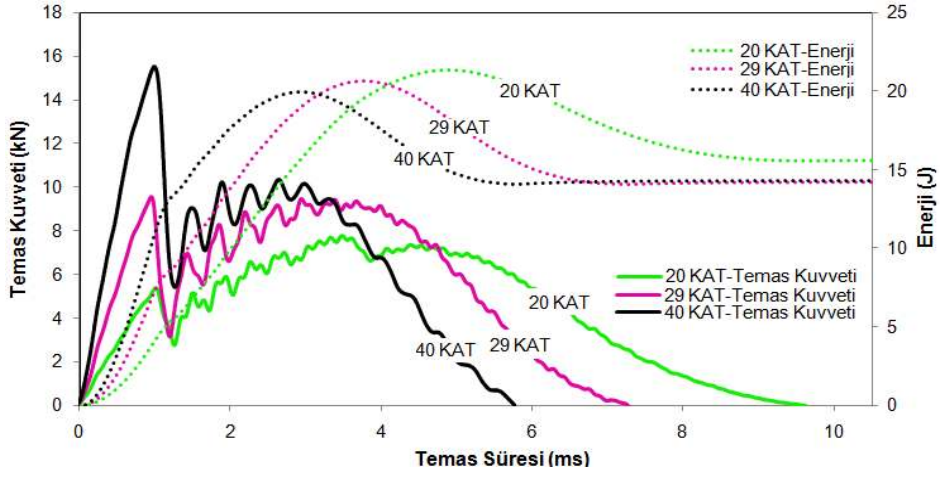


(b)

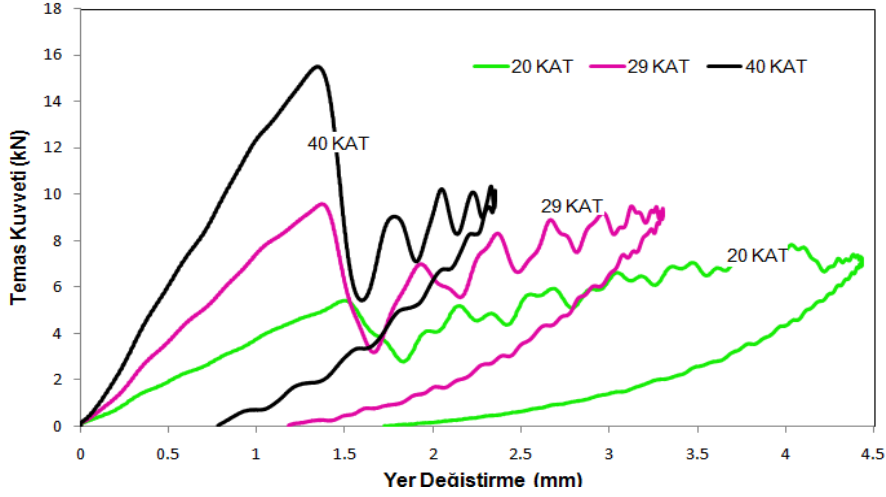


(c)

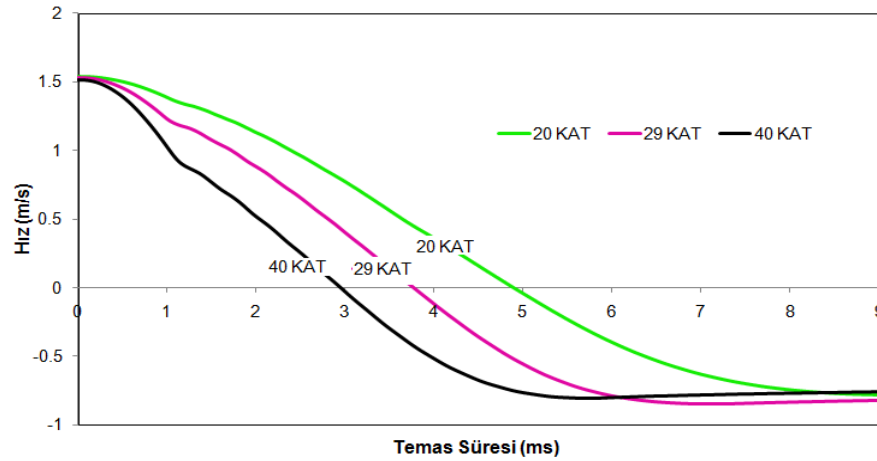
Şekil 6.24. (a) “50/40/10” yüzdesine sahip 20, 29 ve 40 kat kalınlığındaki tek yönlü karbon tabakalı kompozit levhaların 10J darbe enerjisi için (a) temas kuvveti & enerji / temas süresi, (b) temas kuvveti / yer değiştirme, (c) hız / temas süresi grafikleri



(a)

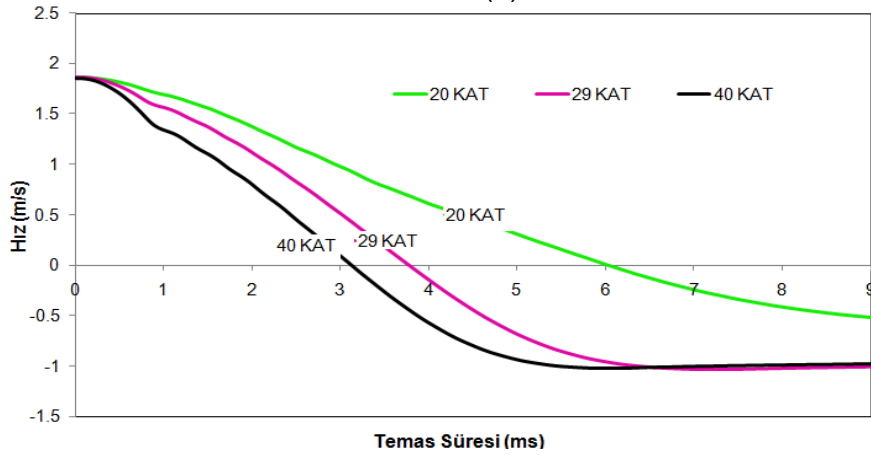
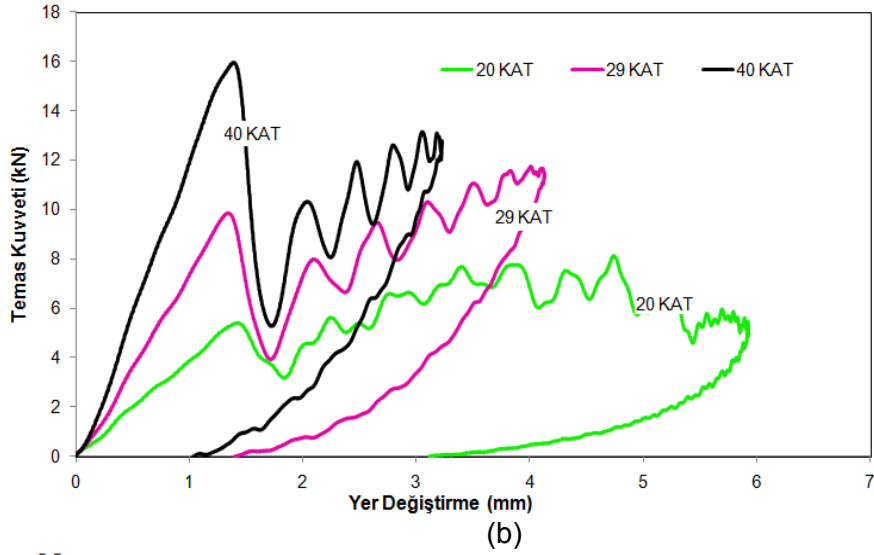
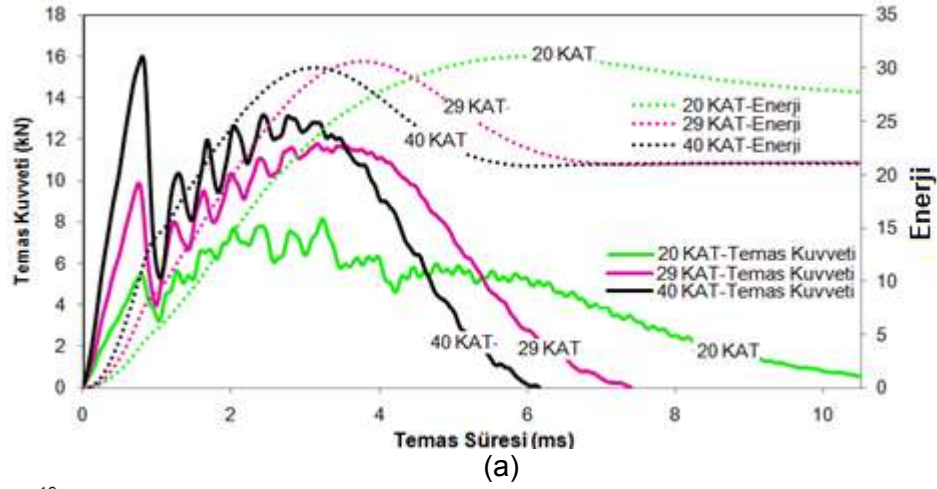


(b)



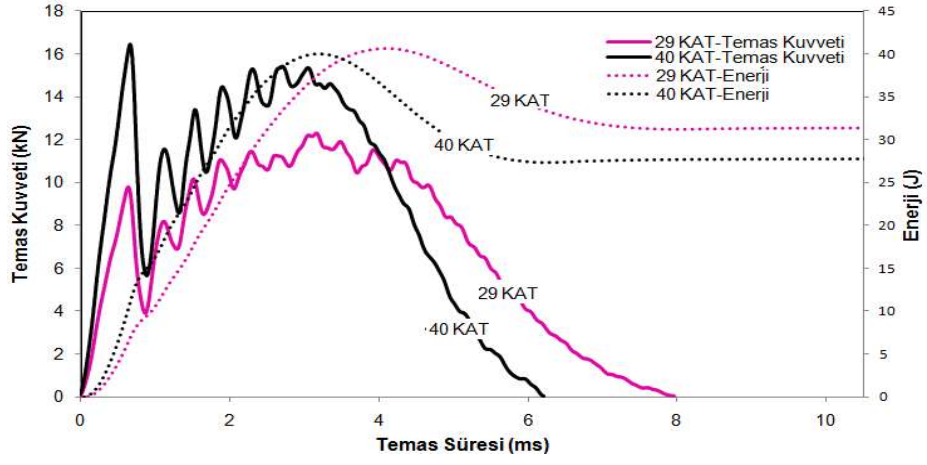
(c)

Şekil 6.25. (a) “50/40/10” yüzdesine sahip 20, 29 ve 40 kat kalınlığındaki tek yönlü karbon tabakalı kompozit levhaların 20J darbe enerjisi için (a) temas kuvveti & enerji / temas süresi, (b) temas kuvveti / yer değiştirme, (c) hız / temas süresi grafikleri

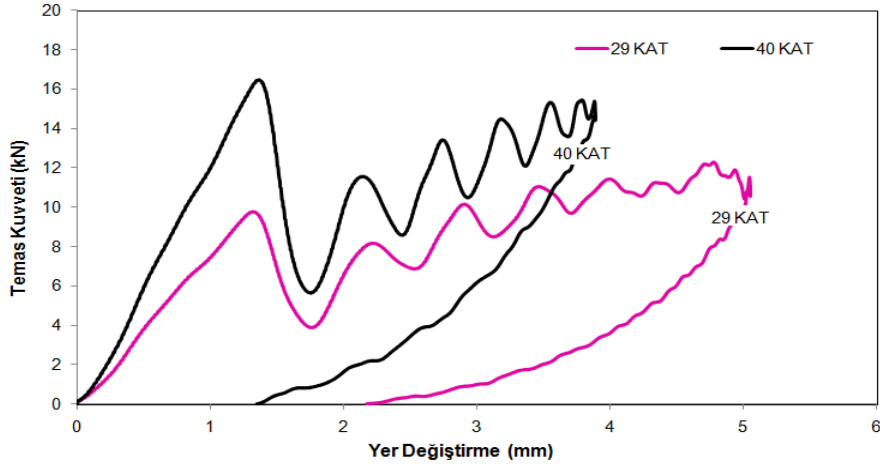


(c)

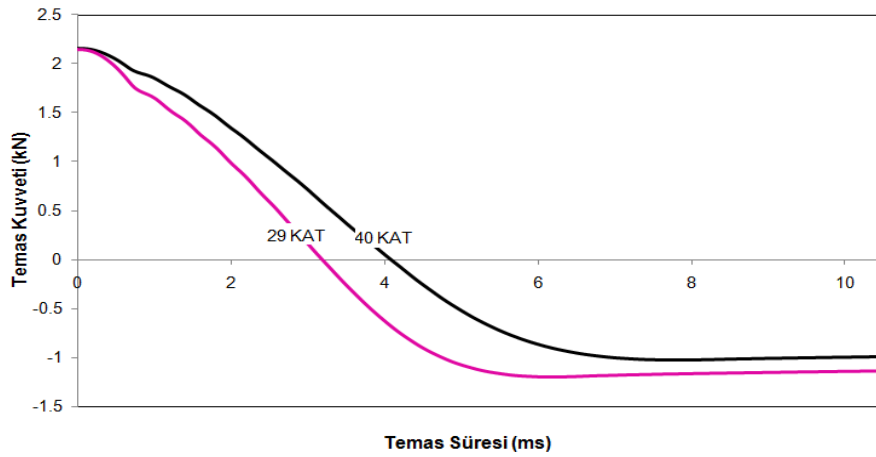
Şekil 6.26. (a) “50/40/10” yüzdesine sahip 20, 29 ve 40 kat kalınlığındaki tek yönlü karbon tabakalı kompozit levhaların 30J darbe enerjisi için (a) temas kuvveti & enerji / temas süresi, (b) temas kuvveti / yer değiştirme, (c) hız / temas süresi grafikleri



(a)



(b)



(c)

Şekil 6.27. (a) “50/40/10” yüzdesine sahip 29 ve 40 kat kalınlığındaki tek yönlü karbon tabakalı kompozit levhaların 40J darbe enerjisi için (a) temas kuvveti & enerji / temas süresi, (b) temas kuvveti / yer değiştirme, (c) hız / temas süresi grafikleri

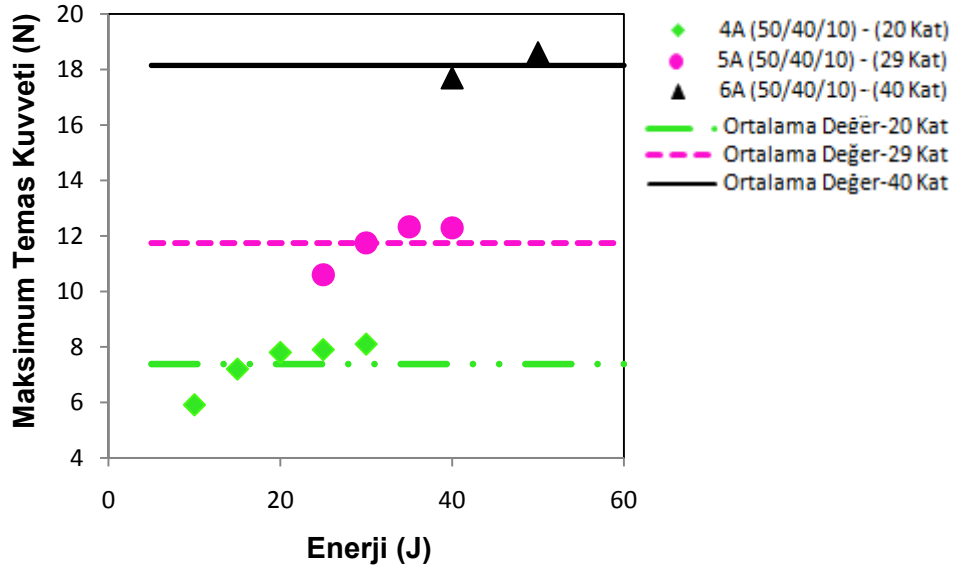
Kritik temas kuvvetinin ve maksimum temas kuvvetinin malzemeyi karakterize eden önemli parametreler olduğundan bahsedilmiştir. Bu bağlamda, oryantasyon yüzdesini bildiğimiz tek yönlü karbon tabakalı kompozit levhalarda, kat kalınlığına göre kritik temas kuvvetinin ve maksimum temas kuvvetinin bilinmesi tasarım ve analiz açısından faydalı olacağı düşünülerek, bu değerleri elde edebileceğimiz eğriler oluşturulmuştur.

“50/40/10” oryantasyon yüzdesine sahip 4, 5 ve 6 numaralı test numunelerinin 3 farklı kalınlıktaki kritik temas kuvvetlerinin darbe enerjisine karşı grafiği Şekil 6.28 (a)’da gösterilmiştir. Ağırlık düşürme test cihazından alınan datalara göre, her bir kalınlıkta değer ayrı bir sembol ile işaretlenmiştir. Her bir kalınlık için ortalama değerler elde edilmiş, bu değerler de grafiklerde görüldüğü kesikli ve düz çizgilerle işaretlenmiştir. Aynı metot ile maksimum temas kuvvetinin darbe enerjisine karşı grafiği Şekil 6.28 (b)’de verilmiştir.

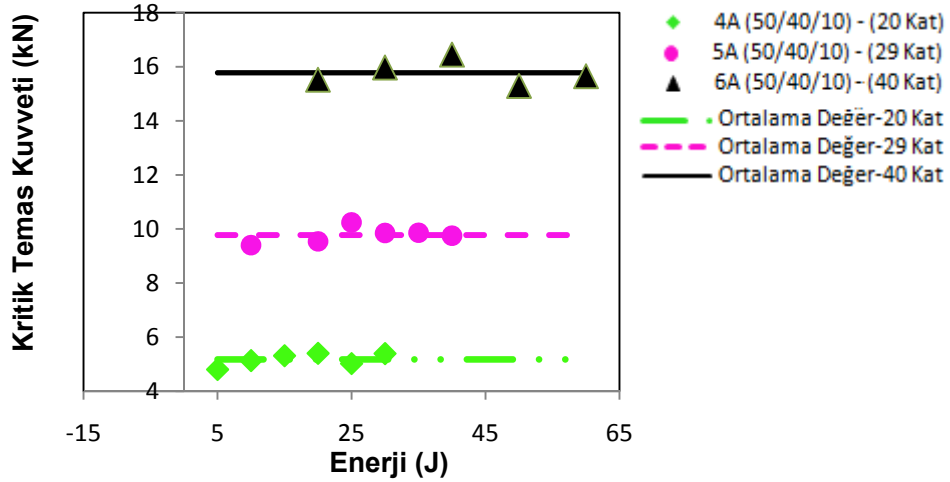
Maksimum temas kuvveti ve kritik temas kuvvetinin, enerji artışına rağmen düz bir çizgi etrafında gruplandığı görülmektedir. Bu durum daha öncede bahsedildiği ilk hasar kuvvetinin ve maksimum temas kuvvetinin (yani malzemenin yük taşıma kabiliyetinin) numunenin darbe enerjisine bağlı olmadığını göstermektedir

Diğer oryantasyon yüzdeleri (60/30/10, 40/40/20 ve 60/30/10)’inin de aynı metotla ortalama kritik temas kuvveti ve maksimum temas kuvvetleri hesaplanmış ve sonuç olarak, kritik temas kuvvetinin ve maksimum temas kuvvetinin numunenin kalınlığına bağlı değişimi Şekil 6.29’de verilmiştir. Elde edilen bağlantım (regression) eğrileri doğrusaldır ve Belingardi, ve R. Vadori’nin [56] elde ettiği eğrilerle uyum sağlamaktadır. Ancak, G. Belingardi, ve R. Vadori’nin bahsettiği gibi, bu eğriler Schoeppner and Abrate’nin [53] elde ettiği eğrilerle farklılık göstermektedir. Bu farklılığın nedenini, bu çalışmada seçilen levha kalınlık artışının küçük olmasıdır ki bundan dolayı zar (membrane) etkisi ilk hasar kuvvetinin oluşumunda baskın rol

oynamaktadır. Ancak Schoeppner ve Abrate çalışmalarındaki kalınlık artışının çok büyük değerlere kadar artırılmıştır. Bundan dolayı eğilme davranışı kritik temas kuvvetini etkilemekte ve doğrusal olmayan bir eğilim elde edilmektedir.

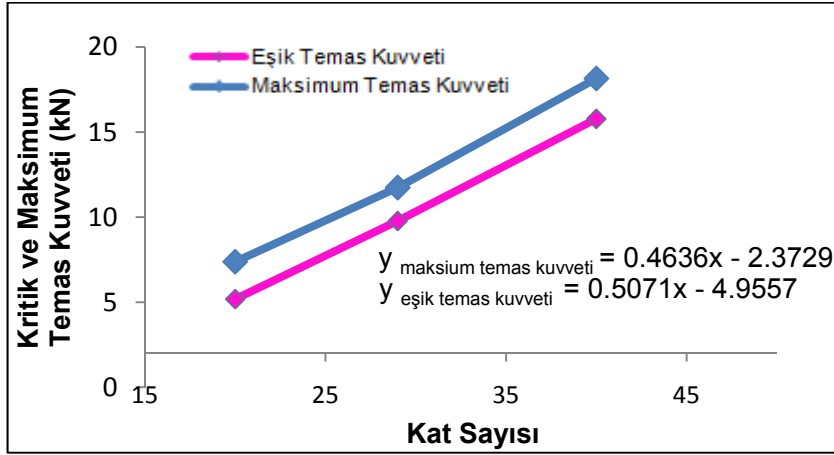


(a)

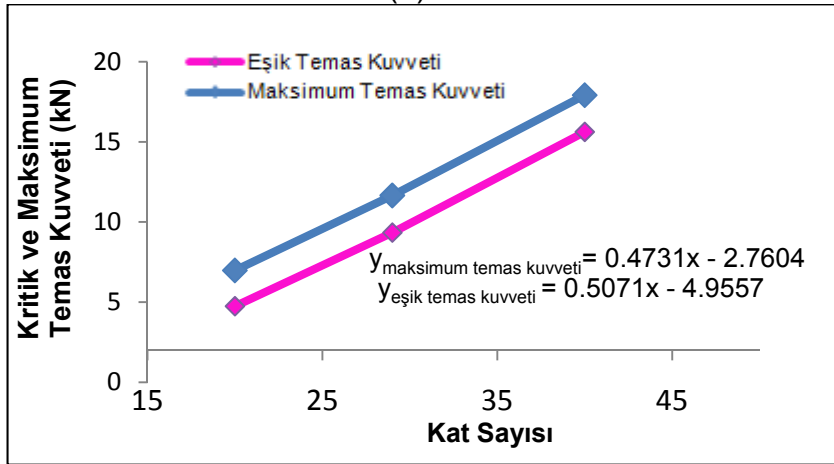


(b)

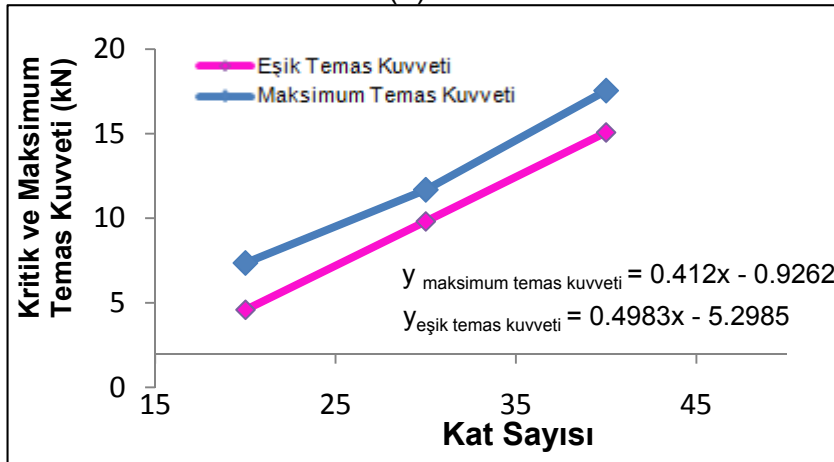
Şekil 6.28. “50/40/10” oryantasyon yüzdesine sahip 20, 29 ve 40 kat levhalarının (a) kritik temas kuvveti / darbe enerjisi (b) maksimum temas kuvveti / darbe enerjisi grafikleri



(a)

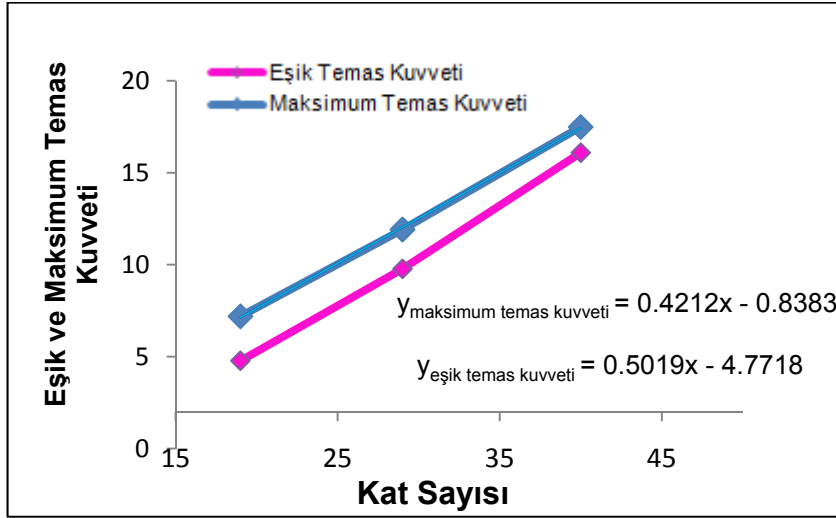


(b)



(c)

Şekil 6.29. (a) 50/40/10", (b) 60/30/10, (c) 40/40/20, (d) 25/50/25 oryantasyon yüzdelilerine sahip tek yönlü karbon tabakalı kompozit levhaların kritik ve maksimum temas kuvvetlerinin kat sayısına karşı grafikleri



(d)

Şekil 6.29. (Devam) (a) 50/40/10", (b) 60/30/10, (c) 40/40/20, (d) 25/50/25 oryantasyon yüzdelere sahip tek yönlü karbon tabakalı kompozit levhaların kritik ve maksimum temas kuvvetlerinin kat sayısına karşı grafikleri

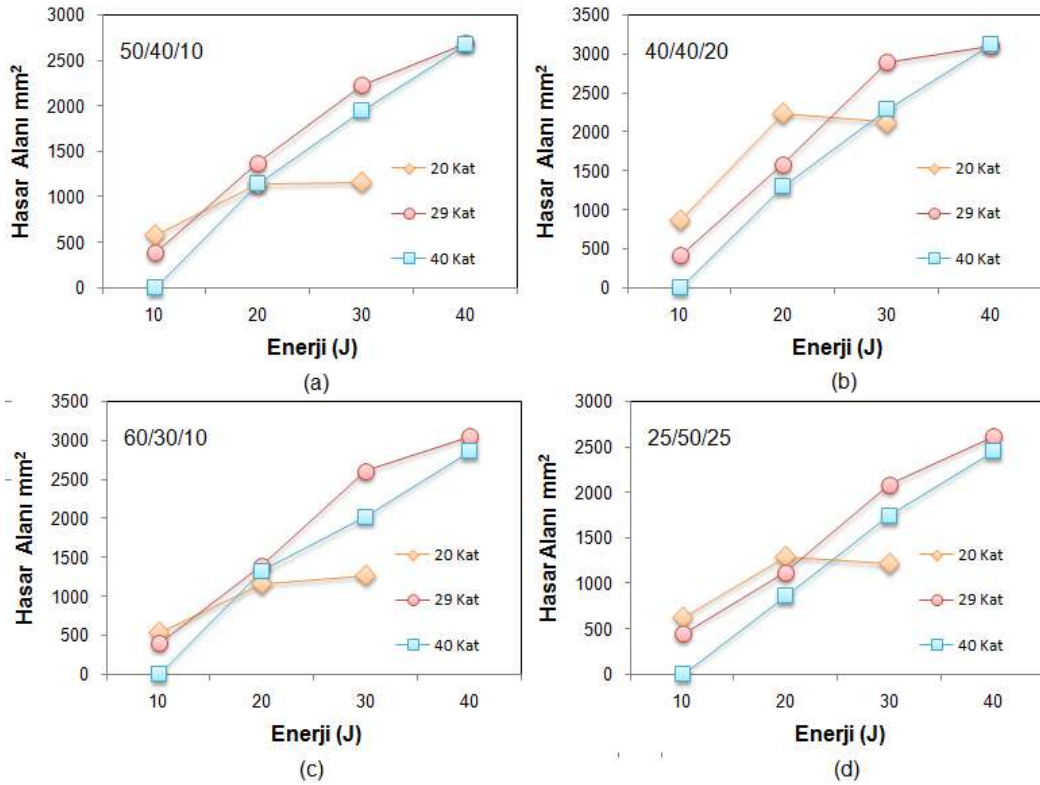
6.3.2. Ultrasonik C-scan muayenesi hasar alanlarının incelenmesi

Kalınlık artışına göre hasar alanını inceleyebilmek için

Şekil 6.30 (a) 50/40/10, (b) 25/50/25, (c) 60/30/10 ve (d) 40/40/20 oryantasyon yüzdesinde sahip 3 farklı kalınlıktaki tek yönlü karbon tabakalı kompozit levhaların hasar alanlarına karşı darbe enerji seviyeleri verilmiştir.

Düşük enerji seviyelerinde karşılaştırma yapıldığında (örneğin 10J) beklenildiği üzere hasar alanının en fazla ince numunede olduğu görülmektedir. Ancak enerji seviyesi arttıkça kalın numunelerde oluşan hasar alanının ince numunelere göre daha fazla olduğu görülmektedir. Bunun için gerekçe gibi tabakaların sayısının arttıkça, levha kalınlığının artması buna bağlı olarak da arka grup tabakaların (yükün uygulandığı bölgeden uzak olan kısım) kalınlığının da artmasıdır. Arka tabaka kalınlığı arttıkça, bu gruptaki gerinim enerjisi de (strain energy)'de artmaktadır. Bu enerji de tabaka ayrılmalarını oluşturmaktadır [57].

Bir kompozit plakanın rijitliği tabakanın kalınlığı ile orantılı olup, kalınlık da darbe esnasında oluşan maksimum temas kuvvetini artmaktadır. Düşük hızlı darbelerde plakalar genel itibariyle eğilmeye çalışırlar ve bu durum, plakanın alt tabakasında en büyük çeki gerilmeleri oluşturur. Delaminasyon miktarı farklıda lif yönlenme açılarına sahip tabakacıkların kalınlığının artması ile artmaktadır [45].

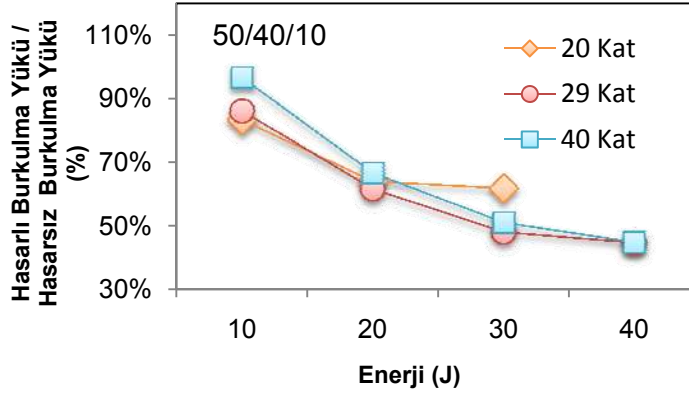


Şekil 6.30. (a) Hasar alanın kalınlık artışının göre incelenmesi, (a) 50/40/10, (b) 60/30/10, (c) 40/40/20, (d) 25/50/25 otyantasyon yüzdesine sahip test numuneleri

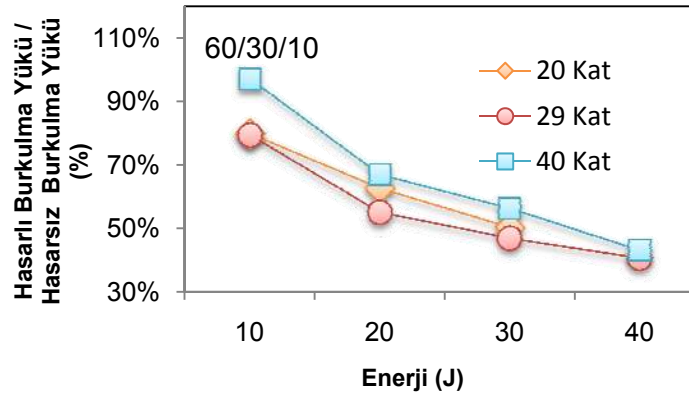
6.3.3. Kalan kritik burkulma dayanım yüzdesinin incelenmesi

Kalınlık artışına göre hasar alanını inceleyebilmek için Şekil 6.31'de (a) 50/40/10, (b) 25/50/25, (c) 60/30/10 ve (d) 40/40/20 oryantasyon yüzdesinde sahip 3 farklı kalınlıktaki tek yönlü karbon tabakalı kompozit levhaların kalan kritik burkulma dayanım yüzdeleri verilmiştir. Bu sonuçlar hasar alanlarıyla

uyumludur. Düşük enerji seviyelerinde (10J) en büyük dayanım yüzdesi en kalın numunede (40 katlı) görülmektedir. Ancak 19 ve 20 katlı test numunelerine göre daha kalın olan test numunelerinde (29 ve 40 katlı) enerji seviyesi artıka, daha fazla hasar oluğu için kalan kritik burkulma dayanımlarının da hızla azaldığı görülmektedir. Çoğunlukla 40J'da kalan kritik burkulma dayanım yüzdesi en az 40 katlı numunede görülmektedir. 30 J'da ise kalan kritik burkulma dayanım yüzdesi en fazla en ince test numunelerinde (19 ve 20 katlı) görülmüştür. Kalın malzemelerin dayanımı, ince malzemelere göre ne kadar yüksek olsa da dayanımları darbe enerjisine karşı hızla azalmaktadır ve belli bir enerji seviyesinde sonra kendisinden daha ince bir numuneye göre daha dayanımlı olmadığı görülmektedir.

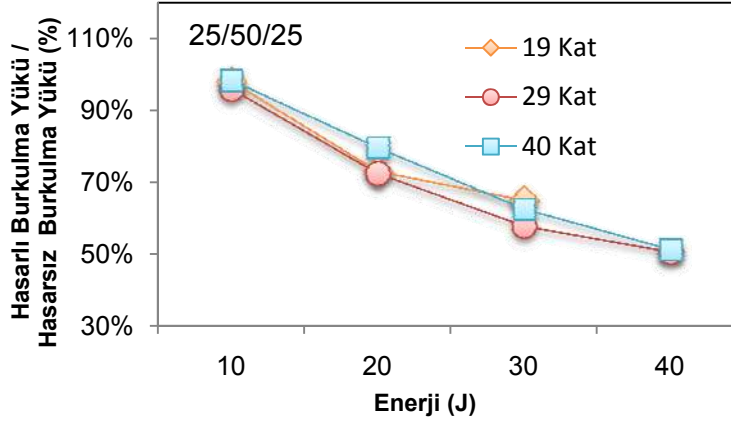
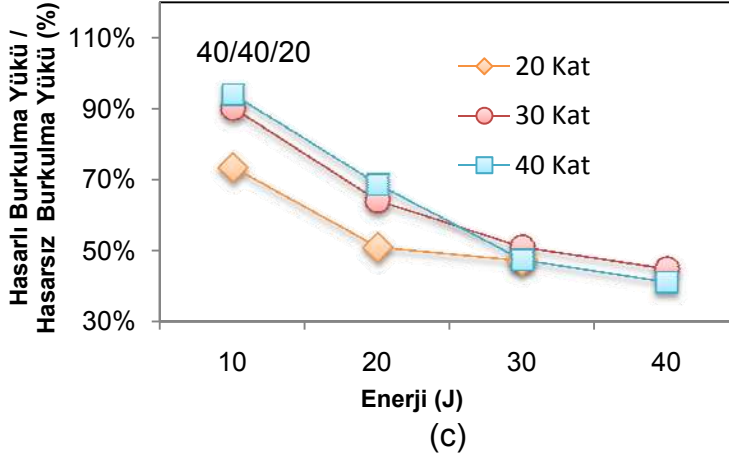


(a)



(b)

Şekil 6.31. (a) Kalan kritik burkulma dayanım yüzdesinin kalınlık artışına göre incelenmesi, (a) 50/40/10, (b) 60/30/10, (c) 40/40/20, (d) 25/50/25 oryantasyon yüzdesine sahip test numuneleri



Şekil 6.31. (Devam) (a) Kalan burkulma dayanım yüzdesinin kalınlık artışının göre incelenmesi, (a) 50/40/10, (b) 60/30/10, (c) 40/40/20, (d) 25/50/25 oryantasyon yüzdesine sahip test numuneleri

6.4. Oryantasyon Yüzdesinin Etkisi

6.4.1. Ağırlık düşürme cihazından alınan dataların yorumlanması

Bu bölümde aynı kalınlıktaki farklı oryantasyon yüzdelilerindeki karbon tabakalı kompozit levhaların darbe davranışı incelenmiştir.

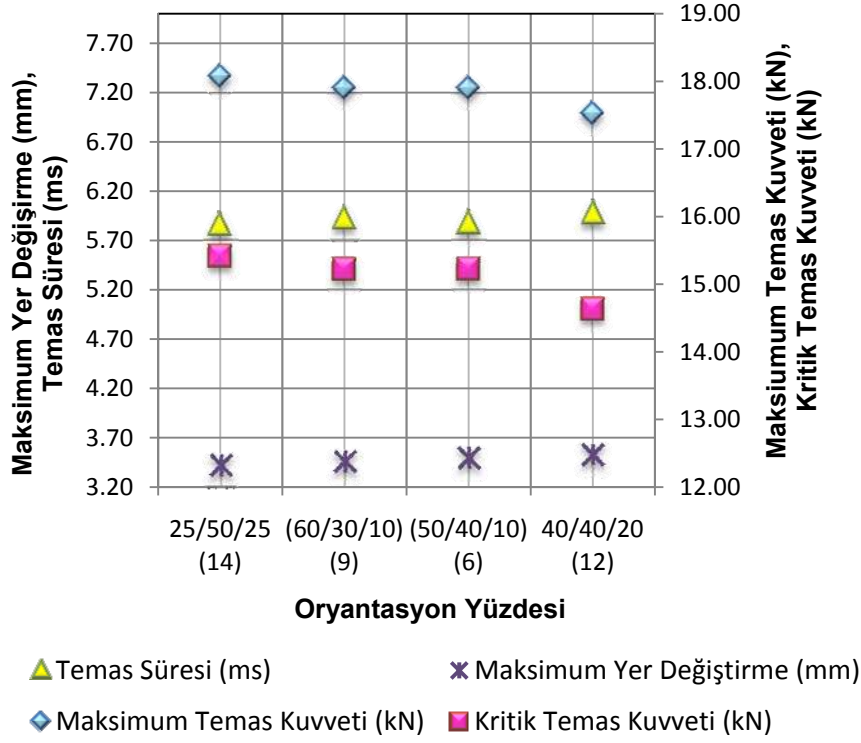
4 farklı oryantasyon yüzdesinde (50/40/10, 60/30/10, 40/40/20 ve 25/50/25) tasarlanmış ve üretilmiş 40 katlı tek yönlü karbon tabakalı kompozit

levhaların 10, 20, 30, 40, 50 ve 60J'deki darbe enerjileri sonucu elde edilen kritik temas kuvveti, maksimum temas kuvveti, maksimum yer değıştirme ve vurucunun temas süresi ortalamaları alınmış ve grafiksel olarak Şekil 6.32'de verilmiştir

Tüm levhalar aynı boyutlarda ve kat sayısında olup tamamen aynı şartlarda üretilmiştir. Şekil 6.32'den, 4 farklı oryantasyon yüzdesine sahip, aynı kalınlıktaki bu malzemelerin darbeye karşı davranışları farklı olduğu görölmektedir. 25/50/25 oryantasyon yüzdeli numunenin en büyük temas kuvvetine, 40/40/20 oryantasyon yüzdeli numunenin en küçük temas kuvvetine sahip olduğu görölmektedir. 60/30/10 ve 50/40/10 oryantasyon yüzdeli numunelerin maksimum temas kuvvetleri yaklaşık aynı değerlerde çıkmıştır. Kritik kuvvetindeki sıralamanın da, maksimum temas kuvvetinde ki sıralama ile aynı olduğu görölmektedir.

En büyük temas kuvvetine sahip 25/50/25 oryantasyon yüzdeli numunenin en küçük maksimum yer değıştirmeye, en küçük temas kuvvetine sahip 40/40/20 oryantasyon yüzdeli numunenin en büyük maksimum yer değıştirmeye sahip olduğu görölmektedir. Bu durum en büyük temas kuvvetine sahip numunenin deformasyona karşı en dayanıklı olduğunu ve vurucu altında en az maksimum yer değıştirmeye sahip olduğu göstermektedir [11].

Temas süresi, darbe süresi boyunca olan enerji transferini belirten süredir. Temas kuvvetinin tersine, temas süresi en büyük 40/40/20 oryantasyon yüzdesinde, en küçük 25/50/25 oryantasyon yüzdesinde oluşmuştur. Bu durum en fazla hasarın 40/40/20 oryantasyon yüzdeli numunede olduğunu göstermektedir, hasar fazla ise temas süresi de artmaktadır.



Şekil 6.32. 50/40/10, 60/30/10, 40/40/20, 25/50/25 oryantasyon yüzdesine sahip 40 katlı test numunelerinin ağırlık düşürme test sonuçlarının karşılaştırılması

6.4.2. Kalan burkulma dayanım yüzdesinin incelenmesi

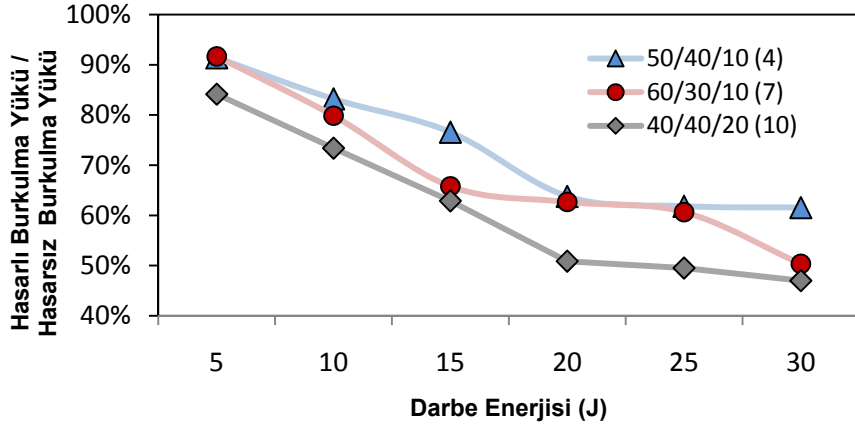
Farklı oryantasyon yüzdelere sahip aynı kalınlıktaki numunelerin darbe testi sonrasında gerçekleştirilen burkulma testinden elde edilen kalan burkulma dayanım yüzdelерinin karşılaştırılması Şekil 6.33’de verilmiştir. Her bir oryantasyon yüzdesine sahip numunesinin kritik burkulma yükü farklı olacağı için, kalan kritik burkulma yüzdelерini karşılaştırmanın uygun olduğu düşünülmüştür. Kalan kritik burkulma dayanım yüzdesi büyükten küçüğe doğru “25/50/25”, “50/40/10” “60/30/10”, “40/40/20” oryantasyon yüzdeli numuneler olarak sıralanmıştır. Hasarlı olup basma yükü altında en yüksek kalan burkulma dayanıma sahip numune olan “25/50/25” oryantasyon yüzdeli test numunesidir. Bu numune diğer oryantasyon yüzdesindeki numunelere göre daha fazla sayıda 45⁰ derecelik katmana sahiptir.

En düşük kalan burkulma dayanımına sahip numune “40/40/20” oryantasyon yüzdesidir. “50/40/10” ve “60/30/10” oryantasyon yüzdeli test numuneleri çok yaklaşık sonuçlar vermiştir. Ancak sıralamada “50/40/10” oryantasyon yüzdeli numunesinin büyüklük sırasında 2. sırayı aldığını, “60/30/10” oryantasyon yüzdesinin ise 3. sırayı aldığını söyleyebiliriz.

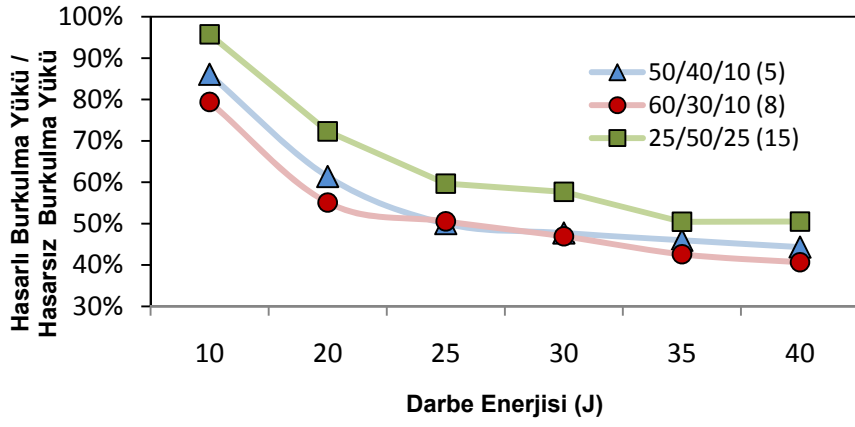
En küçük oryantasyon yüzdesine sahip olması beklenen numune “60/30/10” oryantasyon yüzdeli numunedir (en az 45^0 açılı katmana sahip). Ancak “40/40/20” oryantasyon yüzdeli numunenin bu numuneden daha küçük kalan kritik burkulma dayanımına sahip olması, birde burkulma testinin göz önünde bulundurulması gerektiğini göstermektedir 5.4. bölümde hasarsız numunelerde 0^0 dereceli katmanların kritik burkulma yükünü arttırdığı gözlemlenmişti. Bu bölümde 45^0 açılı katmanların numunedeki hasarın yayılmasını önleyerek yine kritik burkulma yükünü arttırdığı söyleyebiliriz.

Buna göre “40/40/20” oryantasyon yüzdesine sahip numunenin “60/30/10” oryantasyon yüzdesine sahip numuneye göre daha fazla 45^0 derecelik katmanı olmasına rağmen, 0^0 dereceli katman sayısı oldukça azdır. Bu yüzden kalan burkulma dayanımındaki büyüklük sırasında 3. sırayı “60/30/10” , 4. sırayı ise 40/40/20 oryantasyon yüzdeli numune almıştır.

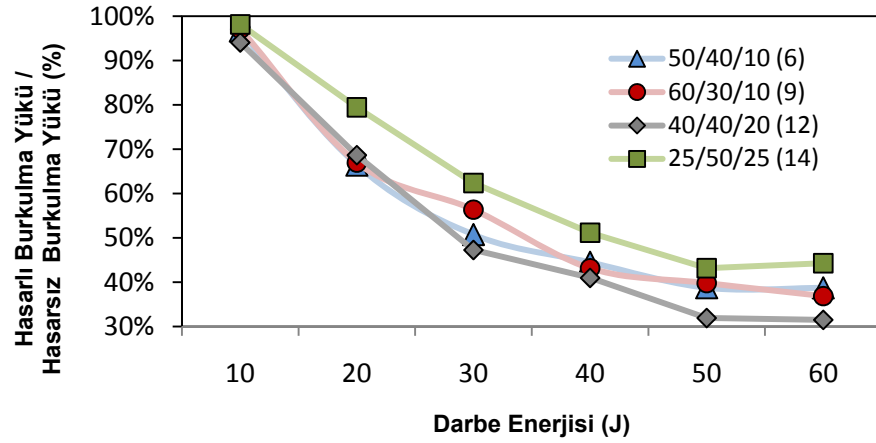
Sonuç olarak elde edilen bu datalardan 45^0 dereceli açılı katmanların, hasar oluşumunda baskın bir özellik gösterdiği görülmektedir. Fazla sayıda 45^0 dereceli katmanlara sahip numunelerin darbe yükü altında hasarın yayılmasını önlediğini ve buna bağlı olarak da kalan burkulma dayanımının da arttırdığı söylenebilir



(a)



(b)



(c)

Şekil 6.33. (a) 20 katlı “50/40/10”, “60/30/10” ve “40/40/20” (b) 29 katlı “50/40/10”, “60/30/10” ve “25/50/25”, (c) 40 katlı “50/40/10”, “60/30/10”, “40/40/20” ve “25/50/25” oryantasyon yüzdelerindeki test numunelerinin kalan burkulma dayanım yüzdelerinin karşılaştırılması

6.5. Vurucu Kütle Etkisi

6.5.1. Ağırlık düşürme cihazından alınan dataların yorumlanması

Bu bölümde, tek yönlü karbon tabakalı kompozit levhalar üzerinde, farklı kütlelerin oluşturduğu aynı seviyedeki darbe enerjisinin etkileri incelenmiştir.

Ağır ve yavaş düşen bir kütlenin mi yoksa hafif ve hızlı düşen bir kütlenin mi daha çok hasar oluşturabildiği ve levhanın burkulma dayanımına etkisi irdelenmiştir. Çizelge 6.2’de kullanılan test numuneleri, darbe için seçilen vurucu kütleler ve hızları verilmiştir. Bu setler I, II, III ve IV olacak şekilde numaralandırılmıştır. I numaralı sete en hafif ancak en hızlı vurucu ile darbe uygulanırken, IV numaralı sete en ağır ancak en yavaş vurucu ile darbe uygulanmıştır. Tüm testlerdeki darbe enerji seviyesi sabit olup 10J’dur.

Sabit darbe enerjisini ayarlayabilmek için “7,45”, “17,12”, “22,95” ve “25,87” kg’lık 4 farklı vurucu kütlesi kullanılmıştır. İstenen hız, vurucunun yüksekliği ayarlanarak elde edilmiştir. Seçilen kütle aralığı cihazın çalışma prensiplerine uygundur. Değişik kütleler ile elde edilen darbe enerjilerinde ± 0.2 J’luk farklılığa izin verilmiştir.

“15” Numaralı test numunesine ait 4 farklı vurucu kütlenin oluşturduğu sabit 10J’luk darbe enerjisine ait (a) temas kuvveti / temas süresi, (b) yer değiştirme / temas süresi, (c) hız / temas süresi, (d) temas kuvveti / yer değiştirme, (e) hız / yer değiştirme, (f) darbe enerjisi / temas süresi grafikleri verilmiştir.

Bu grafiklerden, test numunesinin farklı kütleler ile uygulanan aynı darbe enerjisi seviyesindeki davranışının farklı olduğu açıkça görülmektedir. Grafik üzerinde, kolay okunması açısından kütleler yuvarlatılarak, kusuratsız olarak yazılmıştır.

Aynı enerji seviyesinde ki artan kütlenin etkisi, aşağı verilen darbe parametreleri açısından incelenmiş ve 4 set için Şekil 6.4’de özetlenmiştir.

- ✚ Kritik temas kuvveti
- ✚ Temas süresi
- ✚ Maksimum yer değiştirme
- ✚ Yutulan enerji

Maksimum kuvvetinin incelenmemesinin nedeni, bu test numunesinin bu enerji seviyesinde, maksimum kuvvetin kritik temas kuvvetini aşamamış olmasındandır.

Çizelge 6.2. Farklı kütleler ile yapılan darbe test parametreleri

Numune Adı	Test Enerjisi (J)	Vurucu Kütle (kg)	Vurucu Hızı (m/s)
15 (I.SET)	10	7,45	1,63
15 (II.SET)		17,35	1,08
15 (III.SET)		21,95	0,95
15 (IV.SET)		25,87	0,87

Çizelge 6.3. “5A” Numaralı test numunesinin farklı kütleler ile oluşturulan aynı darbe enerjisi seviyesindeki davranışı

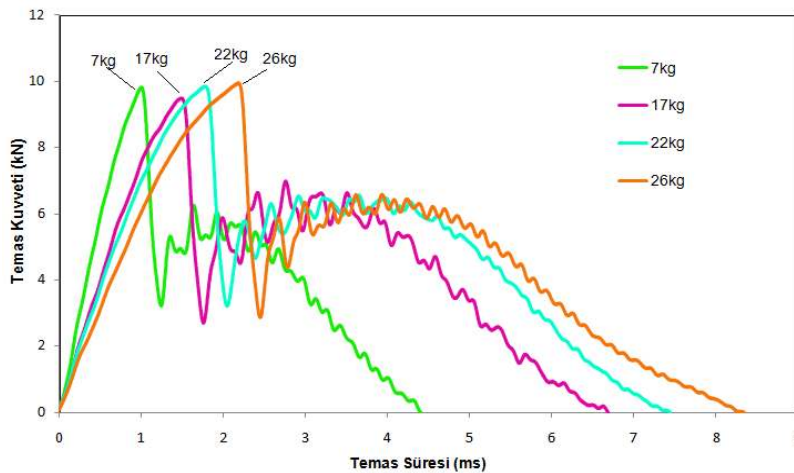
Numune Adı	Test Enerjisi (J)	Kritik Temas Kuvveti (kN)	Temas Süresi (ms)	Yutulan Enerji (J)	Maksimum Yer Değiştirme (mm)
15-I. SET	10	9,83	4,39	7,6	1,92
15-II. SET		9,85	6,68	7,9	2,06
15-III. SET		9,87	7,44	8,1	2,05
15-IV. SET		9,97	8,33	9,1	2,16

Kritik temas kuvvetinin I. set (hafif kütle, yüksek hız) için en düşük, IV. set (ağır kütle, düşük hız) için en büyük değere ulaştığı görülmüştür. Kritik temas kuvveti, II. ve III. setler için ise I. ve IV. setin arasında çıkmıştır. Bu durum,

test numunesinin ağır kütlede gösterdiği direncin fazla olduğu göstermektedir [11].

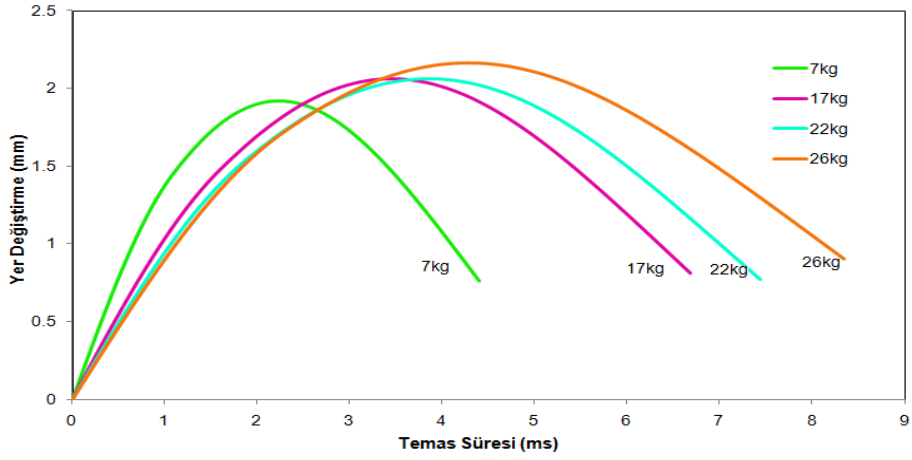
Maksimum yer değiştirmenin I. set için en küçük değerde, IV. set için en büyük değerde olduğu görülmektedir. Bu durum ağır kütle altında oluşturulan darbenin, hafif kütle ile oluşturulana göre daha fazla yer değiştirmeye yol açtığını göstermektedir. Yutulan enerji miktarları vurucu kütle ağırlaştıkça arttığı gözlemlenmiştir. Yani kütle ağırlaştıkça, test numunesi tarafından yutulan enerji miktarı artmaktadır, bu durum ağır kütlenin hafif kütleye göre daha fazla hasar oluşturduğunu göstermektedir.

Temas süresi, I. set için en küçük, IV. set için en büyük değeri almıştır. Temas süresinin artışı, I. set’de hızın yüksek, IV. sette hızın düşük olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca hız-zaman grafiğinden görüleceği üzere, darbe sonunda hızın sıfır’a yaklaşması en fazla IV. nolu sette, en az I. nolu sette görülmüştür. Kütle artışı, numuneyi nüfuziyete yakınlaştırmıştır.

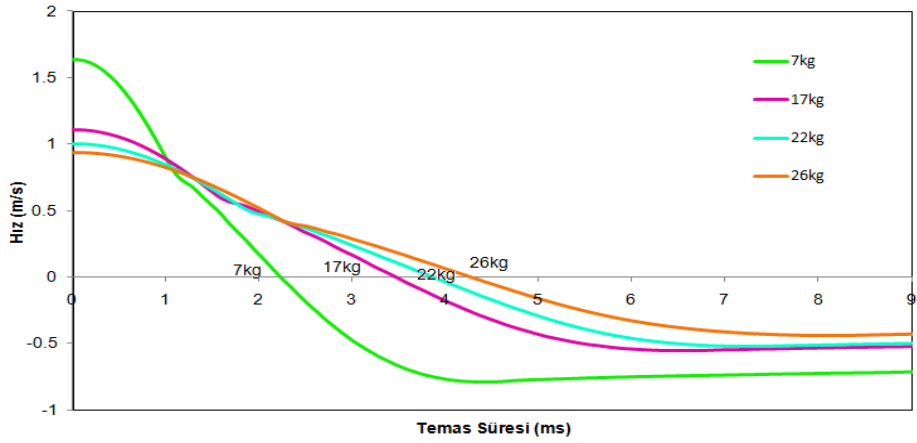


(a)

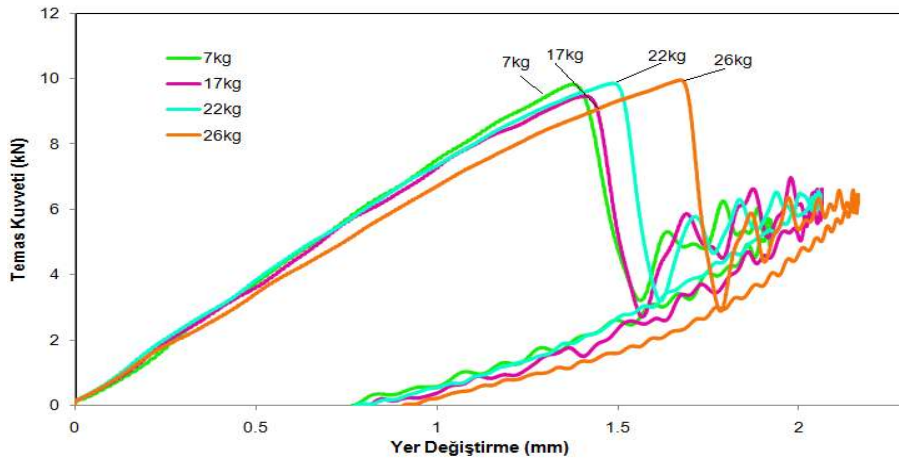
Şekil 6.34. “15” Numaralı test numunesine ait 4 farklı vurucu kütleinin oluşturduğu sabit 10J’luk darbe enerjisine ait (a) temas kuvveti / temas süresi, (b) yer değiştirme / temas süresi, (c) hız / temas süresi, (d) temas kuvveti / yer değiştirme, (e) hız / yer değiştirme, (f) darbe enerjisi / temas süresi grafikleri



(b)

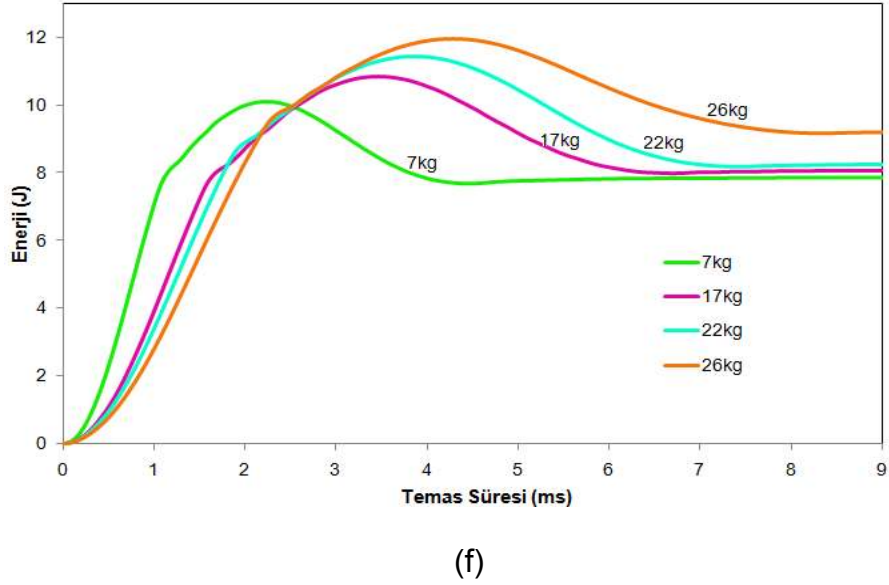
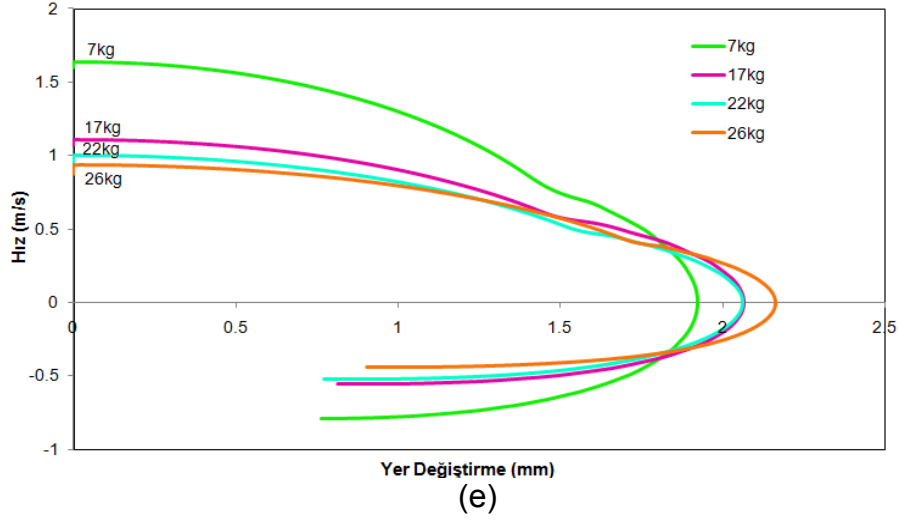


(c)



(d)

Şekil 6.34. (Devam) “15” Numaralı test numunesine ait 4 farklı vurucu kütleinin oluşturduğu sabit 10J’luk darbe enerjisine ait (a) temas kuvveti / temas süresi, (b) yer değiştirme / temas süresi, (c) hız / temas süresi, (d) temas kuvveti / yer değiştirme, (e) hız / yer değiştirme, (f) darbe enerjisi / temas süresi grafikleri



Şekil 6.34. (Devam) “15” Numaralı test numunesine ait 4 farklı vurucu kütlelerin oluşturduğu sabit 10J’luk darbe enerjisine ait (a) temas kuvveti / temas süresi, (b) yer değiştirme / temas süresi, (c) hız / temas süresi, (d) temas kuvveti / yer değiştirme, (e) hız / yer değiştirme, (f) darbe enerjisi / temas süresi grafikleri

6.5.2. Çentik derinliklerinin karşılaştırılması

Çentik derinliklerini Çizelge 6.4’da verilmiştir. Elde edilen sonuca göre, ağır kütleli ve düşük hızlı IV. sette oluşan çentik derinliği en fazla, hafif kütle yüksek hız ile oluşturan I. sette en küçük çentik derinliği görülmüştür. Vurucu

kütlenin artışı, numunenin üst yüzeyinde daha derin ve belirgin hasarlar oluşturmaktadır.

Çizelge 6.4. Farklı kütleler ile oluşturulan aynı darbe enerjisi seviyesi sonrasında ölçülen çentik derinlikler

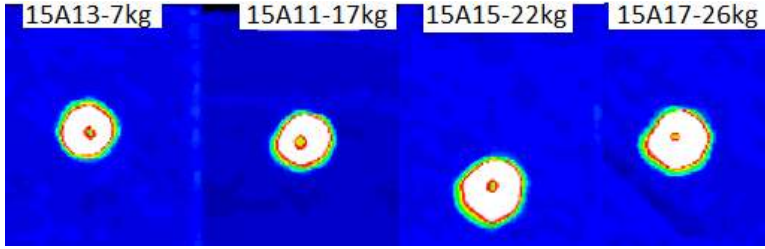
Numune Adı	Çentik Derinliği (mm)
15-I. SET	0,07
15-II. SET	0,09
15-III. SET	0,1
15-IV. SET	0,13

6.5.3. Hasar alanın ve kalan kritik burkulma dayanım yüzdesinin incelenmesi

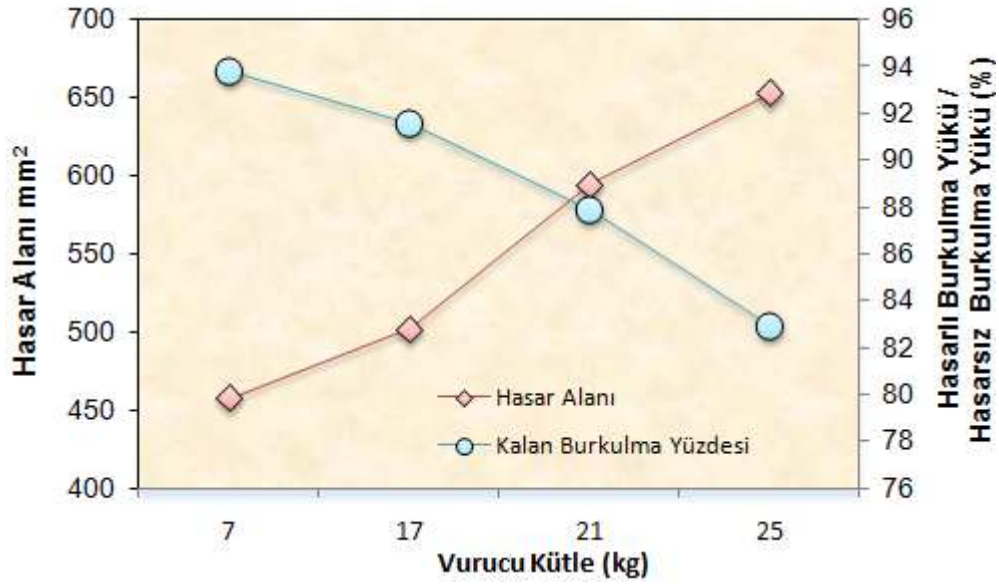
Darbe sonrası numunelerin iç yapısında oluşan hasar genişliği ölçmek için yapılan ultrasonik muayene sonuçları Resim 6.3'de verilmiştir. Ultrasonik resimlerden ölçülen hasar alanları, burkulma testi sonucu elde edilen kalan burkulma dayanım yüzdesinin vurucu kütleyle karşı grafikleri Şekil 6.35'de verilmiştir. Bu grafikler ağırlık düşürme test cihazından alınan datalar ve çentik derinliği ölçüm sonuçları ile uyumlu olarak I. set için hasar alanının en küçük ve buna bağlı olarak kritik burkulma dayanım yüzdesinin en yüksek, IV. set için hasar alanının en büyük ve buna bağlı olarak kalan burkulma dayanım yüzdesinin en küçük olduğunu göstermektedir.

Sonuç olarak bu test şartları altında tek yönlü karbon tabakalı kompozit levhalara vurucu kütlenin artırılmasıyla (10J'luk sabit enerjide) uygulanan darbenin daha yavaş ve hızlı vuruculara göre hasar alanını arttığı ve kalan kritik burkulma dayanım yüzdesini azalttığını söylenebilir. Ağır ancak yavaş bir kütlenin mi, yoksa hafif ancak hızlı bir kütlenin mi daha fazla hasar oluşturduğu ve kalan kritik burkulma dayanım yüzdesini azalttığı sorusuna yanıt olarak, ağır ancak yavaş bir kütle cevabı verilebilir. En ağır ve en hafif kütle arasında 18 kg'lık bir farklılık vardır. Bu farklılık kalan kritik burkulma dayanım yüzdesinde, %10'a varan ve hiçde küçümsemeyecek bir farklılık

yaratmıştır. Bu enerji altında oluşan darbelerde ki hasarlar ve kalan kritik burkulma dayanımları incelenirken vurucu kütlenin ağırlığı ve hızı da dikkate alınmalıdır.



Resim 6.3. Farklı kütleler ile yapılan aynı seviyedeki darbe enerjisi sonucu c-scan ultrasonik muayene sonuçları



Şekil 6.35. Farklı kütlelerle oluşturulan 10J'luk darbe enerjisi altında 15 numaralı test numunesinde oluşan hasar alanları ve kalan burkulma dayanımı/vurucu kütle grafikleri

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında “40/40/20”, 50/40/10, 60/30/10 ve 25/50/25 oryantasyon yüzdelerinde tasarlanmış ve üretilmiş tek yönlü karbon epoksi tabakalı kompozit levhaların darbe davranışında, oryantasyon yüzdesinin, tabaka kalınlığının, enerji artışının ve sabit enerji altında vurucu ağırlığının etkileri incelenmiştir. Ayrıca tabakalı kompozit yapıların genel darbe davranışları incelenerek, geri sekme, nüfuziyet ve delip geçme darbe biçimleri irdelenmiştir

Sonuç olarak;

- Tek yönlü karbon tabakalı kompozit levhalarda hasar alanının belli bir darbe enerji seviyesinde bir eşik değerine ulaştığı ve bundan sonra hasarın yayılımı daha yüksek enerji seviyelerinde gerçekleşmediği tespit edilmiştir. Bunun yerine test numunesinin nüfuziyetine yol açan yüksek dereceli bölgeselleşmiş gerilmeler oluşmaktadır.
- Tek yönlü karbon tabakalı kompozit malzemelerde darbe sonrası çöküntü derinliğinde (20 katlı numunelerde maksimum %26.3 seviyesine kadar) bir miktar azalma gözlemlenmiştir. Hasar görmüş bir parça ölçüldüğünde, ne zaman hasar gördüğü ve çöküntü derinliğinde bir miktar azalma olabileceği dikkate alınmalıdır.

Enerji etkisi;

- Yutulan enerji, maksimum temas kuvvetindeki enerjinin ve toplam yer değiştirmenin darbe enerjisi arttıkça arttığı görülmektedir. Temas süresi nüfuziyet durumuna kadar temas süresinin enerji artışıyla arttığı, daha sonra da azaldığı tespit edilmiştir.

- 20 katlı test numunelerinde 30 J'a kadar uygulanan darbe enerjisi sonucunda maksimum %43'lere, 29 katlı test numunelerinde 40J'a kadar uygulanan darbe enerjisini sonucunda %60'lara, 40 katlı test numunelerinde 60J'a kadar uygulanan darbe testleri sonucunda %69'lara varan burkulma dayanımlarında azalmalar tespit edilmiştir.
- Kritik kuvvetin ve maksimum temas kuvvetinin (belli bir doyum noktasına gelene kadar) darbe enerjisine bağlı olmadığı, bu parametrelerin malzemeye ait birer özellik olduğu tespit edilmiştir.
- Maksimum temas kuvvetinin, kritik kuvveti geçebilirse ciddi hasar olan fiber kırılması hasarlarının olduğu, kritik kuvvetin henüz oluşmadığı durumlarda ilk oluşan hasar tipi olan tabaka ayrılma hasarının henüz başlamadığı tespit edilmiştir.

Kalınlık etkisi;

- En büyük temas kuvveti ve kritik temas kuvvetinin en kalın numunede olduğu görülmüştür. Temas süresi, toplam yer değiştirme ve maksimum yer değiştirme miktarının temas kuvvetinin tersine kalınlık azaldıkça arttığı, sıfırlanma süresinin ise numune kalınlığının artıkça azaldığı gözlemlenmiştir.
- Enerji seviyesi arttıkça 40 katlı test numunelerinde oluşan hasar alanının 20 katlı test numunelerine göre daha fazla olduğu görülmektedir. Sonuç olarak 40 katlı, 20 katlı malzemelere göre dayanımını ne kadar yüksek olsa da, darbe enerjisine karşı dayanımlarının ince numunelere göre daha hızla bir şekilde azaldığı tespit edilmiştir.

Oryantasyon etkisi;

- Oryantasyon yüzdesi için yapılan karşılaştırmada, “25/50/25” oryantasyon yüzdeli numunenin en büyük maksimum ve kritik temas kuvvetine ve en küçük maksimum yer değiştirmeye ve temas kuvvetine sahip olduğu tespit edilmiştir.
- Oryantasyon yüzdesi için yapılan karşılaştırmada, “40/40/20” oryantasyon yüzdeli numunenin en küçük maksimum ve kritik temas kuvvetine ve en büyük maksimum yer değiştirmeye ve temas kuvvetine sahip olduğu tespit edilmiştir
- Burkulma testleri sonucunda farklı oryantasyon yüzdelilerine sahip test numunelerinin kalan kritik burkulma dayanımlarının büyükten küçüğe doğru sıralamasının “25/50/25”, “50/40/10”, “60/30/10” ve “40/40/20” şeklinde olduğu tespit edilmiştir.

Vurucu kütle etkisi;

- Kritik temas kuvvetinin I. set (hafif kütle, yüksek hız) için en düşük, IV. set (ağır kütle, düşük hız) için en büyük değere ulaştığı görülmüştür.
- Maksimum yer değiştirmenin I. set için en küçük değerinde, IV. set için en büyük değerinde olduğu görülmektedir.
- Yutulan enerji miktarlarının vurucu kütle ağırlaştıkça arttığı gözlemlenmiştir.
- Temas süresi, I. set için en küçük, IV. set için en büyük değeri almıştır. Ayrıca darbe sonunda hızın sıfır’a yaklaşması en fazla IV. nolu sette, en az I. nolu sette görülmüştür. Kütle artışı, numuneyi nüfuziyete yakınlaştırmıştır.

- Kütlenin artırılmasıyla (sabit enerjide: 10J) uygulanan darbenin daha hafif ve hızlı vuruculara göre hasar alanını arttığı ve kalan burkulma dayanım yüzdesini azalttığı gözlemlenmiştir. Ağır ancak yavaş bir kütlenin mi yoksa hafif ancak hızlı bir kütlenin mi daha fazla hasar oluşturabileceği ve kalan kritik burkulma dayanım yüzdesini azalttığı sorusuna yanıt olarak, ağır ancak yavaş bir kütle cevabı verilebilir. 10 J'luk enerji altında tek yönlü karbon tabakalı test numunelerinde oluşan hasarlar ve burkulma dayanımları incelenirken vurucu kütlenin ağırlığı ve vurucu hızı da dikkate alınmalıdır.

Gelecek çalışmalar için aşağıdaki konular önerilmektedir;

- Bu tez çalışmasındaki numunelerin tümü simetrik tasarlanmıştır. Simetri özelliklerini sağlanmadan tasarlanıp, darbeye karşı davranışları incelenebilir.
- Vurucu kütlenin etkisi düşük ve tek bir enerji seviyesinde (10J) incelenmiştir. Farklı enerji seviyeleri uygulanarak, vurucu kütlenin etkisini incelenebilir. Böylelikle enerji arttıkça düşük enerji seviyelerindeki etkinin hala geçerli olup olmadığı gözlemlenebilir.
- Bu tez çalışmasındaki tüm numunelere aynı noktadan darbe uygulanmıştır. Numune üzerinde belli noktalar seçilip, bu noktalara yapılan darbenin, kompozit numunede ki hasar oluşuma ve kritik burkulma dayanımına etkisi gözlemlenebilir.
- Aynı numuneler üzerinde geri sekme enerji aralığının görüldüğü enerji seviyesine ek olarak, penetrasyon ve delip geçme aralıklarındaki enerjiler de eklenerek, kalan kritik dayanım yüzde eğrileri daha geniş bir aralıkta gözlemlenebilir.

- Bu çalışmada 12,7 mm. çapında yarı küresel uç ile darbe uygulanmıştı. Vurucunun geometrisi değiştirilerek kompozit plakların darbeye cevabı incelenebilir. Böylelikle vurucu ucun çapının önemi gözlemlenebilir.

KAYNAKLAR

1. Karakuzu, R., İçten, B.M., Aktaş, M., Toparlı, M., Ataş, C., Arman, Y., "Kompozit Plakalarda Sıcaklığın Darbe Davranışına Etkisi", **TÜBİTAK**, Proje No : 104M426, İzmir, 6-8, 23-26 (2007).
2. İçten, B.M., "Damage in Laminated Composite Plates Subjected to Low Velocity Impact", Doktora Tezi, **Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, İzmir, 12-16, 32 (2006).
3. Sjöblom, P.O., Hartness, J.T., Cordell, T.M., "On Low Velocity Impact Testing of Composite Materials", **Journal of Composite Materials**, 22: 30-52 (1988).
4. Ramkumar, R.L., Chen, P.C., "Low-velocity Impact Response of Laminated Plates", **AIAA Journal**, 21: 1448-1452 (1982).
5. Cantwell, W.J., Morton, J., "The Impact Resistance of Composite Materials", **Composites**, 22: 347-362 (1991).
6. Abrate, S., "Impact on Laminated Composite Materials", **Applied Mechanics Review**, 44: 155-190 (1991).
7. Liu, D., Malvern, L. E., "Matrix Cracking in Impacted Glass / Epoxy Plates", **Journal of Composite Materials**, 21: 594-609 (1987).
8. Joshi, S.P., Sun, C. T., "Impact-induced fracture initiation and detailed dynamic stress field in the vicinity of impact", **Proc. American Society of Composites 2nd Tech. Conf.**, 177-185 (1987).
9. Ceyhun, V., Turan, M., "Tabakalı Kompozit Malzemelerin Darbe Davranışı", **Mühendis ve Makine**, 516: 19-25 (2003).

10. Hosur, M., V., Abdullah., M., Jeelani, S., "Studies on the Low-Velocity Response of Woven Hybrid Composites", ***Composite Structures***, 67: 253-262 (2005).
11. Naik, N.K., Ramasimha, R., Arya, H., Prabhu, S., V., ShamaRao, N., "Impact response and damage tolerance characteristics of glass-carbon/epoxy hybrid composite plates", ***Composites***, 32: 565-574 (2001).
12. Naik, N.K., Borade, S.V, Arya, Sailendra, M., Prabhu, S.V., "Experimental studies on impact behaviour of woven fabric composites: effect of impact parameters, ***Journal of Reinforced Plastics and Composites***, 21: 1347-1362 (2002).
13. Mirevski, T., Marshall, I.H., Thomson, R., Jones, R., Whittingham, B., "The effect of impactor shape on the impact response of composite laminates". ***Composite Structures***, 67: 139-148 (2005).
14. Mirevski, T., Marshall, I.H., Thomson, R., "The Influence of Impactor Shape on the Damage to Composite Laminates", ***Journal of Composite Structures***, 76: 116-122 (2006).
15. Belingardi, G., Vadori, R., "Low velocity impact tests of laminate glass-fiber-epoxy matrix composite material plates", ***International Journal of Impact Engineering***, 27: 213-229 (2002).
16. Milli, F., Necib M., "Impact behavior of cross-ply laminated composite plates under low velocities", ***Composite Structures***, 51: 237-244 (2001).

17. Aktaş, M., Karakuzu, R., Arman, Y., "Compression-after impact behavior of laminated composite plates subjected to low velocity impact in high temperatures", **Composite Structures** 89: 77–82 (2009).
18. Kwang-Hee, I., Cheon-Seok, C., Sun-Kyu, K., In-Young, Y., "Effects of temperature on impact damages in CFRP composite laminates", **Composites**, 32: 669-682 (2001).
19. Christoforou, A.P., Yigit, A.S., "Characterization of impact in composite plates", **Composite Structures**, 43: 15-24 (1998).
20. Tai, N.H., Yip, M.C., Lin, J.L., "Effects of low-energhy impact on the fatigue behaviour of carbon/epoxy composites", **Composites Science and Technology**, 58: 1-8 (1998).
21. Atas, C. Sayman, O., An overall view on impact response of woven fabric composite plates, "**Composite Structures**", 82: 336-345 (2007).
22. Kayrak, M.A. "Havacılık Kompozitleri ve Mukavemet-Maliyet Analizleri", **Sivil Havacılık Yüksek Okulu Yayınları**, No.09, Eskişehir, 1, 12-13, 69 (1999).
23. Şahin, Y. "Kompozit Malzemelere Giriş", **Gazi Kitapevi**, Ekim, 1, 8, 40, 87 (2009).
24. Smith, W.F. "Malzeme Bilimi ve Mühendisliği, üçüncü basım" Çeviri Editörü, Nihat G. Kınıkoğlu, **Literatür Yayınları**, İstanbul, 724 (2001).
25. Sorucu, A., "Orthotropic Malzemelerde Çatlak İlerlemesi ve Kırılma Tokluğu Tayini", Yüksek Lisans Tezi, **Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü**, İzmir, 9-10 (2007).

26. Eren, Y. "Kompozit Yapıların Darbe Etkisinin İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, **Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Kütahya, 8-20 (2007).
27. Mazumdar, S.K. "Composites Manufacturing: Material, Product and Process Engineering", **CRC Pres, Boca Raton London New York Washington, D.C**, 24 (2002).
28. Anonim, A.S.M. "International, Composite materials I the basics", **Materials Engineering Institute**, Ohio, 10-15 (1984).
29. Ekinici, V.Ş., "Alümina Takviyeli Alüminyum Matrisli Kompozit Malzeme Üretimi ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması", Yüksek Lisans Tezi **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 21, 27 (2007).
30. Rouchan, J., "Materiaux composites pour d'aeronefs", **Ecole Nationale Supérieure d'Ingenieurs de Constructions Aeronautiques**, 95 (1987).
31. Kara, M., "Düşük Hızlı Darbeye Maruz Tabakalı Kompozitlerin Dinamik Cevabı", Yüksek Lisans Tezi, **Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü**, Konya 12-13 (2006).
32. Jones, R.M., "Mechanics of Composite Materials", **Taylor&Francis Inc**, USA, 11-14 (1999).
33. Harper, C. A., "Handbook of Plastics, Elastomers and Composites" 4th ed., **McGraw-Hill**, 252-256 (2004).
34. Stuart, D.M., "Manual of Aerospace Composites", **A.A.C**, 20 (1982).

35. Anonim A.S.M “International, Composites volume 1”, **Metals Park**, Ohio, 5 (1987).
36. İnternet : NASA “Elastically tailored composite structures”
<http://www.nasaimages.org/luna/servlet/detail/nasaNAS~2~2~11250~113241> (2010).
37. Reid, S R., Zhou, G., “Impact behaviour of fibre-reinforced composite materials and structures”, **Woodhead Publishing Limited**, UK, 1,8 (2000).
38. Committee on New Materials for Advanced Civil Aircraft, “New Materials for Next-Generation Commercial Transports”, **National Academy Press**, Washington D.C, 64 (1996).
39. Ceyhun, V., Turan, M. “Tabakalı Kompozit Malzemelerin Darbe Davranışı”, **Mühendis ve Makine**, 516: 19-25 (2003).
40. Adams, R.D, “Adhesive Bonding”, **CRC Press. Woodhead Publishing Limited**, 143-187 (2009).
41. Callister, W.D. Jr., Materials Science and Engineering : An Introduction, **John Wiley and Sons Inc.** (1999).
42. Marais, S.T., “Material testing at high strain rate using the split Hopkinson pressure bar”, **Latin American Journal of Solids and Structures**, 319-339 (2004).
43. Abrate, S., “Impact on composite structures”, **Cambridge University Press**, 135 (1998).

44. Evci, C., “Seramik Kompozit Zırh Sistemlerinin Darbe ve Balistik Özelliklerinin Belirlenmesi”, Doktora Tezi, **Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 67 (2010).
45. Karakuzu, R., İçten, B.M., Aktaş, M., Toparlı, M., Ataş, C., Arman, Y., “Kompozit Plakalarda Sıcaklığın Darbe Davranışına Etkisi”, **TÜBİTAK**, Proje No : 104M426, İzmir, 6-8, 23-26 (2007).
46. prEN 6038, “Aerospace series fibre reinforced plastics test method determination of the compression strength after impact”, **European Association of Aerospace Industries (AECMA)**, 5 (1995).
47. Pekbey, Y., Özdamar, A., Sayman, O., “Kompozit malzemelerde oryantasyon açısının burkulma yüküne etkisi”, **MakinaTek**, 94: 106-112, (2005).
48. Coppens, G. J. “Effects of three-dimensional geometry on penetration and perforation resistance”, Doktora Tezi, **Michigan State University** (2004).
49. Pillai, G.R, “Response of adhesively bonded composite joints to low velocity impact”, Yüksek Lisans Tezi, **Mechanical Engineering Department, Wichita State University**, Kansas, 57 (2006).
50. Kwon, Y.S, Sankar, B.V. Indentation-flexure and low-velocity impact damage in graphite epoxy laminates, **Journal of Composites Technology and Research**, 15(2): 101–111 (1993).
51. Davies, G.A.O., Zhang, X., Zhou, G., Watson, S., “Numerical modeling of impact damage”, **Composites**, 25(5): 342-350 (1994).

52. Davies, G.A.O, Zhang X., "Impact damage prediction in carbon composite structures", ***International Journal of Impact Engineering***, 16(1): 149-170 (1995).
53. Cartie, D.D.R, Irving P.E, "Effect of resin and fibre properties on impact and compression after impact performance of CFRP", ***Composites***, 33: 483-493 (2002).
54. Schoeppner, G.A., Abrate, S., "Delamination threshold loads for low velocity impact on composite laminates", ***Composites***, 31: 903–915 (2000).
55. ASTM D 7136/D 7136M – 07, "Standard test method for measuring the damage resistance of a fiber-reinforced polymer matrix composite to a drop-weight impact event, ***Society for Testing and Materials United States***, American, 14, (2007).
56. Belingardi, G., Vadori R., "Influence of the laminate thickness in low velocity impact behavior of composite material plate", ***Composite Structures***, 61 27–38 (2003).
57. Finn, S.R, Springer, G "Composite plates impact damage", ***Technomic Publishing Company Inc***, California, 189 (1991).

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : KARACA, Dilek
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri:19.01.1980 Ankara
 Medeni hali : Evli
 Telefon : 0 (312) 811 22 21
 Faks : 0 (312) 811 14 25
 e-mail : dkaraca@tai.com.tr

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Lisans	Gazi Üniversitesi /Makina Mühendisliği	2003
Lise	Ayrancı Lisesi	1998

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2004-2005	İntek Danışmanlık	Kalite Yönetim Danışmanı
2005-2007	Temsan Yapı ve Makine	Kalite Güvence Mühendisi
2007-	Tusaş Türk Hav. ve Uzay A.Ş	Sistem Mühendisi

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

-

Hobiler

Doğa Yürüyüşleri, takı tasarımı, yaratıcı el becerileri, kültürel etkinlikler, farklı şehirler gezip, görmek