

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ \* FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**POLİFENİLEN SULFİD (PPS) MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN  
TABAKALAR ARASI KAYMA DAYANIMLARININ  
İYİLEŞTİRİLMESİ**

**DOKTORA TEZİ**

**Y. Müh. Mustafa Özgür BORA**

**Anabilim Dalı: Makina Mühendisliği**

**Danışman: Prof. Dr. İsmail CÜRGÜL**

**KOCAELİ, 2011**

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ \* FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**POLİFENİLEN SULFİD (PPS) MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN  
TABAKALAR ARASI KAYMA DAYANIMLARININ  
İYİLEŞTİRİLMESİ**

**DOKTORA TEZİ**

**Y. Müh. Mustafa Özgür BORA**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 05 EKİM 2011**

**Tezin Savunulduğu Tarih: 27 EKİM 2011**

**Tez Danışmanı  
Prof.Dr. İsmail CÜRGÜL**

(.....)

**Üye  
Prof.Dr. Tamer SINMAZÇELİK**

(.....)

**Üye  
Prof.Dr. Ahmet ÜNAL**

(.....)

**Üye  
Prof.Dr. Muzaffer ZEREN**

(.....)

**Üye  
Yrd.Doç.Dr. Taner YILMAZ**

(.....)

**KOCAELİ, 2011**

## ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR

1950'lerden itibaren jet uçağının servis içi yapısal hasarları uçuş güvenliğini geliştirmek için tasarımcıları ve malzeme mühendislerini düşünmeye sevk etmiştir. Fiber metal tabakalar (FMT) öncelikle modern sivil havacılık uygulamalarında yorulma dayanımı için geliştirilmiştir. Bununla birlikte, bu malzemenin çeşitli durumlarda darbe direnci, yanma direnci ve hasar toleransı gibi özelliklerinin de iyi olduğu saptanmıştır. FMT, fiber takviyeli polimer katmanlara yapışmış metal katmanlar içeren ileri hibrit malzeme sistemleridir. FMT malzemeler yüksek yorulma direnci ve hafifliği gibi özelliklerinden dolayı havacılık sektöründeki uygulamalarda günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır. Uçağın montajı esnasında uçağı oluşturan parçaların birbirine yapıştırılması ve parçaların delinerek cıvatalı yada pim bağlantılarının yapılması gibi bağlantı çeşitleri kullanılmaktadır. Perçinli ve cıvatalı bağlantılar ile oluşturulan bir uçak parçasının yük taşıma davranışının anlaşılması ve bu sayede tasarıma bakış açısı vermesi için önem arz etmektedir. Yük taşıma dayanımı servis esnasında mekanik bağlantıların hasarlanmasının tahmin edilmesinde ve yapısal bağlantı tasarımları için önemli bir faktördür.

Bu çalışmada endüstriyel alanlarda yer alabilecek üstün mekanik özellikler içeren, darbe yüklemelerine dirençli, kimyasal ortamlara karşı dirençli ve iyi bir ara yüzeye sahip termoplastik matrisli kompozit ve FMT malzemesi üretimi hedef olarak belirlenmiştir. Hedef doğrultusunda seçilen bileşenlerle (cam elyaf keçe, PPS ve alüminyum levhalar) sıcak pres tekniği ile metal kalıplarda polimer kompozit ve FMT malzemelerinin üretimi gerçekleştirilmeye çalışılmıştır. Üretilen polimer matrisli kompozitin eğilme dayanımı ve darbe dayanımı belirlenip, düşük hızlı düşen ağırlık darbe yüklemeleri sonrası numunelerde oluşan hasar mekanizmaları bilgisayarlı tomografi yöntemi ile belirlenmiştir. Sıcak pres tekniği ile mekanik, kimyasal ve mekanik+kimyasal yöntemlerle üretilen yeni nesil FMT malzemelerinde ise alüminyum levha katlarında oluşturulan farklı delik formasyonlarının FMT malzemesinin darbe dayanımı, tabakalar arası kayma dayanımı ve çekme dayanımına etkisi saptanmıştır. Çekme yüklemeleri sonucunda farklı formasyonlarda delik içeren FMT malzemelerinde oluşan hasar mekanizmalarının tespiti için optik mikroskop incelemeleri yapılmış olup düşük hızlı düşen ağırlık darbe yüklemelerine maruz bırakılan FMT numunelerde oluşan hasar mekanizmalarının tespiti için hasarlı numunelerden dijital fotoğraflar alınmıştır.

Sahip olduğu bilgi birikimi ve tecrübesiyle çalışmalarımda desteğini eksik etmeyen, meslek hayatıma kazandırdığı iş disiplini ile bana örnek olan değerli hocam Prof.Dr.Tamer SINMAZÇELİK'e teşekkür ederim. Makine Mühendisliği Bölüm Başkanı Prof. İbrahim UZMAN'a Malzeme Laboratuar imkanlarını kullanmama olanak sağladığı için teşekkür ederim. Arş.Gör.Mak.Y.Müh.Onur ÇOBAN ve başta Doç.Dr.Volkan GÜNAY olmak üzere TÜBİTAK-MAM, Malzeme Enstitüsüne çalışmalarım sırasında vermiş oldukları destek nedeniyle teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca maddi ve manevi her konuda destek ve yardımlarını esirgemeyen, beni cesaretlendiren babam Mehmet Lütfi BORA, annem NURTEN BORA ve

yakınlarıma teşekkür ederim. Hayatıma anlam katan değerli hayat arkadaşım Bircan BORA ve biricik kızım Zeynep Asya BORA'ya bu süreçte bana her konuda destek olmaları nedeniyle teşekkür ederim.

Bu çalışmanın ortaya çıkmasında büyük emeği olan, bana kılavuzluk eden ve sürekli cesaretlendiren danışmanım Prof.Dr.İsmail CÜRGÜL'e sonsuz şükran ve teşekkürlerimi sunarım.



## İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER .....	iii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
TABLolar DİZİNİ .....	xi
SİMGELER DİZİNİ.....	xiii
ÖZET.....	xv
İNGİLİZCE ÖZET .....	xvi
1. GİRİŞ .....	1
1.1. Polimer Matrisli Kompozit Malzemeler .....	1
1.1.1. Fiber takviyeli kompozitler .....	4
1.1.2. Cam elyaf keçe takviyeli polifenilen sulfid (PPS) kompoziti oluşturan bileşenlerin üstünlükleri ve çalışma kapsamında seçilmesinin nedenleri .....	5
1.2. Polimer Matrisli Kompozitlerin Darbe Yüklemesine Karşı Davranışı .....	6
1.2.1. Polimer kompozit malzemelere uygulanan darbe testleri .....	8
1.3. Fiber Metal Tabakaları (FMT) ve Cam Elyaf Keçe/Alüminyum Levha/ PPS İçeren FMT'in Üretim Nedenleri .....	9
1.4. Tez Konusunun Önemi ve İçeriği .....	14
2. GENEL BİLGİLER .....	17
2.1. Kompozit Malzemelerin ve Fiber Metal Tabakaların Mekanik Olarak Birleştirilmesi.....	17
2.2. Kompozit Malzemelerin ve Fiber Metal Tabakaların Düşük Hızlı Düşen Ağırlık Darbe Yükleme Altındaki Davranışları .....	22
2.3. Kompozit Malzemelerin ve Fiber Metal Tabakaların Ara Yüzey Dayanımının Belirlenmesi .....	27
2.4. Çekme Test Yöntemi ile Fiber Metal Tabakaların Dayanımının Belirlenmesi ve Fiber Metal Tabakalarda Oluşan Hasar Mekanizmaları .....	31
3. DENEYSEL ÇALIŞMA .....	37
3.1. Polimer Matrisli Kompoziti ve Fiber Metal Tabakalı Kompoziti Oluşturacak Bileşenler.....	37
3.2. Fiber Metal Tabakalı Kompozitlerde Metal/Cam Elyaf Keçe+Matris Ara Yüzeyinin İyileştirilmesi İçin Alüminyum Levhalara Uygulanan Kimyasal İşlemler ....	39
3.2.1. Adhezif yapıştırmada kullanılan yüzey iyileştirmeler .....	40
3.2.1.1. Çözücü ile yağ giderme.....	41
3.2.1.2. Mekanik (abrazif ve kum püskürtme) .....	41
3.2.1.3. Kimyasal (asitle dağlama).....	42
3.2.1.4. Elektrokimyasal (anodik oksidasyon).....	43
3.2.1.5. Bağlama ajanı (silan).....	44
3.3. Fiber Metal Tabakalı Kompozitlerde (Alüminyum/cam elyaf keçe takviyeli PPS kompoziti) Metal/Cam Elyaf Keçe-Matris Ara Yüzeyinin İyileştirilmesi İçin Alüminyum Levhaya Uygulanan Kimyasal İşlemler.....	45
3.4. Polimer Matrisli Kompozit (Cam elyaf keçe takviyeli PPS kompoziti) ve Fiber Metal Tabakalı Kompozitlerin (Alüminyum/cam elyaf keçe takviyeli PPS kompoziti) Üretim Yöntemi (Sıcak Pres Tekniği).....	46

3.5. Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DTK) Tekniği.....	53
3.6. Üç-Nokta Eğilme, Kısa Kiriş Kayma Dayanımı ve Tabakalar Arası Kayma Dayanımı Test Yöntemleri.....	54
3.7. Düşük Hızlı Düşen Ağırlık Darbe Testi.....	58
3.8. Çekme Deneyi.....	61
3.9. Bilgisayarlı Tomografi Yöntemi ile Hasar Analizi.....	67
3.10. Optik Mikroskop ve Dijital Kamera ile Hasar Analizi .....	68
4. DENEY SONUÇLARI .....	69
4.1. DTK Analizleri.....	69
4.1.1. DTK analizleri ile sıcak pres üretim sıcaklığının belirlenmesi.....	69
4.1.2. Sıcak pres üretim prosesinin uygun bir yazılımla DTK cihazına aktarılması ve proses adımlarının PPS malzemesinin kristallenme derecesi, camı geçiş sıcaklığı ve erime sıcaklığına etkisinin belirlenmesi.....	72
4.2. Düşük Hızlı Düşen Ağırlık Darbe Testlerine Maruz Bırakılan Cam Elyaf Keçe Takviyeli PPS Kompozitlerin Darbe Davranışları.....	74
4.3. Düşük Hızlı Düşen Ağırlık Darbe Testlerine Maruz Bırakılan Yüzeyi İyileştirilmiş ve İyileştirilmemiş, Bölgesel ve Tüm Yüzeyi Delinmiş Fiber Metal Tabakalı Kompozitlerin Darbe Davranışları.....	87
4.4. Düşük Hızlı Düşen Ağırlık Darbe Testlerine Maruz Bırakılan Polimer Matrisli Kompozitlerin ve Yüzeyi İyileştirilmiş ve İyileştirilmemiş Tüm Yüzeyi Delinmiş Fiber Metal Tabakalı Kompozitlerin Darbe Sonrası Oluşan Hasar Mekanizmalarının Tespiti.....	104
4.4.1. Bilgisayarlı tomografi yöntemi ile polimer matrisli kompozitlerde düşük hızlı düşen ağırlık darbe testleri sonucunda oluşan hasar mekanizmalarının tespiti .....	104
4.4.2. Dijital kamera ile tüm yüzeyi delikli yüzeyi iyileştirilmiş ve iyileştirilmemiş fiber metal tabakalı kompozitlerin düşük hızlı düşen ağırlık darbe testleri sonucunda oluşan hasar mekanizmalarının tespiti .....	107
4.5. Üç Nokta Eğilme, Kısa Kiriş Kayma Dayanımı ve Tabakalar arası Kayma Dayanımı (TAKD) Testleri.....	111
4.5.1. Cam elyaf keçe takviyeli PPS kompozitlerinin eğilme modülü ve dayanımlarının 3 nokta eğilme test yöntemi ile belirlenmesi .....	111
4.5.2. Darbe yüklemesine maruz kalmış cam elyaf keçe takviyeli PPS kompozitlerin artık eğilme modülü ve dayanımlarının üç nokta eğilme test yöntemi ile belirlenmesi ve darbe yüklemesine maruz kalmamış numunelerle karşılaştırılması.....	115
4.5.3. Ağırlıkça yüzde silan konsantrasyonunun metal/cam elyaf keçe+PPS matris arayüzey dayanımına etkisini belirleyebilmek için üç nokta eğilme, kısa kiriş kayma dayanımı ve TAKD testlerinin gerçekleştirilmesi.....	121
4.5.4. Ağırlıkça yüzde silan konsantrasyonunun belirlenmesinden sonra ( $\phi 3$ mm, $\phi 4$ mm ve $\phi 5$ mm) delik çaplarında 3 farklı TDA/KA (Toplam Delik Alanı/Kapalı Alan) oranında matkapla delinmiş alüminyum levhalar içeren fiber metal tabakalı kompozitlerin mekanik birleştirme+adhezif yapışma bağlantı dayanımlarının üç nokta eğilme testleri ile belirlenmesi .....	126
4.5.5. Ağırlıkça yüzde silan konsantrasyonunun belirlenmesinden sonra ( $\phi 3$ mm ve $\phi 5$ mm) delik çaplarında 3 farklı TDA/KA oranında matkapla delinmiş alüminyum levhalar içeren fiber metal tabakalı kompozitlerin mekanik+adhezif yapışma bağlantı dayanımlarının TAKD testleri ile belirlenmesi.....	130
4.6. Çekme Testleri .....	132

4.6.1. Ağırlıkça yüzde silan konsantrasyonun metal/cam elyaf keçe+PPS matris arayüzey dayanımına etkisini belirleyebilmek için çekme testlerinin gerçekleştirilmesi .....	132
4.6.2. Ağırlıkça yüzde silan konsantrasyonunun belirlenmesinden sonra ( $\phi 3$ mm ve $\phi 5$ mm) delik çaplarında, 3 farklı delik diziliminde ve iki farklı TDA/KA oranında matkapla delinmiş yüzeyi iyileştirilmiş ve iyileştirilmemiş alüminyum levhalar içeren fiber metal tabakalı kompozitlerin mekanik birleştirme+adhezif yapışma bağlantı dayanımlarının çekme testleri ile belirlenmesi.....	134
4.6.3. $\phi 3$ mm ve $\phi 5$ mm delik çaplarında, 3 farklı delik diziliminde ve iki farklı TDA/KA oranında matkapla delinmiş yüzeyi iyileştirilmiş ve iyileştirilmemiş alüminyum levhalar içeren fiber metal tabakalı kompozitlerde çekme testleri sonrası oluşan hasar mekanizmalarının tespiti .....	140
4.6.4. $\phi 3$ mm, $\phi 4$ mm, $\phi 5$ mm, $\phi 6$ mm, $\phi 7$ mm, $\phi 8$ mm ve $\phi 10$ mm delik çaplarında, 4 farklı delik diziliminde matkapla delinmiş yüzeyi iyileştirilmiş alüminyum levhalar içeren fiber metal tabakalı kompozitlerin mekanik+adhezif yapışma bağlantı dayanımlarının çekme testleri ile belirlenmesi .....	147
4.6.5. $\phi 3$ mm, $\phi 4$ mm, $\phi 5$ mm, $\phi 6$ mm, $\phi 7$ mm, $\phi 8$ mm ve $\phi 10$ mm delik çaplarında, 4 farklı delik diziliminde matkapla delinmiş yüzeyi iyileştirilmiş alüminyum levhalar içeren fiber metal tabakalı kompozitlerde çekme testleri sonrası oluşan hasar mekanizmalarının tespiti .....	150
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	152
5.1. Sonuçlar .....	152
5.1.1. DTK analizlerinden elde edilen sonuçlar .....	152
5.1.2. Polimer matrisli kompozitlere uygulanan düşük hızlı düşen ağırlık darbe testlerinden elde edilen sonuçlar .....	153
5.1.3. Fiber metal tabakalı kompozitlere uygulanan düşük hızlı düşen ağırlık darbe testlerinden elde edilen sonuçlar .....	154
5.1.3.1. Yüzeyi iyileştirilmemiş bölgesel delikli alüminyum levha takviyeli fiber metal tabakalı kompozitlerin darbe davranışları .....	154
5.1.3.2. Yüzeyi iyileştirilmiş ve iyileştirilmemiş alüminyum levha takviyeli fiber metal tabakalı kompozitlerin darbe davranışları .....	156
5.1.4. Üç nokta eğilme, kısa kiriş kayma dayanımı ve tabakalar arası kayma dayanımı (TAKD) testlerinden elde edilen sonuçlar .....	159
5.1.4.1. Cam elyaf keçe takviyeli PPS kompozitlerinin eğilme modülü ve dayanımlarının üç nokta eğilme test yöntemi ile belirlenmesi.....	159
5.1.4.2. Ağırlıkça yüzde silan konsantrasyonun fiber metal tabakalı kompozitlerin arayüzey dayanımına etkisinin üç nokta eğilme, kısa kiriş kayma dayanımı ve TAKD testleri ile belirlenmesi .....	160
5.1.4.3. Farklı toplam delik alanı/kapalı alan (TDA/KA) oranında ve farklı delik çaplarında matkapla delinmiş ve yüzeyi iyileştirilmiş alüminyum levhalar içeren fiber metal tabakalı kompozitlerin mekanik+adhezif yapışma bağlantı dayanımlarının üç nokta eğilme ve TAKD testleri ile belirlenmesi.....	161
5.1.5. Çekme testleri sonuçları .....	162
5.1.5.1. Ağırlıkça yüzde silan konsantrasyonun metal/cam elyaf keçe+PPS matris ara yüzey dayanımına etkisinin çekme testleri ile belirlenmesi.....	162
5.1.5.2. ( $\phi 3$ mm ve $\phi 5$ mm) delik çaplarında, 3 farklı delik diziliminde ve iki farklı TDA/KA oranında delinmiş yüzeyi iyileştirilmiş ve iyileştirilmemiş alüminyum levhalar içeren fiber metal tabakalı kompozitlerin mekanik birleştirme+adhezif yapışma bağlantı dayanımlarının belirlenmesi.....	162

5.1.5.3. 7 farklı delik çapında, 4 farklı delik diziliminde matkapla delinmiş ve yüzeyi iyileştirilmiş alüminyum levhalar içeren fiber metal tabakalı kompozitlerin mekanik birleştirme+adhezif yapışma bağlantı dayanımlarının çekme testleri ile belirlenmesi..	165
5.2. Öneriler .....	166
KAYNAKLAR .....	167
KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER .....	184
ÖZGEÇMİŞ .....	187

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1: Malzemelerin dayanım/yoğunluk oranlarının tarihsel gelişimi .....	3
Şekil 1.2: Airbus A380 uçağında kullanılan metal/fiber malzemeler .....	10
Şekil 1.3: Airbus firmasının bünyesindeki uçak tiplerinde kullanılan FMT malzemeleri .....	12
Mekanik bağlantılarda amaç bir elemandan diğer bağlantı elemanına yük iletimini düzgün bir şekilde gerçekleştirilmesidir. Mekanik bağlantılarda yük, bağlantı elemanı aracılığıyla delik yüzeyine transfer edilerek bir parçadan diğerine aktarılır .....	18
Şekil 2.1: Pim ile yüklenen delik etrafında oluşan gerilme dağılımları .....	18
Şekil 2.2: Pimli bağlantılarda tipik hasar mekanizmaları .....	19
Şekil 2.3: Çekme yüklemesine maruz bırakılacak bir FMT numunesinin sembolik olarak metal/kompozit katman ara yüzeyinde oluşturulmak istenen cam elyaf keçe+ PPS sütunları .....	21
Şekil 2.4: Yarı küresel darbe ucu ile yapılan darbe yüklemelerinde kompozit malzemelerde oluşan hasar mekanizmaları .....	23
Şekil 2.5: Düz darbe ucu ile gerçekleştirilen darbe yüklemelerinde kompozit malzemelerde oluşan hasar mekanizmaları .....	24
Şekil 2.6: 28 Joule darbe enerjisi altında hasarlanan FMT malzemesinin arka yüzeyinin görünümü .....	26
Şekil 2.7: Üç nokta eğilme testleri sonucunda fiber/matris ve metal/kompozit katman ara yüzeylerinde oluşan tipik hasar mekanizmaları a)PEEK/Karbon b)PIXAM/Karbon c) FMT d)FMT .....	30
Şekil 2.8: Kompozit katmanlarda çekme yüklemesi nedeniyle fiber soyulması ve fiber kırılması hasarlarının oluşumu .....	34
Şekil 2.9: Alüminyum katlarda çekme yüklemesi nedeniyle boyun verme, ara yüzeyde delaminasyon ve kompozit katmanda matris ayrılması hasarlarının oluşumu .....	34
Şekil 2.10: FMT numunelerin pim bölgesinde delaminasyon, akma ve son olarak burkulma şeklinde hasarlanması .....	35
Şekil 2.11: Çekme yüklemesi ile hasarlanmış a) PP/PP kompozit katmanlar içeren FMT malzeme ve b) cam fiber takviyeli kompozit katmanlar içeren FMT malzemesi .....	36
Şekil 3.1: Carver marka sıcak pres cihazı .....	47
Şekil 3.2: Paslanmaz çelik kalıbın parçaları ve kalıbın montaj hali .....	48
Şekil 3.3: Polimer matrisli kompozit malzemenin sıcak pres tekniği ile üretimi için matris ve takviye malzemesinin paslanmaz çelik kalıba yerleştirilmesi.....	49
Şekil 3.4: FMT malzemesinin kalıba yerleştirilmesi .....	52
Şekil 3.5: TA Instruments marka Q200 DTK test cihazı .....	53
Şekil 3.6: Shimadzu AG-X çekme test cihazı .....	54
Şekil 3.7: Üç nokta eğilme testi şematik gösterimi.....	55
Şekil 3.8: Numunede darbe nedeniyle oluşan hasar bölgesinin üç eşit kısma bölünmesi .....	55

Şekil 3.9: Üç nokta eğilme deneyleri için alüminyum levha yüzeylerine açılan deliklerin delik çapları, delik çaplarına göre deliklerin dizilişi ve bir deney numunesindeki (TDA/KA) oranı .....	57
Şekil 3.10: TAKD deneyleri için alüminyum levha yüzeylerine açılan deliklerin delik çapları, delik çaplarına göre deliklerin dizilişi ve bir deney numunesindeki (TDA/KA) oranı.....	58
Şekil 3.11: Dynatup 9200 düşen ağırlık test cihazı.....	59
Şekil 3.12: Cam elyaf keçe takviyeli PPS kompozit numunenin ve FMT numunenin düşük hızlı düşen ağırlık test cihazına yerleştirilmesi .....	60
Şekil 3.13: Alüminyum levha malzemesine $\phi 4$ mm ve $\phi 6$ mm'lik matkap uçları ile delikler açılması .....	60
Şekil 3.14: Alüminyum levha yüzeylerine açılan $\phi 3$ mm çaplı deliklerin plaka üzerindeki dizilimi, toplam delik alanı/ kapalı alan oranı ve tabakadaki delik sayısı.....	62
Şekil 3.15: Alüminyum levha yüzeylerine açılan $\phi 5$ mm çaplı deliklerin plaka üzerindeki dizilimi, toplam delik alanı/ kapalı alan oranı ve tabakadaki delik sayısı.....	63
Şekil 3.16: 4/3 konfigürasyonunda sıcak pres tekniği ile üretilen üç farklı dizilimdeki yüzeyi iyileştirilmiş ve iyileştirilmemiş FMT malzemelerinin ve yüzeyi iyileştirilmiş deliksiz FMT malzemesinin çekme çenelerine sembolik olarak yerleştirilmesi.....	64
Şekil 3.17: Çekme testine tabi tutulacak yüzeyi iyileştirilmiş veya yüzeyi iyileştirilmemiş delikli FMT numunenin paslanmaz çelik kalıba yerleştirilmesi .....	65
Şekil 3.18: 7 farklı çapta ( $\phi 3$ mm, $\phi 4$ mm, $\phi 5$ mm, $\phi 6$ mm, $\phi 7$ mm, $\phi 8$ mm, $\phi 10$ mm) ve 4 farklı delik formasyonunda (A, B, C ve D) delik açılmış yüzeyi iyileştirilmiş FMT numuneleri .....	66
Şekil 4.1: İşleme maruz bırakılmamış toz halindeki PPS polimerinin DTK analizi..	70
Şekil 4.2: DTK ile üretim sıcaklığının kristallenme oranına etkisi.....	71
Şekil 4.3: 75 °C'de 24 saat etüvde kurutulmuş toz halindeki PPS polimerinin DTK analizi .....	72
Şekil 4.4: Sıcak pres üretim prosesine göre etüvde kurutulmuş toz halindeki PPS polimerine yapılan DTK analizi.....	74
Şekil 4.5: Dört farklı çaptaki ve iki farklı biçimdeki darbe uçlarıyla gerçekleştirilen düşük hızlı düşen ağırlık darbe deneylerinden elde edilen F-t grafikleri.....	77
Şekil 4.6: Dört farklı çaptaki ve iki farklı biçimdeki darbe uçlarıyla gerçekleştirilen düşük hızlı düşen ağırlık darbe deneylerinden elde edilen E-t grafikleri .....	79
Şekil 4.7: $\phi 10$ mm düz ve yarı küresel darbe uçlarıyla gerçekleştirilen düşük hızlı düşen ağırlık darbe deneylerinden elde edilen absorbe edilen enerjisi- darbe enerjisi grafikleri .....	83
Şekil 4.8: Dört farklı çaptaki ve iki farklı biçimdeki darbe uçlarıyla gerçekleştirilen düşük hızlı düşen ağırlık darbe deneylerinden elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafikleri.....	85
Şekil 4.9: $\phi 10$ mm düz ve yarı küresel darbe uçlarıyla gerçekleştirilen düşük hızlı düşen ağırlık darbe deneylerinden elde edilen toplam yer değiştirme-darbe enerjisi eğrileri .....	86
Şekil 4.10: $\phi 10$ mm yarı küresel ve düz darbe uçları ile gerçekleştirilen düşük hızlı düşen ağırlık darbe deneylerinden elde edilen F-t grafikleri .....	89

Şekil 4.11: $\phi 10$ mm yarı küresel ve düz darbe uçları ile gerçekleştirilen düşük hızlı düşen ağırlık darbe deneylerinden elde edilen E-t grafikleri .....	90
Şekil 4.12: Bölgesel delikli FMT malzemelerin $\phi 10$ mm düz ve yarı küresel darbe ucu ile gerçekleştirilen düşük hızlı darbe yüklemelerinden elde edilen darbe ucunun toplam yer değiştirme miktarının darbe enerjisine göre değişimi .....	92
Şekil 4.13: $\phi 10$ mm düz darbe ucu ile gerçekleştirilen düşük hızlı darbe yüklemeleri sonucu tüm yüzeyi delikli yüzeyi iyileştirilmiş ve iyileştirilmemiş FMT malzemelerin F-t grafikleri .....	94
Şekil 4.14: $\phi 10$ mm yarı küresel darbe ucu ile gerçekleştirilen düşük hızlı darbe yüklemeleri sonucu tüm yüzeyi delikli yüzeyi iyileştirilmiş ve iyileştirilmemiş FMT malzemelerin F-t grafikleri .....	96
Şekil 4.15: $\phi 10$ mm düz darbe ucu ile gerçekleştirilen düşük hızlı darbe yüklemeleri sonucu tüm yüzeyi delikli yüzeyi iyileştirilmiş ve iyileştirilmemiş FMT numunelerin kuvvet-yer değiştirme grafikleri .....	98
Şekil 4.16: $\phi 10$ mm yarı küresel darbe ucu ile gerçekleştirilen düşük hızlı darbe yüklemeleri sonucu tüm yüzeyi delikli yüzeyi iyileştirilmiş ve iyileştirilmemiş FMT numunelerin kuvvet-yer değiştirme grafikleri .....	99
Şekil 4.17: $\phi 10$ mm düz ve yarı küresel darbe uçları ile gerçekleştirilen düşük hızlı darbe yüklemeleri sonucu tüm yüzeyi delikli yüzeyi iyileştirilmiş ve iyileştirilmemiş FMT numunelerin absorbe edilen enerji ve geri gelme enerjilerin uygulanan darbe enerjisine göre değişimi .....	100
Şekil 4.18: Tomografi yöntemi ile $\phi 10$ mm düz ve yarı küresel darbe uçları ile gerçekleştirilen darbe yüklemesine maruz bırakılmış polimer matrisli kompozit malzemelerde oluşan hasar mekanizmaları.....	106
Şekil 4.19: $\phi 10$ mm düz ve yarıküresel darbe uçları ile gerçekleştirilen düşük hızlı düşen ağırlık darbe deneylerine maruz kalmış yüzeyi iyileştirilmiş ve iyileştirilmemiş FMT numunelerin darbe uygulanan yüzeylerinde oluşan hasar mekanizmaları .....	109
Şekil 4.20: $\phi 10$ mm düz ve yarıküresel darbe uçları ile gerçekleştirilen düşük hızlı düşen ağırlık darbe deneylerine maruz kalmış yüzeyi iyileştirilmiş ve iyileştirilmemiş FMT numunelerin arka yüzeylerinde oluşan hasar mekanizmaları .....	110
Şekil 4.21: Farklı çaptaki düz darbe uçları ile hasarlanmış numunelerin 3 farklı bölgesindeki artık eğilme dayanımı değerlerinin uygulanan darbe enerjisi ile ilişkisi .....	116
Şekil 4.22: Farklı çaptaki darbe uçları ile hasarlanmış numunelerin 3 farklı bölgesindeki artık eğilme modülü değerlerinin uygulanan darbe enerjisi ile ilişkisi .....	117
Şekil 4.23: Farklı çaptaki yarı küresel darbe uçları ile hasarlanmış numunelerin 3 farklı bölgesindeki artık eğilme dayanımı değerlerinin uygulanan darbe enerjisi ile ilişkisi .....	119
Şekil 4.24: Farklı çaptaki yarı küresel darbe uçları ile hasarlanmış numunelerin 3 farklı bölgesindeki artık eğilme modülü değerlerinin uygulanan darbe enerjisi ile ilişkisi .....	120
Şekil 4.25: Üç nokta eğilme testi sonuçlarından yüzde silan oranı/eğilme dayanımı ve yüzde silan oranı/eğilme modülü değerleri .....	122
Şekil 4.26: Maksimum eğilme gerilmesi ve eğilme modülü değerlerinin delik çapı ve TDA/KA oranına göre değişimi .....	129

Şekil 4.27: Deliksiz ve $\phi 3$ mm ve $\phi 5$ mm delikli FMT numunelerin TAKD testi sonucunda elde edilen maksimum kayma gerilmesi değerleri.....	131
Şekil 4.28: Üç farklı ağırlıkça silan konsantrasyonu (%1, %2 ve %3) ile üretilmiş FMT numunelerin kuvvet-% genleme eğrileri.....	133
Şekil 4.29: TDA/KA oranı 0.05 ve 0.06 olduğu durumda üç farklı delik formasyonunda delikli ve yüzeyi iyileştirilmiş FMT numunelerin kuvvet-% genleme eğrileri.....	135
Şekil 4.30: TDA/KA oranı 0.05 ve 0.06 olduğu durumda üç farklı delik formasyonunda delikli ve yüzeyi iyileştirilmemiş FMT numunelerin kuvvet-% genleme eğrileri.....	137
Şekil 4.31: Üç farklı delik formasyonuna sahip yüzeyi iyileştirilmiş ve iyileştirilmemiş FMT numunelerin maksimum kuvvet değerlerinin değişimi	139
Şekil 4.32: $\phi 5$ mm delikli yüzeyi iyileştirilmiş FMT numunelerin dijital kamera ile çekilen hasar bölgesi resimleri.....	141
Şekil 4.33: $\phi 5$ mm delikli yüzeyi iyileştirilmemiş FMT numunelerin dijital kamera ile çekilen hasar bölgesi resimleri.....	143
Şekil 4.34: $\phi 5$ mm delikli yüzeyi iyileştirilmiş FMT numunelerin optik mikroskop ile çekilen hasar bölgesi resimleri.....	144
Şekil 4.35: $\phi 5$ mm delikli yüzeyi iyileştirilmemiş FMT numunelerin optik mikroskop ile çekilen hasar bölgesi resimleri.....	146
Şekil 4.36: 7 farklı çapta ( $\phi 3$ mm, $\phi 4$ mm, $\phi 5$ mm, $\phi 6$ mm, $\phi 7$ mm, $\phi 8$ mm, $\phi 10$ mm) ve 4 farklı delik formasyonunda (A, B, C ve D) delik açılmış yüzeyi iyileştirilmiş FMT numunelerinin kuvvet-% genleme eğrileri .....	148
Şekil 4.37: 4 farklı delik dizilimi için delik çapına bağlı olarak maksimum kuvvet değerlerindeki değişim.....	149
Şekil 4.38: 4 farklı çapta ( $\phi 5$ mm, $\phi 6$ mm, $\phi 7$ mm, $\phi 8$ mm) ve 4 farklı delik formasyonunda (A, B, C ve D) delik açılmış yüzeyi iyileştirilmiş FMT numunelerinin dijital kamera ile hasar bölgelerin çekilmiş resimleri.....	151



## TABLolar DİZİNİ

Tablo 1.1: Polimer matrisli kompozit malzemelerin sınıflandırılması .....	4
Tablo 1.2: Metalik malzemeye bağlı olarak FMT tiplerinin sınıflandırılması.....	10
Tablo 3.1: PPS malzemesinin fiziksel, mekanik ve ısıl özellikleri .....	37
Tablo 3.2: Sıcak pres tekniği ile üretilen polimer matrisli kompozit ve fiber metal tabakalı kompozitin fiber takviyesi olarak kullanılacak olan cam elyaf keçe malzemesinin ürün spesifikasyonu .....	38
Tablo 3.3: Alüminyum levha malzemesinin fiziksel, mekanik ve termal özellikleri	39
Tablo 3.4: Metal yüzeyleri modifiye etmek için yapılan tüm yüzey iyileştirmeler ...	40
Tablo 3.5: Kimyasal asit dağlayıcıları ve uygulama yöntemleri.....	43
Tablo 3.6: AC ve DC elektrokimyasal iyileştirme.....	44
Tablo 3.7: Üretilmesi hedeflenen FMT malzemelerin metal takviyesi olan alüminyum levhaya uygulanan yüzey iyileştirme yöntemleri ve uygulanış biçimleri .....	46
Tablo 3.8: Sıcak pres üretim parametreleri .....	51
Tablo 3.9: TA Instruments marka Q200 DTK test cihazının teknik özellikleri .....	54
Tablo 4.1: Düz darbe uçları ile darbe yüklemesine maruz bırakılan kompozit numunelerin geri gelme enerjileri .....	80
Tablo 4.2: Düz darbe uçları ile darbe yüklemesine maruz bırakılan kompozit numunelerin absorbe edilen enerjiler .....	81
Tablo 4.3: Yarı küresel darbe uçları ile darbe yüklemesine maruz bırakılan kompozit numunelerin geri gelme enerjileri .....	82
Tablo 4.4: Yarı küresel darbe uçları ile darbe yüklemesine maruz bırakılan kompozit numunelerin absorbe edilen enerjileri.....	82
Tablo 4.5: Bölgesel delikli FMT malzemelerin $\phi 10$ mm düz ve yarı küresel darbe ucu ile gerçekleştirilen düşük hızlı darbe yüklemelerinden elde edilen absorbe edilen enerji değerleri .....	91
Tablo 4.6: Cam elyaf keçe takviyeli PPS kompozitin (A), Bölgesel delikli yüzeyi iyileştirilmemiş fiber metal tabakalı kompozitin (B) , Tüm yüzeyi delikli yüzeyi iyileştirilmemiş fiber metal tabakalı kompozitin (C), Tüm yüzeyi delikli ve yüzeyi iyileştirilmiş fiber metal tabakalı kompozitin (D) $\phi 10$ mm çaplı yarı küresel darbe ucu ile gerçekleştirilen düşük hızlı darbe yüklemelerinden ölçülen absorbe edilen enerji değerleri .....	102
Tablo 4.7: Cam elyaf keçe takviyeli PPS kompozitin (A), Bölgesel delikli yüzeyi iyileştirilmemiş fiber metal tabakalı kompozitin (B) , Tüm yüzeyi delikli yüzeyi iyileştirilmemiş fiber metal tabakalı kompozitin (C), Tüm yüzeyi delikli ve yüzeyi iyileştirilmiş fiber metal tabakalı kompozitin (D) $\phi 10$ mm çaplı düz darbe ucu ile gerçekleştirilen düşük hızlı darbe yüklemelerinden ölçülen absorbe edilen enerji değerleri.....	102
Tablo 4.8: Cam elyaf keçe takviyeli PPS kompozitin (A), Bölgesel delikli yüzeyi iyileştirilmemiş fiber metal tabakalı kompozitin (B) , Tüm yüzeyi delikli yüzeyi iyileştirilmemiş fiber metal tabakalı kompozitin (C), Tüm yüzeyi delikli ve yüzeyi iyileştirilmiş fiber metal tabakalı kompozitin (D) $\phi 10$ mm çaplı yarı	

küresel darbe ucu ile gerçekleştirilen düşük hızlı darbe yüklemelerinden ölçülen toplam yer değiştirme değerleri .....	103
Tablo 4.9: Cam elyaf keçe takviyeli PPS kompozitin (A), Bölgesel delikli yüzeyi iyileştirilmemiş fiber metal tabakalı kompozitin (B) , Tüm yüzeyi delikli yüzeyi iyileştirilmemiş fiber metal tabakalı kompozitin (C), Tüm yüzeyi delikli ve yüzeyi iyileştirilmiş fiber metal tabakalı kompozitin (D) $\phi$ 10 mm çaplı düz darbe ucu ile gerçekleştirilen düşük hızlı darbe yüklemelerinden ölçülen toplam yer değiştirme değerleri .....	103
Tablo 4.10: Cam elyaf keçe takviyeli PPS kompozit malzemelerin üç nokta eğilme deneyleri sonucunda elde edilen maksimum kuvvet, eğilme dayanımı, eğilme gerinimi ve eğilme modüllü değerleri .....	111
Tablo 4.11: TAKD testleri sonucunda elde edilen veriler .....	123
Tablo 4.12: Kısa kiriş kayma dayanımı testleri sonucunda elde edilen veriler .....	124
Tablo 4.13: Delikli FMT numunelerin üç nokta eğilme test sonuçları .....	128
Tablo 4.14: $\phi$ 3 mm ve $\phi$ 5 mm delikli FMT numunelerin ara yüzey dayanımının belirlenebilmesi için yapılan TAKD testinin deney sonuçları .....	130

## SİMGELER DİZİNİ

$T_g$	: Camsı geçiş sıcaklığı ( $^{\circ}\text{C}$ )
$v_f$	: Fiber hacim oranı
$w_f$	: Fiber ağırlığı
$w_m$	: Matris ağırlığı
$\rho_f$	: Fiber yoğunluğu
$\rho_m$	: Matris yoğunluğu
$\phi$	: Delik çapı (mm)
$\sigma$	: Eğilme dayanımı (MPa)
$P$	: Uygulanan kuvvet (N)
$L$	: İki destek arası mesafe (mm)
$w$	: Eğilme numunesi genişliği (mm)
$b$	: Eğilme numunesi kalınlığı (mm)
$\tau$	: Tabakalar arası kayma gerilmesi (MPa)
$P$	: Maksimum yük (N)
$b$	: Tabakalar arası kayma numunesi genişliği (mm)
$h$	: Tabakalar arası kayma numunesi kalınlığı (mm)

## Kısaltmalar

PPS	: Polifenilen sulfid
FMT	: Fiber metal tabakaları
GLARE	: Cam fiber takviyeli alüminyum
ARALL	: Aramid fiber takviyeli alüminyum
CARALL	: Karbon fiber takviyeli alüminyum
TAKD	: Tabakalar arası kayma dayanımı
PP	: Polipropilen
PEEK	: Polietereterketon
TEM	: Taramalı elektron mikroskobu
ASTM	: American Society of Testing Materials
ISO	: International Organization for Standardization
NaOH	: Sodyum hidroksit
AC	: Alternatif akım
DC	: Doğru akım
CAE	: Kromik sülfirik asit
P2	: Sulfo-ferrik asit
FPL	: Forest product laboratory
CAA	: Kromik asit anodik oksidasyon
PAA	: Fosforik asit anodik oksidasyon
SAA	: Sülfirik asit anodik oksidasyon
BSAA	: Borik-Sülfirik asit anodik oksidasyon
AC-PAA	: Alternatif akımlı fosforik asit anodik oksidasyon

AC-SAA	: Alternatif akımlı Sülfirik asit anodik oksidasyon
MEK	: Metil etil keton
$\gamma$ -GPS	: $\gamma$ -glycidoxypropyltrimethoxyysilan
$\gamma$ -APS	: $\gamma$ -aminopropyltrimethoxyysilan
DTK	: Diferansiyel taramalı kalorimetre
TDA/KA	: Toplam delik alanı/kapalı alan
FOV	: Field of view
GMT	: Cam elyaf keçe takviyeli termoplastik
F-t	: Kuvvet-zaman
E-t	: Enerji-zaman
FRP	: Fiber takviyeli polimer
ZGDH	: Çok zor görülebilen darbe hasarı
PMMA	: Polimetilmetakrilat
TKK	: Tekil konsol kiriş metodu
ÇKK	: Çift konsol kiriş metodu
CTOD	: Crack tip opening displacement
E/D	: Kenar uzaklık oranı
W/D	: Numune genişliği/delik çapı oranı

## POLİFENİLEN SULFİD (PPS) MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN TABAKALAR ARASI KAYMA DAYANIMLARININ İYİLEŞTİRİMESİ

**Mustafa Özgür BORA**

**Anahtar Kelimeler:** Sıcak pres tekniği, Yüzey iyileştirme yöntemleri, Fiber metal tabakaları, Termoplastik Matrisli Kompozit, Ara yüzey dayanımı, Delik Formasyonu

**Özet:** Cam elyaf keçe takviyeli polifenilen sulfid kompozitleri (GMT-PPS) kısa üretim süresi ve mükemmel özellikleri nedeni ile otomotiv uygulamalarında kullanılmaktadır. Birçok mühendislik uygulamalarında GMT malzemesi için en önemli ilgi darbe yüklemesine karşı dirençleridir. Bu çalışmada, GMT-PPS sıcak pres tekniği ile üretilmiştir. Düşük hızlı düşen ağırlık darbe testleri ile GMT-PPS malzemesinin darbe davranışı belirlenmiştir. Darbe hasarına maruz bırakılmış GMT-PPS malzemelerinde oluşan hasar tipleri, hasar başlangıcı ve ilerlemesi bilgisayarlı tomografi analizleri ile saptanmıştır. Ek olarak, darbe yüklemesine maruz bırakılmış GMT-PPS numunelerin artık eğilme dayanımları ve modüllerinin tespiti için üç nokta eğilme testleri gerçekleştirilmiştir.

Fiber metal tabakaları (FMT), fiber takviyeli polimer kompozit katmanlar ile adezif olarak ince metal levhaların birleşiminden oluşan hibrit kompozit malzemelerdir. Bu çalışma, cam elyaf keçe takviyeli polifenilen sulfid (PPS) kompoziti ve alüminyum alaşımı içeren yüzeyi iyileştirilmiş, mekanik bağlantılı ve hem yüzeyi iyileştirilmiş hemde mekanik bağlantılı FMT malzemelerinin tabakalar arası kayma dayanımı (TAKD) ve darbe dayanımını karakterize etmektedir. FMT malzemesinin adezif yapışması için silan konsantrasyonunun belirlenmesinden sonra alüminyum katlar ve kompozit tabakalar arasında mekanik bağlantı oluşturmak için farklı dairesel delik formasyonlarına sahip alüminyum levhalar içeren yeni nesil FMT malzemeler sıcak pres tekniği ile Kocaeli Üniversitesi İleri Malzemeler Laboratuvar'ında üretilmiştir. Çekme testleri, TAKD ve düşük hızlı düşen ağırlık darbe testleri, FMT malzemelerinin TAKD özelliklerine farklı delik formasyonlarının etkisini belirlemek için gerçekleştirilmiştir. Optik mikroskop ve dijital kamera analizleri ile farklı dairesel delik formasyonlarına sahip FMT malzemelerde çekme ve darbe yüklemeleri nedeniyle oluşan hasar tipleri, hasar başlangıcı ve ilerlemesi belirlenmiştir.

## **IMPROVEMENT OF INTERLAMINAR SHEAR STRENGTH OF POLYPHENYLENE SULPHIDE (PPS) MATRIX COMPOSITES**

**Mustafa Özgür BORA**

**Keywords:** Hot press technique, Surface Treatments, Fiber metal laminates, Thermoplastic matrix composites, Interfacial strength, Hole formations

**Abstract:** Glass mat-reinforced polyphenylene sulphide composites (GMT-PPS) have been succeeded in automotive application because of their excellent properties and short processing time. Resistance to impact loading is of major concern in GMT for many engineering applications. In this study, GMT-PPS are manufactured with hot press technique. The impact behavior of GMT-PPS is determined under low velocity drop weight impact tests. Failure modes, damage initiation and progression of impacted GMT-PPS are determined with computed tomography analysis. In addition, residual flexural strength and modulus of impacted GMT-PPS samples are determined with three point bending tests.

Fiber metal laminates (FML) are hybrid composite materials consisting of thin metal sheets adhesively bonded together with fibre reinforced polymer composite layers. This study characterizes the surface treated, mechanical bonded and both surface treated and mechanical bonded FMLs's interlaminar shear strength (ILSS) and impact strength based on a glass mat reinforced polyphenylene sulphide (PPS) composite and an aluminium alloy. After determining the silane concentration for adhesive bonding of FMLs, novel FML materials are manufactured in Advanced Materials Laboratory of Kocaeli University using a hot press technique which involves aluminium sheets with different circular hole formations to develop mechanical bonding between aluminium layers and composite laminates. Tensile tests, ILSS and low velocity drop weight impact tests were performed to investigate the effect of different circular hole formations on ILSS properties of FMLs. After impact and tensile tests, failure modes, damage initiation and progression of FMLs with different circular open hole formations are determined with optical microscope and digital camera.

## 1. GİRİŞ

### 1.1. Polimer Matrisli Kompozit Malzemeler

Malzeme sektörü, ekonomide tüm faaliyetlere girdi sağlayan temel, yayılgan (jenerik) alanlardan biridir. Bu niteliği açısından mikro-elektronik, biyoteknoloji ve nanoteknoloji ile birlikte sınai üretimin karakterini dönüştürecek ana teknolojik alanlardan biri olarak kabul edilmektedir. Savunma, havacılık, mikro-elektronik, iletişim ve otomotiv sektörlerinde kullanılacak ileri malzemelerin ortaya çıkışı, malzeme biliminin bu gereksinimleri karşılayabilecek çok disiplinli, proses ağırlıklı bir alana dönüşmesiyle birlikte ilerlemektedir. Bu bağlamda polimerik ve kompozit malzemeler, akıllı ve işlevsel malzemeler, optoelektronik malzemeler gibi önümüzdeki yıllarda önemli çekim alanları oluşturacak ileri malzeme alanları, ülkemiz için de önemli fırsat alanlarıdır. İlk modern sentetik plastiklerin 1900'lerin başında geliştirilmesinin ardından, 1930'ların sonunda plastik malzemelerin özellikleri diğer malzeme çeşitleri ile boy ölçüşür düzeyde gelişmeye başlamıştır. Kolay biçim verilebilir olması, metallere oranla düşük yoğunlukta olması, üstün yüzey kalitesi ve korozyona karşı dayanımı plastiğin yükselmesindeki en önemli özelliklerdir. Bir çok üstün özelliğinin yanı sıra sertlik ve dayanıklılık özelliklerinin düşük olması plastik malzemelerin güçlendirilmesi için çalışmalar yapılmasına neden olmuştur. Bu eksikliğin giderilmesi amacıyla 1950'lilerde polimer esaslı kompozit malzemeler geliştirilmiştir. Kompozitler, özellikle polimer kompozitler yüksek mukavemet, boyut ve termal kararlılık, sertlik, aşınmaya karşı dayanıklılık gibi özellikleriyle pek çok avantajlar sunarlar. Ayrıca kompozit malzemeler dayanıklılık ve sertlik yönünden metallerle yarışabilecek olmasının yanında çok da hafiftirler [1].

Çeliğin bulunmasından beri mühendislik tasarımlarında metaller ilk tercih edilen malzemeler olmuşlardır. Yüksek spesifik mekanik özellikler, yüksek rijitlik /ağırlık oranı ve yüksek dayanım/ağırlık oranına sahip malzemelere olan ihtiyaç nedeniyle metal malzemelerin yerine kompozit malzemelerin askeri alanlarda kullanılmak

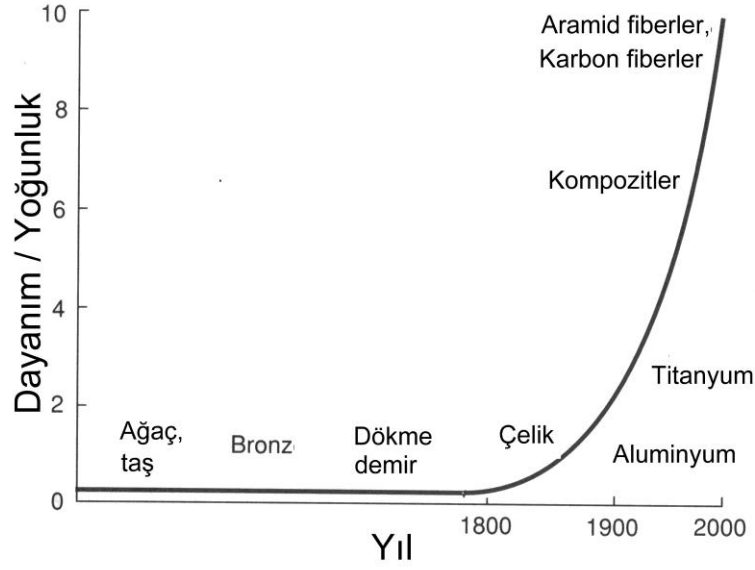
üzere kurşun geçirmez yeleklerde, tankın parçalarında ve savaş jetlerinde kullanımını arttırmıştır. Kompozit malzemeler ayrıca sivil havacılık uygulamalarında, otomotiv endüstrisinde ve taşımacılıkta yaygın olarak kullanılmaktadır [2].

Polimerler yapıları gereği metal ve seramik esaslı konvansiyonel malzemelerden farklıdır. Diğer malzemelerden avantajlı yanları ön plana çıkartılarak kullanım alanları giderek genişlemektedir. Polimer ve polimer kompozitlerin başlıca hedefleri en az çelik kadar sağlam, olabildiğince hafif, yüksek kullanım sıcaklıklarına dayanıklı ve ekonomik malzeme üretimidir. Günümüzde ileri mühendislik malzemelerinin kullanımında hiç şüphesiz otomotiv sektörü en büyük payı almaktadır. Otomobillerde çeşitli polimer malzemelerin kullanımı % 10 civarında ise de tamponlar gibi bazı özel uygulamalarda polimer kompozitler rakipsizdir.

Bunun yanı sıra örneğin bakırdan daha iyi derecede elektrik iletkenliği bulunan özel bazı polimer sistemlerin yapılması ile polimerik ileri malzeme spektrumu olabildiğince genişlemiştir [3]. Çeşitli mühendislik uygulamalarında metallerin yerine tercihen kullanılan polimer kompozitler sadece hafiflik, mekanik dayanım gibi özellikler değil, insan dokuları ile uyum sağlayan ve sertlik değerleri ayarlanabilen yapay doku ve organlar gibi uygulamaların dışında "optik fiberler" ve basınç ile elektrik üretebilen" piezoelektrik özellikli ve istenildiği gibi işlenebilen özel sistemlerin yapımında da metal ve seramik malzemelerin yerlerine kullanılmaktadır.

Kompozit malzemelerin kullanımı yaygınlaşmaktadır. Kompozitler yüksek dayanım ve rijitlikle birlikte hafiflik isteği doğrultusunda şekillenmektedir. Sonuçta yüksek performanslı (ve pahalı) malzemeler uçaklar, uzay ve savunma uygulamalarında giderek artan bir şekilde kullanıldığı gibi spor ekipmanları, golf sopası, olta gibi yerlerde de kullanılmaktadır. Örneğin, cam fiber takviyeli polimer kompozitler gibi daha ekonomik kompozitler otomotiv elemanları, tekne omurgası, spor ekipmanları ve mobilya alanlarında giderek artan şekilde kullanılmaktadır [4]. Şekil 1.1'de tarih boyunca malzemelerin dayanım/yoğunluk oranları verilmektedir. Görüldüğü gibi 20. yüzyılda kompozit malzemelerin keşfiyle dayanım/yoğunluk oranında hızlı bir artış olmuştur. Bu da kompozit malzemelerinin havacılık gibi bazı kritik uygulamalarda gerekliliğini açıkça göstermektedir [4].





Şekil 1.1: Malzemelerin dayanım/yoğunluk oranlarının tarihsel gelişimi [4]

Polimer kompozitlere neden gereksinim olabilir? Bu soruyu cevaplamak için kullanılan malzemede ne gibi özellikler istediğimizi bilmemiz gerekir. Malzemede yerine göre dayanım, esneklik, hafiflik, çevre şartlarına (nem, güneş ışınları vb.) dayanıklılık, darbe dayanımı, sertlik gibi günlük yaşamda kullanılan terimlerle ifade edilen özellikler yanında daha bilimsel bir dille ısı genleşme katsayıları, yorulma, kırılma, çekme, eğme dayanımları ve benzeri özelliklerin uygunluğu aranır. Bütün istenen özellikleri tek bir metal, seramik veya polimer malzemede bulmak son derece ender rastlanan bir olaydır. 1950'lerden beri polimer kompozitler çok önemli bir boşluğu doldurmuştur. Bugün yaygın olarak uçak, roket, füze gövdeleri, yüksek kalitede spor malzemeleri, yapay kemik gibi maliyetin yüksekliğinin pek önemli olmadığı alanlarda kullanıldığı gibi otomobil lastiği, otomotiv sanayi, beyaz eşya, basınç dayanımlı boru ve deniz araç gövdeleri gibi geniş bir spektrumda işlev görmektedirler [5].

Önümüzdeki yıllarda uzay ve havacılık başta olmak üzere, robotik ve tıp alanında ve gelişen diğer teknolojilerde polimer kompozitlere daha da çok ağırlık verileceği açıktır. Bu amaçla hem daha güçlü ve sağlam fiberler, hem de daha yüksek ısı dayanımlı, çatlak oluşturmeyen, darbe dayanımı yüksek ve sert polimer matrisler üzerinde çalışmalar dünyada ve ülkemizde devam etmektedir [5]. Polimer kompozit malzemelerin sınıflandırılması Tablo 1.1'de gösterilmiştir.

Tablo 1.1: Polimer matrisli kompozit malzemelerin sınıflandırılması

Polimer Matrisli Kompozitler			
A.Fiber takviyeli		B.Partikül takviyeli	
A.1.Tek katmanlı		A.2.Çok katmanlı	B.1.Rastgele yönlü
A.1.1.Sürekli fiber	A.1.2.Kısa fiber	Laminatlar	B.2.Tercihli yönlü
A.1.1.1.Tek yönlü	A.1.2.1.Rastgele yönlü	Hibritler	
A.1.1.2.İki yönlü	A.1.2.2.Tercihli yönlü		

### 1.1.1. Fiber takviyeli kompozitler

Bu kompozit tipi ince fiberlerin matris içinde yer almasıyla meydana gelmiştir. Fiberlerin kompozit dokusundaki yerleşimi kompozit malzemenin dayanımını etkileyen önemli bir unsurdur. Sürekli fiberlerin matris içinde birbirlerine paralel şekilde yerleştirilmeleri ile fiberler doğrultusunda yüksek dayanım sağlanırken, fiberlere dik doğrultuda düşük dayanım elde edilir. İki boyutlu yerleştirilmiş (dokuma) fiber takviyelerle her iki yönde de eşit dayanım sağlanırken, matris içerisinde rasgele dağılmış kısa fiberlerle ise izotrop bir yapı oluşturmak mümkündür. Fiberlerin dayanımı kompozit malzemenin dayanımı açısından çok önemlidir. Ayrıca, fiberlerin uzunluk/çap oranları arttıkça matris tarafından fiberlere iletilen yük miktarı artmaktadır. Fiberlerin yapısal kusurlarının olmaması da dayanım açısından çok önemlidir. Kompozit malzemenin dayanımında önemli olan diğer bir unsur ise fiber ile matris arasındaki bağın özellikleridir. Matris içinde boşluklar söz konusu ise fiberlerle temas azalacaktır. Nem absorpsiyonu da fiber ile matris arasındaki bağı azaltan olumsuz bir özelliktir [5]. Fiber takviyesi kompozite dayanım ve sertlik sağlarken matris taşıyıcı iskeleti tutar. Fiber takviyeler (uzun sürekli fiberler, kumaş dokuma, kısa doğranmış fiberler ve örülmüş) farklı biçimlerde bulunabilirler. Her bir şekil farklı bir özellikte sonuçlanır. Özellikler ağırlıklı fiberlerin kompozit içindeki yerleşimlerine bağlıdır. Kompozitler hakkında bilinmesi gereken önemli şeylerden biri de fiberlerin yükü taşıdığı ve dayanımın fiberin eksenine boyunca maksimum olduğudur. Uygulamanın tipine (yapısal veya yapısal olmayan) ve üretim metoduna bağlı olarak fiber şekli seçilir. Endüstriyel uygulamalar için sürekli veya uzun fiberler tavsiye edilir. Oysa yapısal olmayan uygulamalar için kısa fiberler tavsiye edilir. Enjeksiyon ve basınç kalıplamasında kısa fiberler kullanılırken

elyaf sarma (filament winding), profil çekme (pultrusion) ve rulo sarma (roll wrapping)'de sürekli fiberler kullanılır [6].

### **1.1.2. Cam elyaf keçe takviyeli polifenilen sulfid (PPS) kompoziti oluşturan bileşenlerin üstünlükleri ve çalışma kapsamında seçilmesinin nedenleri**

Deneysel çalışmalarda kullanılan cam elyaf keçe takviyeli Polifenilen sulfid (PPS) kompozitler rastgele yönlenmeli kısa fiber takviyeli kompozitler sınıfına girmektedirler. Cam elyaf keçe takviyesi çabuk ve kolay ıslanabilirliği, elyaf yapısı nedeniyle düşük reçine tüketimi, sıcak pres kalıplarına çok kolay yatırılma ve kolay işlenebilirlik gibi özellikleri nedeniyle özellikle otomotiv endüstrisinde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Cam elyaf keçe takviyesinde fiberlerin kısa oluşu sıcak pres ile imalat esnasında erimiş haldeki PPS'nin fiberlerin yüzeylerini daha rahat ıslatabilmesi ve bu sayede daha iyi bir ara yüzey oluşturabilme imkanı vermektedir. Islatabilme özelliğinin yanı sıra üretilen polimer matrisli kompozitlerin takviye elemanı olan cam elyaf keçeyi oluşturulan fiberlerin kısa oluşunun bir diğer yararı ise sıcak pres üretimi esnasında uygulanan basınç işlemi esnasında erimiş haldeki PPS ile birlikte kalıp çerçevesinden sürekli fiber katmanlar gibi çıkmamasıdır. Bu sayede üretilen polimer matrisli kompozitin her yerinde yaklaşık aynı oranda takviye elemanı bulunmaktadır.

Termoplastik polimerlerinin çeşitlerinin çok fazla olmasına rağmen matris olarak kullanılan polimerler sınırlıdır. Termoplastiklerin termosetlere göre matris olarak kullanımları daha az olmakla birlikte üstün kırılma tokluğu, raf ömrünün uzun olması, geri dönüşüm kapasitesi ve sertleşme prosesi için organik çözücülere ihtiyaç duymaması gibi avantajları nedeni ile endüstriyel uygulamalarda tercih edilmektedirler. Bunun yanı sıra şekil verilen termoplastik parça işlem sonrası ısıtılarak yeniden şekillendirilebilir. Termoplastikler yüksek sertlik ve darbe dayanımı özelliğine de sahiptirler [7].

PPS aromatik bir termoplastik olup yüksek derecede ısıya karşı mukavemet göstermektedir. 220° C altında kullanılabilir. Ateşe ve tutuşmaya karşı mukavemetli olup, mükemmel derecede kimyasallara karşı mukavemet gösterir. Su absorpsiyonu

son derece düşük olup iyi derecede elektriksel özelliklere sahiptir. Belirtilen özellikleri nedeniyle otomotiv sektöründe; elektrik elektronik aksamalarda, yakıt sistemlerinde, ısıtma soğutma sistemlerinde, şanzıman parçalarında vb. kullanılır. Elektrik sektöründe; kontaktör, switch ve motor aksamalarında kullanılmaktadır.

Sıcak pres tekniği yüksek hacim ve basınç altında, karmaşık yada düzlemsel cam elyaf takviyeli termoset veya termoplastik üretimi için uygun bir yöntemdir. Oldukça büyük parçalar mükemmel son bitirme yüzeyi ile kalıplanabilir. Genel olarak termoset reçineler kullanılır. Eş çalışan kalıplar, hidrolik kalıplama presine tesbit edilir. Levha veya döküm kalıplama bileşimi miktarı veya reçine eklenmiş ön biçimlendirilmiş veya cam keçe ile preste açık kalıp içerisine yerleştirilir. Ön biçimlendirilmiş veya keçe kalıplama durumunda ise ya önce ya da takviye elemanı sonrası reçine kalıp içindeki parça şekline bağlı olarak ilave edilebilir. Otomobil tamponları, ev aletleri ve elektrik parçaları tipik üretilen parçalardır. Yüksek kalıplama sıcaklıkları ve basınçları gerekli olmadığından oldukça düşük takım maliyeti ile basit, iyi yüzey görünümlü ve iyi mekanik özelliklere sahip boyutsal olarak hassas yüzeyler elde edilebilir. Sıcak pres tekniği ile üretilmesi hedeflenen cam elyaf keçe takviyeli PPS kompozitlerinin özellikle otomotiv sektöründe kullanılan malzemelere alternatif olacağı düşünülmektedir.

## **1.2. Polimer Matrisli Kompozitlerin Darbe Yüklemesine Karşı Davranışı**

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

büyük uzamalarda akabilirler, bu nedenle oluşacak kopmalar ani ve beklenmedik olmaz. Kompozit malzemelerde bir darbe sonucunda oluşan hasar, çarpmanın türüne göre darbeye maruz kalmayan yüzeyde de meydana gelebilir, içyapıda oluşan delaminasyonlar (tabakalar arasında ayrılma) şeklinde başlayabilir. Metallerde darbe cevabı, plastik şekil değiştirme sonucunda bir kopma şeklinde olmasına rağmen, kompozitler çok değişik modlarda hasara uğrayabilirler ve bu hasar modlarında parçanın bütünlüğünde ciddi bir değişiklik meydana gelmez. Genellikle gözle görülmeyen veya çok az görülebilen hasarlar meydana gelir. Termoset matrisli kompozit malzemelerin hemen tamamı kırılıgandır, bu nedenle enerjiyi sadece elastik deformasyon ve bazı hasar mekanizmaları (matris kırılması, delaminasyon, fiber kopması v.b) sayesinde absorbe edebilirler, diğer bir deyişle enerjiyi absorbe etmede plastik deformasyonun katkısı hemen hemen hiç yoktur. Bu anlamda hasar direnç ifadesi, bir kompozit sistemde meydana gelen darbe hasarının miktarını ifade eder [8].

Fiber takviyeli polimer matrisli kompozitlerin düşük hızlı darbe yüklemeleri de dahil enine yüklemeler nedeni ile yapı içerisinde oluşan iç hasara karşı yüksek oranda hassas oldukları bilinmektedir [9]. Örneğin havacılık uygulamalarında kullanılan polimer kompozitlerin uçuş pisti kırıntıları (enkazları), dolu, bakım hasarları (alet düşmesi), servis araçlarının yada kargo ile yapı arasındaki çarpışma, kuş çarpmaları, pervanedeki buzların gövdeye çarpması, motor enkazı ve lastik kopması gibi darbe yüklemelerine maruz kaldığı saptanmıştır [10]. Darbe yüklemelerine karşı kompozit malzemelerin bu duyarlılığı nedeniyle endüstriyel uygulamalarda daha fazla kullanımlarını ciddi bir şekilde etkilemesine rağmen, bu malzemelerin darbe esnasında oluşan enerjinin matris hasarı (tabakalar içi ve tabakalar arası çatlaklar), fiber kırılması, fiber-matris ayrılması, tabaka yarılması, delaminasyon, fiber soyulması ve fiber çekme hasarı şeklindeki hasar mekanizmaları ile absorbe edildiği belirtilmektedir [9,11,12]. Bu nedenle uçak, helikopter ve araba parçalarında kullanılan kompozit malzemelerin düşük hızlı darbe yüklemeleri gibi yapıyı hasara uğratabilecek potansiyel dış yüklemelere karşı davranışı ve yapıda oluşan hasar mekanizmalarının incelenmesi gereken önemli bir konudur. Düşük hızlı darbe yüklemelerinde malzemenin hem yüzeyinde hem de iç kısmında oluşan hasar mekanizmalarının hangi darbe enerjisinde oluştuğu kuvvet-zaman, enerji-zaman ve

kuvvet-darbe ucunun yer değiştirmesi eğrilerinden anlaşılacağı gibi darbe uygulanan numuneye yapılan tahribatsız muayene yontemleri yardımı ile de belirlenebilmektedir. Yapılan literatür araştırmasında, polimer matrisli kompozit malzemeler için düşük hızlı darbe yüklemeleri sonucunda ortaya çıkan hasar mekanizmaları ultrasonik C-tarama, hızlı kamera ile fotoğraflama, X-ray, optik mikroskop ve termografi yontemleri ile açıklanmıştır [13-19]. Gerçekleştirilen literatür araştırmalarında bilgisayarlı tomografi ile darbe yüklemesine maruz kalmış polimer matrisli kompozitlerde oluşan hasar mekanizmalarının tespitine rastlanmamıştır. Bu çalışmada düşük hızlı düşen ağırlık darbe yüklemeleri ile numunelerde oluşan hasar mekanizmalarının tespitinde bilgisayarlı tomografi kullanılmıştır.

### **1.2.1. Polimer kompozit malzemelere uygulanan darbe testleri**

Tabakalı kompozit malzemelerin darbe direncinin, bir cismin kompozit malzemeye enine doğrultudaki darbesini simule eden testlerle karakterize edilebileceği bilinmektedir. Birçok test tekniği darbe üretmek için kullanılmaktadır. Bununla birlikte kompozit malzemelerin darbe davranışını karakterize etmek için standart bir test tekniği veya farklı ülkeler, kuruluşlar ve araştırmacılar arasında yaygın bir şekilde kabul edilen herhangi bir teknik mevcut değildir. Bu durum, farklı kaynaklardan alınan sonuçların karşılaştırılacağı zaman, kompozit malzemelerin darbe cevabı için uygun bir model geliştirme girişimleri için problem yaratmaktadır. Bu olumsuzluklara rağmen kompozit malzemelerin darbe dirençlerinin belirlenmesi amacıyla günümüzde aşağdaki test yontem ve cihazları yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunlar genellikle üç kategoride sınıflandırılabilirler; Ağırlık düşürme testleri, Sarkaç testleri (Izod ve Charpy) ve Hava veya Gaz silah testleri (düşük hız veya balistik testler) [8].

Son yıllarda kompozit malzemelerin düşük hızdaki darbe özelliklerini karakterize etmek için sarkaç veya ağırlık düşürme darbe test cihazlarının bir araya getirilmesiyle oluşturulmuş test düzeneklerinin kullanımı giderek artmaktadır. Ağırlık düşürme test yontemi, kompozit malzemelerin darbe testleri için tercih edilen bir yontemdir. Bunun en önemli sebebi daha geniş bir alanda test parametrelerinin

belirlenebilmesidir. Sonuçlar çok daha kolay analiz edilebilmektedir [8]. Bu cihazların bazıları yer değiştirmeyi veya ivmelenmeyi ölçmektedirler. Bu sayede yük, yer değiştirme ve ivmelenmenin çarpma esnasındaki değişimi kaydedilir. Bu sonuçlar, darbe yükü-zaman ve darbe enerjisi-zaman değişimlerine dönüştürülebilir. Bunlar sayesinde, en uç noktadaki yk ve absorbe edilen enerji gibi özellikler malzemede meydana gelen kırılma işlemiyle ilişkilendirilebilirler. Kompozit malzemelerin darbe özelliklerini darbe test cihazı (serbest ağırlık düşürme, sarkaç, silah v.b), çarpan cismin karakteristiği (içi dolu veya boş, uç şekli ve boyutu v.b), çarpan cismin hızı ve kütlesi (veya enerjisi), numunenin konfigürasyonu (boyutu, geometrisi, numune ve destek noktalarındaki uçların sabitlenmesi v.b) etkilemektedir. Bu nedenle kompozit malzemelerin darbe özellikleri söz konusu olduğu zaman tüm bu ölçütlerin de göz önünde bulundurulması gerekmektedir [8].

### **1.3. Fiber Metal Tabakaları (FMT) ve Cam Elyaf Keçe/Alüminyum Levha/ PPS İçeren FMT'in üretiminin Nedenleri**

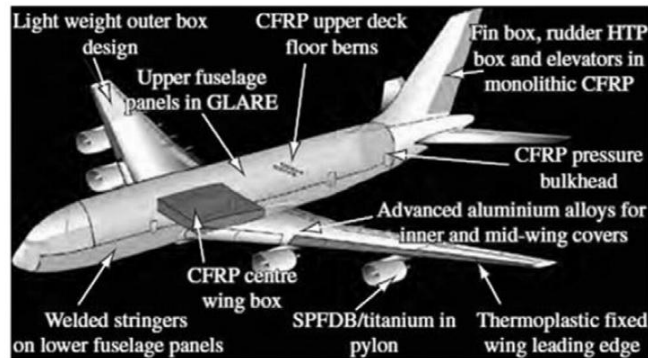
1950'lerden beri jet uçağının servis içi yapısal hasarları uçuş güvenliğini geliştirmek için tasarımcıları ve malzeme mühendislerini düşünmeye sevk etmiştir. Hasar toleransı, karmaşık hasar tiplerinin daha iyi anlaşılması, bakımın geliştirilmesi ve (yorulma, korozyon, darbe dirençli alaşımlar ve dayanıklı yapışma yöntemi uygun malzeme seçimi ile) iyileştirilebilir [10]. Fiber metal tabakalar (FMT) ncelikle modern sivil havacılık uygulamalarında yorulma dayanımı için geliştirilmiştir. Bununla birlikte, bu malzemenin çeşitli durumlarda darbe direnci, yanma direnci ve hasar toleransı gibi özelliklerinin de iyi olduğu saptanmıştır [20]. FMT, fiber takviyeli polimer katmanlara yapışmış metal katmanlar içeren ileri hibrit malzeme sistemleridir. Fiber/metal kompozit teknolojisi metalik malzemeler ve fiber takviyeli matris sistemlerinin üstünlüklerinin birleşimini içermektedir. Metaller izotropik, yüksek yük taşıma (yataklama) dayanımı, darbe direnci ve kolay onarım gibi özelliklere sahip iken kompozit malzemeler mkemmek yorulma karakteristiği, yüksek spesifik dayanım ve modüle sahiptirler. Metallerin yorulma ve korozyon karakteristiği ile kompozitlerin onarım, darbe direnci ve düşük yük taşıma dayanımı gibi olumsuzlukları bu bileşim ile giderilmesi hedeflenmiştir [21,22]. Kavram genellikle alüminyum ile aramid ve cam fiberler, fakat ayrıca diğer bileşenlerle

uygulanmaktadır [23]. Tablo 1.2’de metalik malzemeye bağı olarak FMT tipleri sınıflandırılmıştır. Tablo 1.2’de belirtildiği gibi, metalik malzemeye bağı olarak üretilen FMT malzemeler iki kısma ayrılmaktadır; a. Alüminyum alaşımları içeren FMT malzemeler, b. Alternatif metal alaşımları içeren FMT malzemeler. Alüminyum alaşımları içeren FMT malzemeler ayrıca fiber takviyesine göre de Tablo 1.2’de belirtildiği gibi üç kısma ayrılmaktadır.

Tablo 1.2: Metalik malzemeye bağı olarak FMT tiplerinin sınıflandırılması

Fiber Metal Tabakalı Kompozitler	
Alüminyum alaşımları içeren FMT	Alternatif metal alaşımları içeren FMT
ARALL- Aramid fiber takviyeli/Alüminyum	Titanyum bazlı FMT
CARALL- Karbon fiber takviyeli/Alüminyum	Magnezyum bazlı FMT
GLARE- Cam fiber takviyeli/Alüminyum	

Bu tabakalar yoğunluk, dayanım bakımından ön emdirilmiş kumaş ve alaşım malzemelerinden daha iyi hasar toleransı sağladığı tespit edilmiştir. FMT bagaj çantalarının darbe direnci, hafif vagon şasesi ve uçak gövdesi gibi hafifliğin ve hasar toleransın istendiği uygulamalarda geleneksel alüminyum alaşımlı levhaların yerini almak için tasarlanmaktadır. [24]. Örneğin FMT yeni nesil Airbus A380 uçağının gövdesinde ve kanatlarında kullanılmaya başlanmıştır. Şekil 1.2’de FMT’in Airbus A380 uçağında kullanım yeri gösterilmiştir.



Şekil 1.2: Airbus A380 uçağında kullanılan metal/fiber malzemeler [25]

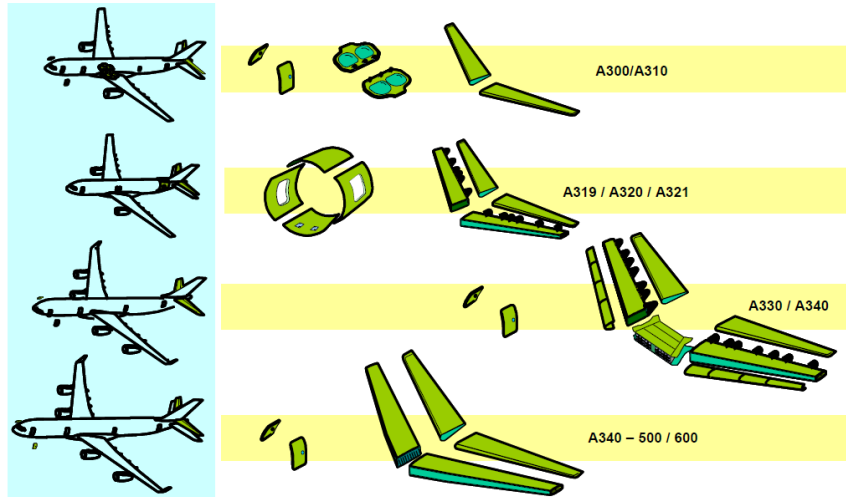


FMT'in kullanımı ile Airbus A380 uçağının yorulma ömrünün artması ve ağırlığının azalmasında ciddi katkılar sağladığı saptanmıştır [26]. Çalışma kapsamında otomotiv ve benzeri sektörlerde kullanılacak polimer kompozit malzeme üretiminin yanında uygun metal takviyesi ile üretilen cam elyaf keçe takviyeli PPS kompozitinin mekanik özelliklerinin geliştirilmesi hedeflenerek sıcak pres tekniğinde fiber metal tabakaları (cam elyaf keçe/ alüminyum levha/ PPS) üretimi gerçekleştirilmeye çalışılmıştır. Havacılık uygulamalarında kullanılan FMT sürekli fiber takviyelidir. Sürekli aramid, cam ve karbon fiberlerin yüksek maliyetli oluşu, uçak yapılarında montaj esnasında yapıya açılan deliklerin varlığı nedeniyle sürekli fiberlere çentik etkisinin oluşması ve yöne bağımlılık gibi dezavantajların ortadan kaldırılabilmesi için üretilmesi hedeflenen FMT'in takviye elemanı olarak cam elyaf keçe malzemesi seçilmiştir. Üretilen FMT malzemesi cam elyaf keçe malzemesinin sürekli fiber takviyesine göre daha düşük dayanıma sahip olacağı göz önüne alınarak uçağın dış gövdesi ayrı tutularak uçağın kargo bölümünde, bagaj koyma raflarında ve uçağın iç panellerinde alternatif olarak kullanılabilmesi ön görülmektedir. Bununla birlikte otomotiv sektöründeki uygulamalarda özellikle araç çamurluğu ve arka bagaj bloğunda kullanılması hedeflenmektedir.

Uçağın montajı esnasında uçağı oluşturan parçaların birbirine yapıştırılması ve parçaların delinerek cıvatalı yada pim bağlantılarının yapılması gibi bağlantı çeşitleri kullanılmaktadır. Perçinli ve cıvatalı bağlantılar ile oluşturulan bir uçak parçasının yük taşıma davranışının anlaşılması önem arz etmektedir. Yük taşıma dayanımı servis esnasında mekanik bağlantıların hasarlanmasının tahmin edilmesinde ve bağlantı tasarımları için önemli bir faktördür. GLARE (Cam fiber takviyeli/Alüminyum) tabakaların yapısı gereği izotropik olması nedeniyle geleneksel alüminyum alaşımlarına kıyasla yük taşıma dayanımının karakteristiğinin belirlenmesi çok daha karmaşıktır. GLARE tabakalarının yük taşıma testi pim tipli yük taşımada yanal destek olmadan yapılırken cıvatalı tip yük taşımada yanal destekleme oluşturularak gerçekleştirilmektedir. Açık ki, yanal destekle gerçekleştirilen cıvatalı tip yük taşıma pim tipi yük taşımaya göre daha iyi çıkmaktadır. Pim tipi yük taşımaya sahip bir GLARE malzemesinin düşük yük taşıma dayanımı delaminasyon burkulması nedeni olur. Cıvatalı tip yük taşımada ise bazı sınırlı delaminasyon oluşumları gözlenmesine rağmen herhangi bir

delaminasyon burkulması oluşmamaktadır. Alüminyum ile karşılaştırma yapılacak olursa, GLARE tabakalarının yük taşıma davranışı daha karmaşıktır. Bunun nedeni yapıdaki fiberlerin yük taşıma yüklemesi altında etkisizliğinden kaynaklanmaktadır. Bunun yanında, GLARE tabakalarının yük taşıma dayanımı bazı parametrelere dayanmaktadır: fiber tipi, matris tipi, fiber oryantasyonu, tabakaların dizilimi, fiber hacim oranı ve fiberlerin yüzey iyileştirmeleri gibi malzemeden gelen etkiler; bağlantı tipi (cıvatalı, pim, perçin vb.), bağlantı elemanının boyutu, delik boyutu, tolerans gibi bağlantıdan gelen etkiler ve tabaka kalınlığı, geometri (kenar uzunluğu, delik dizilimi, vb.), bağlantı tipi (tekil bağlantı, bindirme, vb.), yükleme doğrultusu ve yükleme hızı gibi tasarım etkileri [27].

Bir uçakta, geometrik çentikler (uçak parçalarının birbirine birleştirilmesi için açılan pim ve civata delikleri) tasarımcı tarafından yok edilemez. Uçağın parçalarının büyüklüğü nedeniyle monoblok olarak uçak üretilmemektedir. Uçağı oluşturan parçaların yerlerine yerleştirilmesi esnasında kullanılan binlerce perçin deliği (uçağın kapıları, pencereler ve kapaklar) nedeniyle ideal çentiksiz yapı bozulmaktadır. Şekil 1.3'te Airbus firmasının bünyesindeki uçak tiplerinde kullanılan FMT malzemeleri gösterilmiştir.



Şekil 1.3: Airbus firmasının bünyesindeki uçak tiplerinde kullanılan FMT malzemeleri [28]

Şekil 1.3'te görüldüğü gibi tüm bu süreksizlikler çentiğin etrafında gerilme konsantrasyonuna sebep olmaktadır ve malzeme üzerinden geçen kuvvet akışını bozmaktadır. Çoğu fiber takviyeli kompozit malzemelerde olduğu gibi GLARE veya

ARALL (Aramid fiber takviyeli/Alüminyum) malzemelerinde de tekil alüminyum alaşımlarına göre yüksek oranda çentiğe duyarlı oldukları saptanmıştır [29]. Literatürde gerçekleştirilen çalışmalarda fiber metal tabakalı kompozit üretiminde sürekli cam elyaf, karbon elyaf yada aramid elyaf kullanıldığı gözlemlenmektedir.

Doktora çalışması kapsamında üretilen fiber metal tabakalı kompozitlerde ise takviye elemanı olarak cam elyaf keçe seçilmiştir. Cam elyaf keçeyi oluşturan fiberlerin kısa fiber oluşu ve sıcak pres tekniği ile üretimde basınç ile istenilen boşluklara rahatlıkla dolabilmesi nedeni ile birleştirilmek istenen metal/cam elyaf-matrisin ara yüzeyinin yapışmasını mekanik olarak oluşturabileceği düşünülmüştür. Bu bağlamda üretilmesi hedeflenen uçak parçalarının montajında deliğin yarattığı çentik etkisinin negatif etkisini kısa fiber takviyesi ile avantaja dönüştürülmek istenmiştir. Açılması hedeflenen deliklere kısa fiber demetlerinin girmesi ile metal/fiber-matris ara yüzeyinin alüminyuma yapılan yüzey iyileştirmelerle kuvvetlendirilmesi yanında mekanik olarak da bağlanma sağlanması hedeflenmiştir.

Adhezif yapışma yöntemi 30-40 yıldır havacılık yapılarının ve bileşenlerinin üretiminde kullanılmaktadır [30]. Yapıştırma teknikleri otomotiv endüstrisinde, uzay ve havacılık endüstrisinde (F-18 uçağının kanatlarında), elektronik sahalarda (çok katlı kartlarda, yapıştırılmış bileşenlerde) ve daha birçok uygulama alanında kullanılmaktadır. Yapıştırılmış bileşenler geleneksel mekanik bağlantılara göre birçok avantaj sunmaktadır: düşük ağırlık, düşük üretim maliyeti ve geliştirilmiş hasar toleransı [31]. Modern uçaklar büyük oranda düşük ağırlıklı sandviç yapılar ve yapısal yapıştırılmış bağlantılardan oluşmaktadır [32]. Kaynakça [30]'da belirtildiği gibi, bu teknik şu anda yüksek güvenlik seviyeli parçaların birleştirilmesinde en ilginç yollardan biri olup yapısal uygulamalarda öncelikli olarak tercih edilmeye başlanmıştır. Örneğin, adhezif yapışma genellikle burkulmalara karşı yapıları dayanıklı kılabilmek için kanat ve yakıt tankına boyuna kirişlerin ve/veya destek ekleme parçalarının montajında kullanılmaktadır. Yapıştırılmış yapılar eğer doğru tasarlanırsa eşdeğer bir mekanik olarak birleştirilmiş bağlantıdan daha yüksek yüklemeleri karşılayabilmektedir ve daha iyi yorulma direnci gösterebilmektedir [32]. Adhezif yapıştırma tekniklerinde parçalara daha uzun hizmet kapasitesi kazandırılmak istendiğinde yüzey iyileştirme işlemleri göz ardı edilmemesi gereken

bir adımdır. Yüzey iyileştirme işlemleri FMT malzemesini oluşturulan metalik takviye elemanları üzerine uygulanmaktadır. Yüzey temizleme işlemleri ile malzeme yüzeyindeki yağ, toz ve kir gibi atıkların arındırılması; yapıştırıcı ile ıslanabilirlik; mekanik yollarla yüzey pürüzlülüğü; mekanik ve hidrolitik olarak kararlılık gibi özelliklerin geliştirilmesi sağlanır.

Literatürde adhezif olarak yapıştırılmış FMT üretiminde kullanılan yüzey iyileştirme yöntemleri ve gerçekleştirilen çalışmalar göz önüne alınarak çalışma kapsamında üretilmesi hedeflenen FMT malzemelerin adhezif olarak optimum düzeyde yapıştırılması ve bu sayede istenen metal/fiber-matris ara yüzeyinin oluşturması için alüminyum levha yüzeylerine yapılan yüzey iyileştirme yöntemleri açıklanmıştır. Yüzey iyileştirme adımlarından biri olan silanlama işleminin metal/fiber-matris ara yüzeyine etkisi incelenmiştir.

#### **1.4. Tez Konusunun Önemi ve İçeriği**

Bu çalışmada endüstriyel alanlarda yer alabilecek üstün mekanik özellikler içeren, termal ve kimyasal dirence sahip bir termoplastik matrisli kompozit üretimi hedef olarak belirlenmiştir. Hedef doğrultusunda ilk olarak seçilen bileşenlerle (cam elyaf keçe/PPS) sıcak pres tekniği ile metal kalıplarda polimer kompozit malzeme üretimi gerçekleştirilmeye çalışılmıştır. Üretilen termoplastik matrisli kompozit malzemelerin otomotiv sektöründe ve endüstriyel uygulamalarda kullanımına uygunluğunun saptanabilmesi için farklı çaptaki düz ve yarı küresel darbe uçları ile düşük hızlı düşen ağırlık darbe testleri uygulanmıştır. Diğer taraftan üretilen polimer kompozit malzemelerin eğilme dayanımları ve eğilme modülleri üç nokta eğilme testleri ile belirlenmiştir. Darbe yüklemesi sonrası hasarlanmış malzemelerin servis süresince gelecek yüklemelere karşı artık dayanımlarının belirlenmesi önem arz etmektedir. Bu çalışmada farklı çaplara sahip düz ve yarı küresel darbe uçları ile hasara uğratılmış polimer matrisli kompozit numunelerin artık eğilme dayanımları ve modülleri belirlenerek darbe öncesi saptanan eğilme özellikleri ile karşılaştırılmıştır.

Polimer matrisli kompozitlerin servis ve üretim süreçlerinde oluşabilecek kusurların tespit edilebilmesi için tahribatsız muayene tekniklerinin yapılması gerekmektedir.

Bilgisayarlı tomografi x-ışını (röntgen) kullanılarak incelenmek istenen bölgenin kesitsel görüntüsünü oluşturmaya yönelik radyolojik teşhis yöntemidir. Tıp alanında yaygın olarak kullanılan bilgisayarlı tomografi ile görüntüleme tekniğinin malzeme iç yapısını ve hasar mekanizmalarını görmek için uygun olabileceği düşünülmektedir. Yapılan literatür incelemelerinde bilgisayarlı tomografi yöntemi ile gerçekleştirilen hasar mekanizması analizine rastlanmamıştır. Bu çalışmada sıcak pres tekniği ile üretilen cam elyaf keçe takviyeli PPS kompozitlerinin düşük hızlı düşen ağırlık darbe testleri sonucunda oluşan hasar mekanizmaları bilgisayarlı tomografi yöntemi ile belirlenmiştir.

Bu çalışmanın diğer bir amacı ise cam elyaf keçe takviyeli termoplastik tabakalar ve hafif alüminyum alaşımı içeren yeni nesil bir FMT malzemenin mekanik birleştirme ve adhezif yapışma ile üretilmesi hedeflenmiştir. Üretilen FMT malzemelerinin alüminyum levha katlarında oluşturulan farklı delik formasyonlarının FMT malzemesinin darbe dayanımı, tabakalar arası kayma dayanımı ve çekme dayanımına etkisinin saptanmasıdır.

FMT malzemelerin alüminyum ile fiber-matris ara yüzeyinin iyileştirilmesi ve bu sayede istenen mekanik özelliklerin sağlanabilmesi için sıcak pres üretiminden önce alüminyum malzemenin yüzeyine farklı delik formasyonlarında dairesel delikler açılarak üretilen FMT malzemesinin içerisinde fiber-matris sütunları oluşturulmuş ve daha sonra yüzey iyileştirme işlemleri (mekanik ve kimyasal) uygulanmıştır. Yüzey iyileştirme işlemleri ile delikli alüminyum levhalar ile fiber-matris ara yüzeyinde oluşturulan adhezif yapışmanın ve fiber-matris sütunlarının üretilen FMT malzemesinin mekanik özelliklerine etkisi düşük hızlı düşen ağırlık darbe ve çekme testleri ile belirlenmiştir. Bölüm 4'te elde edilen sonuçlar detaylı bir şekilde ele alınmıştır. Bununla birlikte, sıcak pres tekniği ile üretimden önce alüminyum levhalara açılan delik formasyonları nedeniyle üretilen FMT malzemesinin içerisinde oluşan fiber-matris sütunlarının malzemenin mekanik özelliklerine etkisi düşük hızlı düşen ağırlık darbe ve çekme testleri ile belirlenmiştir.

Düşük hızlı düşen ağırlık darbe testlerine maruz bırakılmış mekanik bağlantılı ve mekanik birleştirme+adhezif yapışma bağlantılı FMT malzemelerinin yüzeylerinde

oluşan darbe hasar mekanizmalarının tespiti ve bununla birlikte uygulanan darbe enerjisine bağlı olarak etkilenen delik sayısının belirlenebilmesi için dijital fotoğraflar çekilmiştir.

Çekme testlerine maruz bırakılmış mekanik bağlantılı ve mekanik birleştirme+adhezif yapışma bağlantılı FMT malzemelerinin yüzeylerinde ve iç kısımlarında oluşan hasar mekanizmalarının tespiti ve bununla birlikte delik formasyonlarına ve delik çaplarına bağlı olarak değişen hasar mekanizmalarının belirlenebilmesi için dijital fotoğraflar çekilmiştir. Ayrıca alüminyum levhalar ile fiber-matris arayüzey yapışması ve oluşan fiber+matris sütunlarının belirlenebilmesi için optik mikroskop incelemeleri yapılmıştır.

FMT malzemelerin alüminyum ile fiber-matris ara yüzeyinin iyileştirilmesi ve bu sayede istenen mekanik özelliklerin sağlanabilmesi için sıcak pres üretiminden önce alüminyum malzemenin yüzeyine kimyasal işlemler uygulanmıştır. Uygulanan kimyasal işlemlerden silan konsantrasyonunun alüminyum ile fiber-matris ara yüzey yapışmasını ne ölçüde iyileştirdiğinin anlaşılması için üretilen deliksiz FMT malzemelere tabakalar arası kayma dayanımı (TAKD), kısa kiriş kayma dayanımı ve üç nokta eğilme testleri uygulanmıştır.

FMT üretiminde alüminyum ile fiber-matris ara yüzey yapışmasını iyileştirmede kullanılan kimyasal işlemlerden silan konsantrasyonunun optimize edilmesinden sonra alüminyum levha katına delikler açılarak ara yüzey yapışmasının mekanik olarak ta artırılması hedeflenmiştir. Bu bağlamda delik açılmış FMT malzemelere TAKD ve üç nokta eğilme testleri uygulanmıştır. Üç nokta eğilme ve TAKD testlerinin yanında delik formasyonunun, delik çaplarının ve toplam delik alanı/kapalı alan parametrelerinin FMT numunelerin ara yüzey dayanımına etkisi çekme testi ile de ayrıca belirlenmiştir.

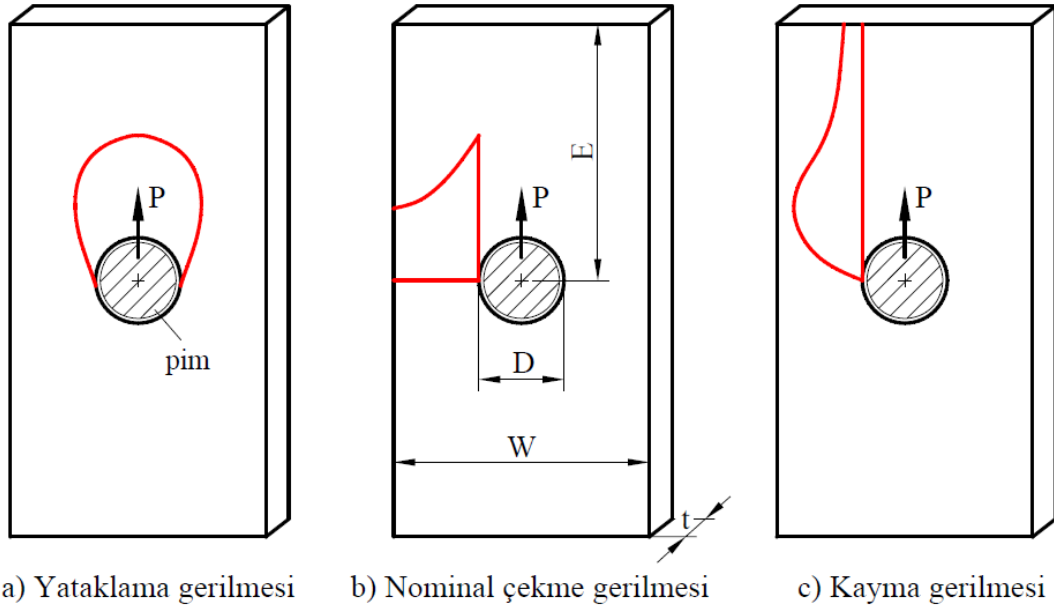
## 2. GENEL BİLGİLER

### 2.1. Kompozit Malzemelerin ve Fiber Metal Tabakaların Mekanik Olarak Birleştirilmesi

Kolesnikov ve diğ. [33]'nin belirttiği gibi, havacılık uygulamalarında kompozit malzemelerin kullanımına olan ilgi ağırlık azalması için artan istekler nedeniyle her geçen gün artmaktadır [34]. Sadece askeri uygulamalarda değil ticari havacılık tasarımında birçok metal parçalar ve yapıların yerini kompozit malzemeler almaktadır. Örneğin, Airbus A380'in toplam ağırlığının % 22'si kompozit malzemelerden oluşmaktadır [35]. Flaplar, kuyruk konisi, basınç bölmeleri ve dikey/yatay kuyruk kısımları gibi modern uçak parçaları kompozit malzemelerden yapılmaktadır [36].

Yapısal birleşme yapının karmaşıklığını artırırken bununla birlikte bölgesel gerilme etkilerine sebep olmaktadır. Fakat bunun yanında kompozit tasarımının hafifliğinde azalma gibi küresel optimizasyon olanaklarında önemli ölçüde azalmaya sebep olmaktadır. Böylece, mevcut durumda yeni bir anlam kazanan yapısal birleşmeler nedeniyle oluşan ağırlığın azaltılması için ileri birleştirme teknolojilerinin gelişimi tasarlanmıştır. Mekanik bağlantılar herhangi bir özel yüzey hazırlama yapılmaması, kolay sökülebilmesi ve gözleminin kolay olması gibi nedenlerden ötürü kompozit bileşenlerin bağlantısında halen kullanılan esas yöntemlerden birisidir [34]. Kompozit malzemelerin birleştirilmesinde kullanılan mekanik bağlantılar, yapıyı oluşturan plaka ve parçaların birleştirme elemanları ile (cıvata, pim, perçin vb.) bir araya getirilerek elde edilir. Mekanik bağlantılarda yapıları meydana getiren bileşenler arasındaki yük transferi birleştirme elemanları nedeniyle oluşan sürtünme sayesinde gerçekleşmektedir. Temel olarak yük iletim elemanları (pim, cıvata vb.), mekanik ve yapıştırılmalı bağlantılarda bağlantı doğrultusu boyunca kesme gerilmesine maruz kalmaktadır. Fakat gerçek gerilme dağılımı daha komplekstir [3].

Mekanik bağlantılarda amaç bir elemandan diğer bağlantı elemanına yük iletimini düzgün bir şekilde gerçekleştirilmesidir. Mekanik bağlantılarda yük, bağlantı elemanı aracılığıyla delik yüzeyine transfer edilerek bir parçadan diğerine aktarılır [3].

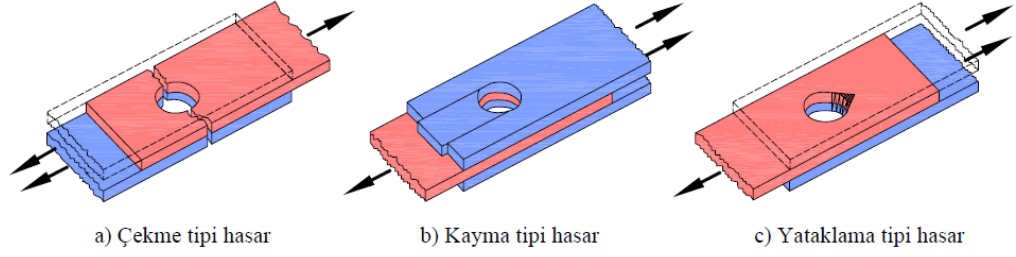


Şekil 2.1: Pim ile yüklenen delik etrafında oluşan gerilme dağılımları [3]

Şekil 2.1’de pim ile yüklenen delik çevresindeki gerilme dağılımları gösterilmiştir. Delik çevresinde değişik mertebelerde gerilme değerleri söz konusudur. Şekilden de görüldüğü gibi en yüksek gerilme değeri yük transferi doğrultusunda elde edilmektedir. Bağlantı performansının şiddetle geometrik parametrelere bağlı olduğu rapor edilmiştir. Yeterince geniş olan bağlantılar yük taşıma tipi hasara uğramaktadır. Bağlantı genişliğinde meydana gelen azalma hasar tipinin değişmesine ve çekme tipi hasarın meydana gelmesine neden olmaktadır. Delik çapında ve serbest kenarın delik eksenine olan mesafesinde yapılan değişimler benzer etkiye sahiptir [3].

Yapılan çalışmalar sonucunda mekanik bağlantılarda üç temel hasar mekanizması ile karşılaşmıştır: çekme, kayma ve yük taşıması tipi hasar mekanizmaları (bu üç mekanizmanın birleşimi şeklinde oluşan hasar da söz konusu olabilmektedir). Yukarıda bahsedilen hasar mekanizmaları Şekil 2.2’de gösterilmiştir [3].





Şekil 2.2: Pimli bağlantılarda tipik hasar mekanizmaları [3]

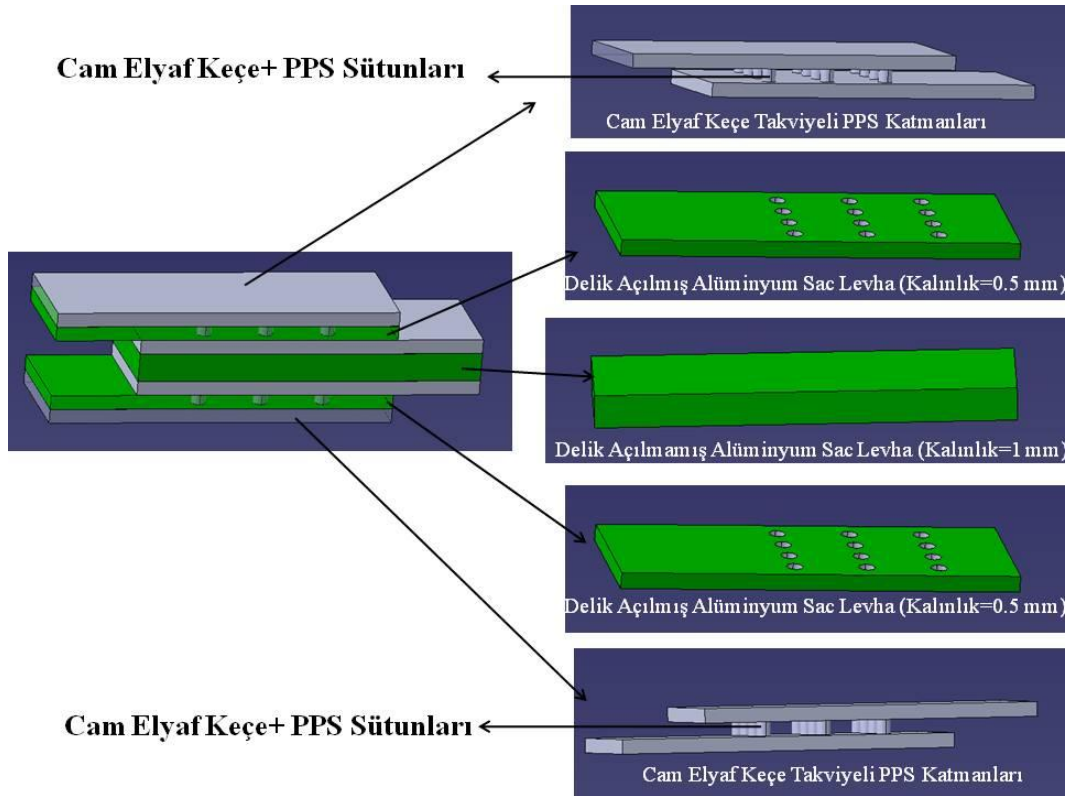
Cıvata ve perçinlerle birleştirilen bağlantılar için, bağlantı elemanı deliği malzeme içerisinde tüm dayanımı azaltacak olan gerilme yığılması bölgesi oluşturmaktadır. Bu dayanımdaki azalma kuvvetli olarak malzemeye ve kenar-uzaklık oranına ( $E/D$ ) bağlıdır (Şekil 2.1).  $E/D$  oranı bağlantı elemanı deliğinin merkezi ile bağlantının serbest kenarı arasındaki mesafenin delik çapına bölünmesini ifade etmektedir [37]. Şekil 2.1 ve 2.2’de belirtilen hasar mekanizmaları  $E/D$  oranıyla direk olarak ilişkilidir.  $E/D$  oranı az ise, delik etrafında yüksek gerilme yığılmaları kompozit malzemelerin düşük kayma dayanımı nedeniyle kayma tipi hasara neden olacaktır.  $E/D$  oranı artarsa, kompozit tabakada oluşan kayma tipi hasarlanma bağlantının serbest kenarı doğrultusunda ilerleyemeyecektir ve malzemenin yük taşıma şeklinde hasarlanmasına sebep olacaktır. Hasar tipinin kayma tipi hasardan yük taşıma hasarına dönüşmesi bağlantı dayanımını ciddi bir şekilde arttırması nedeniyle kenar-uzaklık oranı havacılık uygulamalarında kullanılan yapıların bağlantı tasarımında önemli bir etkiye sahiptir. Alüminyum veya titanyum gibi izotropik veya izotropiğe yakın malzemelerde  $E/D$  oranının yaklaşık 2 civarında olduğu zaman kritik değer olduğu kabul edilmiştir. Polimer matrisli kompozitler gibi anizotropik malzemelerde fiber oryantasyonu ve fiber ve matris arasındaki rijitlik özellikleri gibi etkenler nedeniyle geçiş noktası daha yüksektir. FMT malzemeler metalin sünekliği ile kompozit malzemenin çentiğe duyarlılığı nedeniyle,  $E/D$  oranı için geçiş değerinin FMT malzemesindeki metal hacim oranına bağlı olarak monolitik metal malzeme ile tekil kompozit malzeme değerleri arasında olacağı ön görülmüştür [37].

FMT malzemelerin pim ve cıvatalı yük taşıma davranışı hakkında deneysel çalışmalar birkaç araştırmacı tarafından gerçekleştirilmiştir [38-41]. Yapılan çalışmalarda daha çok oluşan hasar mekanizmaları ve/veya delik etrafındaki ilişkilendirilmiş genleme bölgesi incelendiği gözlenmiştir. Slagter [38] hem pim ve

hem de cıvata konfigürasyonlarının FMT malzemelerin yük taşıma dayanımına etkisini incelemiştir. Gerçekleştirilen çalışmada sadece yük taşıma tipi hasarlanma için yük taşıma dayanımını vurgulamıştır. Caprino ve diğ. [39] Slagter [38]'in çalışmasına benzer olarak FMT malzemelerin pim ve cıvata yük taşıma dayanımı üzerine araştırma yapmışlardır. Caprino ve diğ. [39] net-çekme, kayma ve yük taşıma şeklindeki hasar tiplerinin numunenin geometrisi ile nasıl değiştiğini incelemişlerdir. Elde edilen sonuçlardan, iki parametrenin öne çıktığı vurgulanmıştır: numune genişliği/delik çapı oranı (W/D) (Şekil 2.1), ve kenar uzaklık/delik çapı oranı (E/D) (Şekil 2.1). Gerçekleştirilen deneysel çalışma sonrasında, optik mikroskop analizleri ile Slagter [38]'in çalışmasında tabakanın yük taşıma dayanımının esas olarak alüminyum katlara bağlı olduğu hipotezini destekleyen alüminyum ve fiber katları arasındaki burkulma ve aşırı delaminasyonun oluştuğunu belirlemişlerdir. Bir diğer çalışmada Meola ve diğ. [40] FMT'nin bir çeşidi olan GLARE malzemesine pim yük taşıma testi uygulamışlardır. Yapılan çalışmada pim yük taşıma konfigürasyonunun mekanik bağlantı davranışının simülasyonu için en kritik adım olduğunu saptamışlardır. Van Rooijen ve diğ. [41] farklı E/D ve W/D oranlarına sahip GLARE 2 FMT malzemesinin yük taşıma dayanımını cıvatalı yük taşıma deneyleri ile belirlemişlerdir. Deneysel sonuçların doğrulanması için sonlu elemanlar ile modelleme yapılmıştır. Yapılan literatür çalışmalarından FMT malzemelerine uygulanan mekanik birleştirmelerin yanı sıra kompozit malzemelerinde mekanik olarak birleştirildiği saptanmıştır. Kolesnikov ve diğ. [33]'nin belirttiği üzere, cıvatalı bağlantı ile birleştirilmiş kompozit yapıların mekanik davranışı ile ilgili deneysel, analitik ve nümerik olarak birçok çalışma mevcuttur [42-48]. Gerçekleştirilen çalışmalarda genel olarak tabaka konfigürasyonu ve bağlantı geometrisine bağlı olarak tekil ve çoklu dizili cıvatalı bağlantıların hasarlanma kriteri, yük ve gerilme dağılımları ve yük kapasitesinin belirlenmesi üzerine odaklanılmıştır. Cıvatalı kompozit bağlantıların yük kapasitesinin gelişmesi için en etkin yollardan birinin metal katlarının kompozit tabakalar arasına yerleştirilmesi ile sağlandığı belirtilmiştir [49,50]. Bu sayede numunelerin yük taşıma ve kayma dayanımının iyileştiği saptanmıştır.

Hem pim hem cıvata yüklemelerinde sürekli fiber takviyeli katmanlı metal tabakaların delik dayanımı ve yük taşıma dayanımının tespitini kapsamaktadır. Öte

yandan, cam keçe takviyeli metal tabakaların mekanik davranışına dairesel delik formasyonlarının etkisi ile ilgili literatürde herhangi bir araştırmaya rastlanamamıştır. Alüminyum katlarında farklı dairesel delik formasyonlarına sahip yeni nesil GLARE malzemesinin yük taşıma davranışı tasarım açısından büyük önem arz etmektedir. Bu çalışmanın amacı cam elyaf keçe takviyeli termoplastik katmanlar ve hafif alüminyum alaşımı içeren yeni nesil bir FMT malzemenin mekanik ve adhezif yapışma ile üretilmesi ve üretilen FMT malzemelerinin alüminyum levha katlarında oluşturulan farklı delik formasyonlarının FMT malzemesinin darbe dayanımı, tabakalar arası kayma dayanımı ve çekme dayanımına etkisinin saptanmasıdır. Şekil 2.3'te sembolik olarak metal/kompozit katman ara yüzeyinde oluşturulmak istenen cam elyaf keçe+ PPS sütunları gösterilmiştir.



Şekil 2.3: Çekme yüklemesine maruz bırakılacak bir FMT numunesinin sembolik olarak metal/kompozit katman ara yüzeyinde oluşturulmak istenen cam elyaf keçe+ PPS sütunları

Literatür çalışmalarında FMT malzemesini oluşturan fiberlerin sürekli fiber olması nedeniyle yapı içerisine yada üretimden sonra yapının tümüne açılan delikler nedeniyle FMT malzemesinin yük taşıma ve kayma dayanımının çentik etkisi nedeniyle düştüğü [27,51] saptanmıştır. Üretilmesi hedeflenen yeni nesil FMT

malzemesinde cam elyaf keçe fiberlerin varlığı nedeniyle sıcak pres üretimi esnasında basınç ve erimiş PPS malzemesi yardımıyla daha önceden alüminyum levha yüzeylerine açılmış değişik konfigürasyondaki deliklere hareket ederek metal/kompozit katmanlar arasında mekanik bağlantı oluşturulacaktır. Bu sayede yapı içerisindeki deliklerin çentik etkisi nedeniyle FMT malzemesinin çekme, darbe ve eğilme gibi yüklemeler altında metal/kompozit ara yüzeyinde oluşacak delaminasyon hasarının geciktirileceği bununla birlikte deliklerde oluşturulan sütunlarda uygulanan yüklemeler esnasında kesilme tipi hasarlanma olması içinde ayrıca bir enerji gerektiğinden FMT malzemesinin yük taşıma ve kayma dayanımının iyileşeceği düşünülmektedir.

## **2.2. Kompozit Malzemelerin ve Fiber Metal Tabakaların Düşük Hızlı Düşen Ağırlık Darbe Yüklemeleri Altındaki Davranışları**

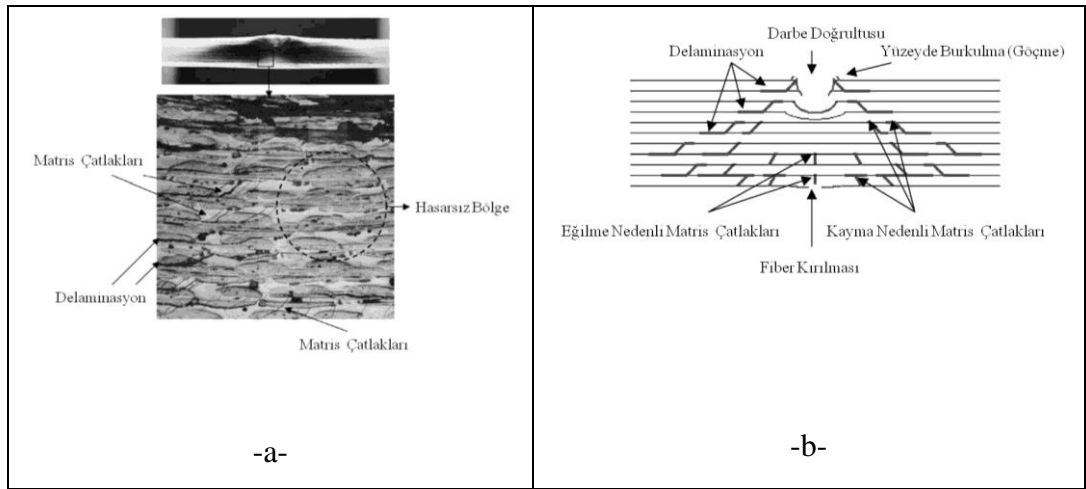
Doktora tezi çalışması kapsamında yapılacak çalışmaların iyi bir şekilde anlaşılması ve uygulanabilmesi için kompozit malzemelerin ve fiber metal tabakaların düşük hızlı düşen ağırlık darbe yüklemeleri altındaki davranışları hakkında detaylı bir araştırma gerçekleştirilmiştir. Üretilen polimer matrisli kompozit ve FMT malzemelerin darbe yüklemeleri altındaki davranışı, oluşacak hasar mekanizmaları ve düşük hızlı darbe yüklemelerine karşı penetrasyon dirençleri incelenmesi gereken bir konudur. Yapının darbe performansı darbe etkisi yapan cisim, yada yüksek gerinim oranlı yüklemenin etkisiyle değişir. Açığa çıkan hasar; darbe etkisi yapan nesneye (yoğunluğu, kütlesi, sertliği, hızı, şekli), hedef yapının dinamik tepkisine (kalınlık ve desteklerin durumu) ve numunenin malzeme özelliklerine (modül, dayanım, sertlik vb.) bağlı olarak değişir [52].

Düşen ağırlık darbe etkisi nedeniyle yüzey altında oluşan en önemli hasar delaminasyondur. Delaminasyon kompozit malzemede tabakalar arası kayma (kesme) neticesi oluşur. Kayma hareketi, üretim esnasında yapıştırılmış tabakaların ya da fiber-matris ara yüzeyi boyunca oluşabilir [53].

Shyr ve Pan [14] orta-ağır darbe enerjili düşük hızlı darbeler altında, çeşitli kalınlıkta tabakalara sahip farklı dokuma yapıları kompozit malzemelerdeki hasar karakterlerini

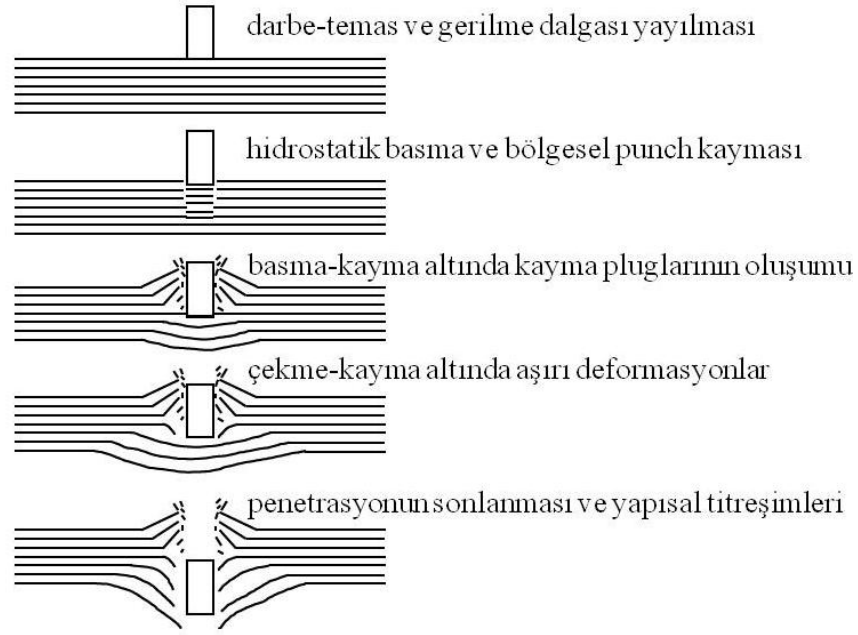
ve darbe davranışlarını incelemiştir. Enerji-absorbsiyon mekanizmalarına bakılırsa, yedi katmana sahip kompozit malzemede en önemli hasar modunun delaminasyon olduğu görülürken, on üç tabakalı kompozit malzemede en önemli hasarın fiber kırılması olduğunu göstermiştir.

Bir diğer çalışmada, tabakalı kompozitlerde darbe sonucu oluşan hasarın başlangıcı ve ilerlemesi incelenmiştir. Üç çeşit hasar mekanizmasının matris çatlakları, fiber kırılması ve delaminasyonlar şeklinde olduğu belirlenmiştir. Tabaka kalınlığı, fiberlerin dizilişi gibi etkilerin kompozit plakaların hasar davranışları üzerindeki etkileri incelenmiştir [54]. Matris çatlama, fiber kırılması ve delaminasyon hasarlarının yarı küresel darbe ucu altında yapılan darbe yüklemelerinde kompozit malzemelerde oluşumu Şekil 2.4'te gösterilmiştir. Düz darbe ucu ile gerçekleştirilen darbe yüklemelerinde kompozit malzemelerde oluşan hasar mekanizmaları Şekil 2.5'te gösterilmiştir.



Şekil 2.4: Yarı küresel darbe ucu ile yapılan darbe yüklemelerinde kompozit malzemelerde oluşan hasar mekanizmaları [14]

Şekil 2.4 ve Şekil 2.5'te görüldüğü gibi ana hasar mekanizmaları olan matris çatlama, fiber kırılmaları ve delaminasyonlar her iki uç ile gerçekleştirilen darbe yüklemelerinde kompozit numunelerde oluşmasına rağmen yarı küresel darbe ucunun formasyonundan dolayı hasar konisi oluşumu daha fazla olmaktadır. Hasar konisinin numunelerdeki bölgesinin artması ile numunenin daha geniş bir bölgede darbe ucunun uyguladığı yükü karşıladığı ve oluşan delaminasyonların daha geniş bir bölgede ortaya çıkması bu nedendir.



Şekil 2.5: Düz darbe ucu ile gerçekleştirilen darbe yüklemelerinde kompozit malzemelerde oluşan hasar mekanizmaları [55]

Silindirik düz bir darbe ucu ile gerçekleştirilen düşen ağırlık darbe yüklemesi nedeniyle bir kompozit tabakada oluşan hasar mekanizmaları 5 farklı safhada belirtilmiştir [55]. 1 safhada darbe-temas ve gerilme dalgası yayılması, 2.safhada hidrostatik basma ve bölgesel delme (punch) kayması, 3. safhada basma-kayma altında kayma pluglarının oluşumu, 4.safhada ise çekme-kayma altında aşırı deformasyonlar ve son safhada ise penetrasyonun sonlanması ve yapısal titreşimleri içermektedir.

Düşük enerjili darbe yüklemelerinin polimer kompozitlerde neden olduğu gözle görülemeyen tabakalar arası (delaminasyon) hasarlar kompozit yapının darbe özelliklerini ciddi bir şekilde etkilemektedir [56]. Böylece darbe altındaki kompozitin uygunluğu sadece uygun tasarım parametreleriyle belirlememeli, ayrıca malzemenin absorbe ettiği darbe enerjisi de göz önüne alınmalıdır. Darbe dayanımı genellikle darbe hızı, kullanılan fiber ve matris tipi, fiber hacim oranı ve ara yüzey yapışması gibi parametrelerle saptanmalıdır. Fiberlerin yerinden çıkması ve kayma hasarı, matris çatlağı, ayrılma ve delaminasyonun çeşitli hasar mekanizmaları olduğu söylenmiştir [57]. Karbon fiber takviyeli polimer kompozitler üzerinde yapılan düşük hızlı darbe testleri 20° C ile -150° C arasındaki farklı sıcaklıklarda uygulanmıştır.

Malzemelere yapılan tahribatlı ve tahribatsız muayenelerde sıcaklığın karbon fiber takviyeli kompozitlerde oluşan hasarları nasıl etkilediği incelenmiştir. Eşik darbe enerjisi üzerinde sıcaklığın etkisini ölçmek için kullanılan düşen ağırlık testiyle kuvvet-yer değiştirme eğrilerinin analizleri elde edilmiştir. Karbon fiber takviyeli polimer plakalarda düşük hızlı darbe yükleri nedeniyle oluşan hasar darbe enerjisiyle birlikte arttığı belirtilmiştir [58].

Diğer bir çalışmada, [0/45/90/-45]<sub>2s</sub> yönlü karbon/epoksi tabakalar düşük-hızlı darbeye maruz bırakılmıştır. Bu tabakalara değişik darbe enerjileri uygulanmış ve darbe etkidikten sonra yorulma ömrü ve kalan dayanım test edilmiştir. Maksimum yüke ulaşılmadan önce bölgesel delaminasyonlar gözlemlenmiştir [59].

Gellert ve diğ. [60] farklı kalınlıktaki E-camı/vinilester kompozitlerine farklı silindirik mermi kütlesinde, çapında ve geometrisinde (düz, yarıküresel ve konik) darbe uygulamışlardır. Yapılan deneyler sonucunda kalınlık boyunca iki farklı hasar şekli ortaya çıktığı gözlenmiştir. İnce kalınlıktaki kompozit parçalarda trapezoidal şeklinde bir hasar bölgesi oluşurken kalın kesitli parçalarda kum saati biçiminde bir hasar bölgesi oluştuğu saptanmıştır.

Caprino ve Lopresto [61] fiber takviyeli plastiklerin düşük hızlı darbe altında penetrasyon enerjisini etkileyen parametreleri incelemişlerdir. Sonuç olarak, bir kompozit plakanın enerji absorbe kapasitesini etkileyen temel parametrelerin dış ve iç etkiler olarak ayrıldığını; iç etkilerin matris tipi ve miktarı, fiber tipi ve dizilimi ve kompozitin kalınlığı olduğu, dış etkilerin ise panel geometrisi ve boyutu, sabitleme koşulları ve darbe ucu geometrisi olduğunu saptamışlardır.

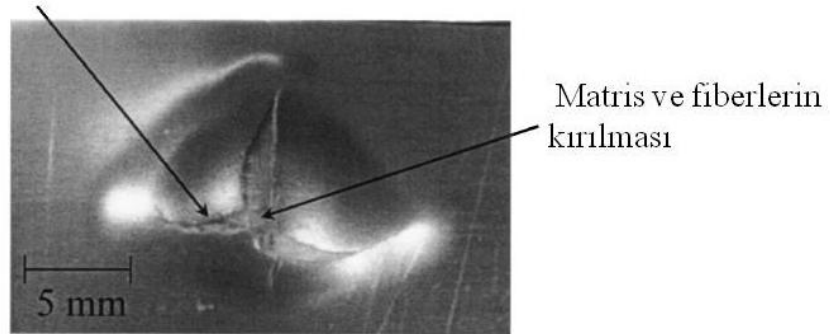
Mitrevski ve diğ. [18] örülmüş karbon/epoksi polimer kompozit plakalarda oluşan darbe hasarının düşen ağırlığın şekline göre nasıl değiştiğini araştırmışlardır. 12.7 mm çaplı, çelik üç farklı düşen ağırlık ucu (konik, yarıküresel ve oval) karbon/epoksi polimer kompozit plakalara belli bir yükseklikten bırakılmış ve darbeler nedeniyle oluşan farklı hasar tipleri belirlenmiştir. Yarıküresel darbe ucuyla yapılan düşen ağırlık deneylerinde kompozit plakalarda delaminasyona uğramış bölgelerin fazla olduğu görülmüştür. Bunun yanında, konik darbe ucuyla yapılan deneylerde ise

penetrasyon derinliğinin arttığı, fiber kırılma hasarının olduğu ve bölgesel delaminasyonların olduğu gözlemlenmiştir.

Carillo ve Cantwell [62] PP/PP kompoziti ile A2024-0 Alüminyum alaşımını tabakalı kompozit haline getirerek çekme, 4 nokta eğme ve düşen ağırlık darbe deneyleri uygulamışlardır. Düşen ağırlık darbe testlerinde ise üretilen FMT malzemesinin darbe davranışını, ilk hasar ve delinme eşik değerlerini ve oluşan hasar tiplerini belirlemişlerdir. Düşük darbe enerjilerinde kompozit tabakada herhangi bir kırılma yada delaminasyon gözlenmezken, artan darbe enerjisi ile kalınlık boyunca bölgesel kırılmalar ve delaminasyon hasarları tespit edilmiştir.

Kiritisaev ve Cantwell [63] cam fiber takviyeli Polipropilen/Metal Tabakası ile alüminyum köpüğün bileşiminden oluşan hibrit kompozitin darbe davranışını incelemişlerdir. FMT ve hibrit kompozit yapıların düşük hızlı darbe davranışı düşen ağırlık darbe testleri ve laser-doppler hız ölçer ile araştırılmıştır. Hibrit kompozit yapıların enerji absorbe karakteristikleri hasar süreçleri altında incelenmiştir. Gerçekleştirilen darbe yüklemeleri sonrasında FMT ve hibrit kompozit yapıların benzer darbe karakteristiklerine sahip oldukları belirlenmiştir. FMT malzemesinde oluşan hasarlanma kompozit katlardaki matris ve fiber kırılmaları ve alüminyum katlardaki kırılma biçimi olarak ortaya çıkmıştır. Tipik bir FMT malzemedeki darbe yüklemesi nedeniyle arka yüzeyinde oluşan hasar mekanizmaları Şekil 2.6'da gösterilmiştir.

Alüminyum katının kırılması



Şekil 2.6: 28 Joule darbe enerjisi altında hasarlanan FMT malzemesinin arka yüzeyinin görünümü [63]



Lawcock ve diğ. [64] statik, düşen ağırlık ve yüksek hızlı darbe testleri ile fiber metal tabakaların darbe özellikleri üzerine fiber/matris yapışmasının etkisini incelemişlerdir. Sonuçlardan herhangi bir darbe enerjisinde darbe yüklemesi sonrasında numunenin arka yüzeyinde çatlak uzunluğu ve kalıcı batmanın az olmasına rağmen zayıf fiber/matris ara yüzeyine sahip FMT malzemelerde daha geniş bir hasar bölgesi olduğu gözlenmiştir. Daha geniş bir bölgede hasara uğramasının nedeni artan fiber/matris kaymaları ve delaminasyon hasarından kaynaklandığı saptanmıştır. Reyes ve Cantwell [65] cam fiber takviyeli polipropilen katmanlar içeren yeni nesil bir FMT malzemesinin darbe özelliklerini incelemişlerdir. Gerçekleştirilen ön çalışmalardan alüminyum yüzeyine uygulanan yüzey iyileştirme ile alüminyum katları ile kompozit katmanlar arasında mükemmel bir yapışma sağlandığını tespit etmişlerdir. Gerçekleştirilen düşük hızlı darbe testlerinden FMT malzemesinin alüminyumun ve kompozit katların aşırı plastik deformasyonu ve cam fiber takviyeli polipropilen katların bölgesel mikro çatlama ile önemli ölçüde enerjiyi absorbe edebildiği belirlenmiştir.

Gerçekleştirilen literatür çalışmaları ile sıcak pres tekniği ile üretilmesi hedeflenen cam elyaf keçe takviyeli PPS/alüminyum FMT malzemesinin darbe davranışı hakkında herhangi bir çalışmanın olmadığı saptanmıştır. Bununla birlikte gerçekleştirilen çalışmalarda FMT malzemeleri metal ve kompozit katmanlar arasında adhezif yapışma ile oluşturulmuştur. Mekanik bağlantı ile metal/kompozit katmanlar arasında oluşturulan ara yüzeyin darbe davranışı incelenmemiştir. Doktora tezi çalışması kapsamında üretilen cam elyaf keçe takviyeli PPS kompozitlerin düşük hızlı düşen ağırlık darbe testleri sıcak pres üretiminin optimizasyonu ve üretilen polimer matrisli kompozitin literatürdeki yaklaşık benzer çalışmalarda belirtilen malzemelerle kıyaslanması için gerçekleştirilmiştir.

### **2.3. Kompozit Malzemelerin ve Fiber Metal Tabakaların Ara Yüzey Dayanımının Belirlenmesi**

FMT malzemelerin mekanik özellikleri fiber takviyeli epoksi kompozitlerinin doğal gevrek yapısı nedeniyle ciddi bir şekilde sınırlıdır. Kompozit katmanların doğal gevrekliğinin azaltılması için birkaç başarı deneme gerçekleştirilmiştir. Daha

dayanıklı matris kullanımı, hibrit sistemi oluşturabilmek için aynı matris malzemesinin içine farklı fiberlerin yerleştirilmesi ve fiber+matris ara yüzeyinin modifikasyonu gibi denemelerle elde edilmiştir [66].

Cepeda-Jiménez ve diğ. [67] alüminyum rulo halinde yapıştırılmış tabakalarının ve cam fiber takviyeli metal tabakalarının (GLARE) hasar toleranslarını incelemişlerdir. Kompozit tabakalar ara yüzeylerindeki kırılma davranışlarını belirleyebilmek için üç nokta eğilme ve kayma testleri uygulamışlardır. Eğilme testleri esnasında kompozit tabakaların ara yüzeyleri ve malzemelerin kendilerinden gelen özelliklerine bağlı olarak farklı kırılma mekanizmalarının ortaya çıktığı gözlenmiştir. GLARE malzemesinde cam fiberler ve polimer reçine arasında ayrılma nedenli çatlak oluşumunun gözlemlendiği belirlenmiştir. Bununla birlikte GLARE malzemesinde tekrar çekirdeklenme nedenli alüminyum katların aşırı plastik deformasyonu ile birlikte delaminasyon oluşumunun varlığı da tespit edilmiştir.

Fiber metal tabakalar delaminasyon burkulmasına karşı duyarlıdır. Bölgesel burkulmanın etkileşimi ve delamine olmuş bölgenin genişlemesi tipik olarak artık dayanımı düşürecektir ki buda malzemenin yıkımına sebep olacaktır. Bu olgu deneysel çalışmalarda gözlenebilmesi rağmen bir nümerik analiz mekanizmaların ve kritik parametrelerin daha iyi anlaşılmasına yardımcı olacaktır. Remmers ve de Borst [68] GLARE malzemesinde deneysel çalışmalarda gözlenen delaminasyon burkulmasını açıklamışlardır. Bununla birlikte tekil katların modellenmesi için katıya benzer kabuk elemanlar kullanılmıştır. Kabuk elemanlar katlar arasındaki delaminasyonun modellenmesi sağlayan ara yüzey elemanları şeklinde birleştirilmiştir. Elde edilen deneysel sonuçlardan basma yüklemesi altında GLARE malzemesinin ara yüzeyinde delaminasyon ve bölgesel burkulmaların olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, ara yüzey kırılma tokluğunun oluşturulan GLARE modelinin delaminasyon ilerlemesi ve burkulma davranışına önemli ölçüde etki ettiği saptanmıştır.

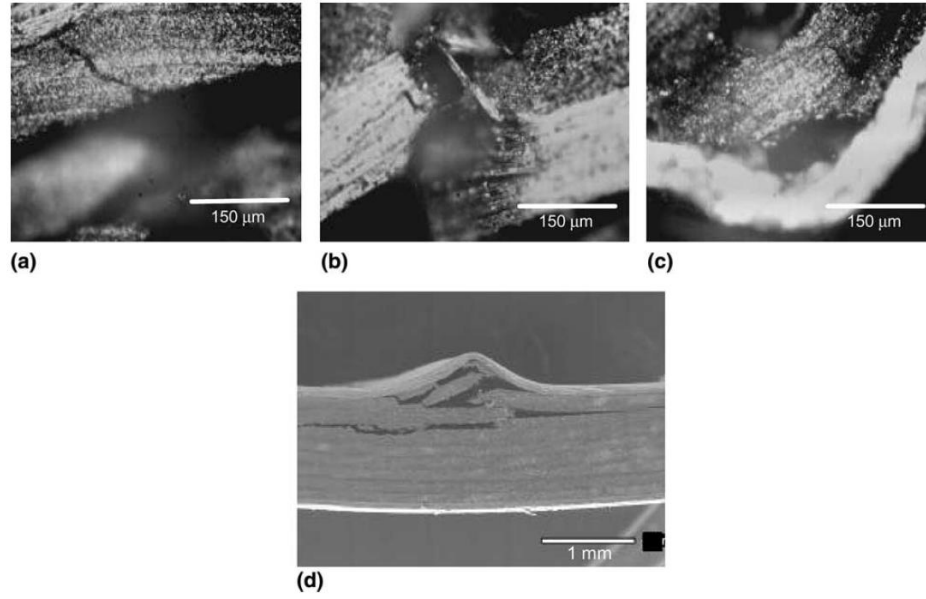
Hinz ve diğ. [69] tabakalar arası kayma yüklemesi altında GLARE 4B tipindeki FMT malzemesinin ara yüzey dayanımını incelemişlerdir. Çift taraflı çentikli kayma testleri gerçekleştirilmiş olup numunelerde oluşan deformasyon ve hasarlanmalar

taramalı elektron mikroskobu ile tespit edilmiştir. Fiber/matris ayrılmasının başlangıcına karşılık gelen kayma gerilmesi değerleri belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlardan çapraz katlı kompozit katmanlara sahip olan FMT malzemesinin tabakalar arası kayma yüklemesine maruz kalmasına rağmen numunede oluşan hasarlanmasının sadece enine katmanlarda olduğu gözlenmiştir. Kendi kalınlığı içinde, fiber/matris ayrılmasının yüksek kayma genlemelerinin olduğu enine katların kat sınırlarına yakın bölgede olduğu tespit edilmiştir. Buna rağmen, tekil fiber/matris ayrılma olayı enine katların merkez bölgesinde ayrıca gözlenmiştir. Ayrıca matris çatlaklarının ilerlemesi ve fiber/matris ayrılmasının oluşumu ile birlikte son tabakalar arası kayma hasarı olan delaminasyonların varlığı da tespit edilmiştir.

Polipropilen (PP) ve cam fiberler arasındaki ara yüzey kayma dayanımı matris malzemesine reaktif modifiye edici malzeme katarak artırılabilir. Jannerfeldt ve diğ. [70] PP/cam fiber kompozitlerinin takviye elemanının etkinliğinin artırılabilmesi için matrisi modifiye etmişlerdir. Gerçekleştirilen çalışmalardan kompozitin dayanımının dört ana etkiye bağlı olduğu belirlenmiştir: matris ve fiber arasındaki ara yüzey kayma dayanımı, fiber uzunluğu, fiber oryantasyonu ve fiber miktarı. Doğru matris ve fiber yüzeyi modifikasyonu ile belirtilen ilk iki etkinin normalize edilebileceği tespit edilmiştir.

Ramulu ve diğ. [71] yüksek sıcaklıkta çalışabilen Polietereterketon (PEEK)/karbon fiber ve PIXA-M termoplastik reçine/karbon fiber takviyeli polimer matrisli kompozitler ile titanyum takviyeli kompozit tabakaların üretim metodlarının çekme ve eğilme özelliklerine etkisini incelemişlerdir. Eğilme test sonuçlarından, PEEK/Karbon fiber ve PIXA-M termoplastik reçine/karbon fiber kompozitlerinde fiber kırılmalarının ve bölgesel delaminasyonun ana hasar mekanizması olarak ortaya çıktığı bununla birlikte FMT malzemesinde titanyum ve PIXA-M termoplastik reçine arasında delaminasyonların olduğu tespit edilmiştir.

Şekil 2.7’de her üç kompozit malzeme de üç nokta eğilme testleri sonucunda fiber/matris ve metal/kompozit katman ara yüzeylerinde oluşan tipik hasar mekanizmaları gösterilmiştir.



Şekil 2.7: Üç nokta eğilme testleri sonucunda fiber/matris ve metal/kompozit katman ara yüzeylerinde oluşan tipik hasar mekanizmaları a)PEEK/Karbon b)PIXA-M/Karbon c) FMT d)FMT [71]

Kompozit malzemelerde kayma davranışını matris malzemesinin özellikleri etkilemektedir. Tabakalar arası kayma dayanımı fiberler ve matris arasındaki yapışma ile sağlanır. FMT malzemelerinde ise alüminyum ve kompozit katman arasındaki ara yüzey kritik etkiye sahiptir. Kısa kiriş kayma testleri kompozit malzemelerin tabakalar arası kayma dayanımının belirlenmesinde kullanılmaktadır. Kısa kiriş kayma test yöntemi kontrollü bir şekilde bilgi vermektedir ve tasarım spesifikasyonları için uygun değildir. Bu sınırlamaya rağmen, bu yöntem sayesinde elde edilen veriler diğer test yöntemlerinin tabakalar arası dayanımı ölçmede tam yeterli olamamasından ötürü tasarıma imkan vermektedir [25].

Reyes ve Cantwell [72] karbon fiber takviyeli epoksi/alüminyum içeren FMT malzemesinin ara yüzey kırılma özelliklerini tekil konsol kiriş testleri ile belirlemişlerdir. Yükleme hızının FMT malzemede oluşan hasar mekanizmalarının ve kırılma özelliklerine etkisini incelemişlerdir. Elde edilen sonuçlardan kırılma sonrasında kompozit katmanın çoğu bölgesinin alüminyum bileşene yapışık olarak kaldığı gözlenmiştir. 1 mm/dk hızla yapılan testlerde adhezif hasarlanma numunenin kenarlarına yakın bölgelerde olduğu bununla birlikte numunenin orta bölgesinde kompozit boyunca tabakalar arası hasarlanmanın varlığı tespit edilmiştir. 100 mm/dk

hızında gerçekleştirilen deneylerde ise açıkta kalan alüminyum yüzeyleri az olmasına rağmen çatlak ilerlemesi tabakalar arası tipte oluşmuştur.

Tabakalar arası kusurların başlangıcı ve ilerlemesi kompozit malzemelerin ana hasar mekanizmalarından biridir. Metalik katman ve fiber takviyeli polimer kompozit katman içeren tabakalı malzemelerde bu durum daha önem arz etmektedir. Delaminasyonun ilerlemesi genel olarak ilk çatlağın genişlemesi ve yükleme tipine bağlıdır. Marannano ve Pasta [73] analitik, nümerik ve deneysel olarak tabakalar arası kusurların varlığı ile oluşan mekanizmaların oluşumu ve ilerlemesi ile ilgili bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Cam fiber takviyeli epoksi kompozitleri ve FMT malzemelerinin tabakalar arası kırılma delaminasyon analizleri yapılmıştır.

Kompozit ve FMT malzemelerin ara yüzey dayanımına etki eden parametrelerin ve ara yüzeyde oluşan hasar mekanizmalarının uygulanan test yöntemlerine göre literatürdeki çalışmalardan incelenmesinden sonra sıcak pres tekniği ile üretilen deliksiz ve farklı delik formasyonlarına sahip FMT malzemelerin metal/cam elyaf keçe+PPS ara yüzeyinin mekanik davranışının araştırılmadığı saptanmıştır. Metal/kompozit katman ara yüzeyinde oluşturulan cam elyaf keçe+PPS matris sütunlarının ara yüzeyde eğilme ve kayma yüklemeleri altında oluşacak hasar mekanizmalarının değişimine nasıl etki edeceğinin belirlenmesi özellikle havacılık uygulamalarında kullanılan FMT malzemeler için önem arz etmektedir. Bu nedenden ötürü Doktora çalışması'nda farklı delik formasyonlarına sahip FMT malzemelerin metal/cam elyaf keçe+PPS ara yüzeyinin mekanik davranışı üç nokta eğilme, kısa kiriş kayma dayanımı ve tabakalar arası kayma dayanımı (TAKD) testleri ile belirlenmiştir.

#### **2.4. Çekme Test Yöntemi ile Fiber Metal Tabakaların Dayanımının Belirlenmesi ve Fiber Metal Tabakalarda Oluşan Hasar Mekanizmaları**

Moussavi-Torshizi ve diğ. [74] cam ve kevlar fiber içeren FMT malzemesinin çekme davranışına fiber oryantasyonunun etkisini incelemişlerdir. Alüminyum levhaların elastik-plastik davranışını göz önünde bulunduran modifiye edilmiş klasik tabaka teorisi ve sonlu elemanlar modeli temel alınarak yapılan nümerik bir simülasyon

yöntemi FMT malzemelerinin gerilme-genleme davranışının tahmininde kullanılmıştır. Test sonuçlarından  $0^\circ$  oryantasyonuna sahip fiber katmanları içeren FMT malzemesinin elastik modül, akma gerilmesi ve maksimum çekme gerilmesi değerlerinin arttığı gözlenmiştir.

Wu ve diğ. [29] dairesel deliğe sahip FMT malzemelerinin artık dayanımlarını belirleyebilmek için çekme testleri gerçekleştirmişlerdir. Çentiksiz ve çentikli iki yönlü fiber oryantasyonuna sahip FMT malzemelerinin çekme özellikleri ve çentik dayanımları mekanik testler yardımıyla belirlenmiştir. Ayrıca FMT malzemelerin çentik hassasiyeti ve artık dayanımları üzerine numunenin boyutları ve çentiğin büyüklüğünün etkisi araştırılmıştır. Numunenin genişliğinde ve merkezdeki deliğin çapındaki azalma ile cam fiber takviyeli FMT malzemelerin artık dayanımlarının arttığı ve çentik duyarlılığının ise delik boyutu ile arttığı belirlenmiştir. GLARE malzemesindeki deliğin varlığı dayanımın %40 oranında azalmasına sebep olmuştur. Tam ortasında delik içeren GLARE malzemesinin delaminasyon, fiber kırılması ve kayma şeklinde hasara uğradığı saptanmıştır. Tüm çentikli numunelerde belirgin bir üçgen şeklinde delaminasyon gözlenmiştir. Alüminyum katlarda kararlı olmayan kırılmadan önce kararlı olmayan çatlak ilerlemesi ve sadece plastik deformasyon olduğu belirlenmiştir.

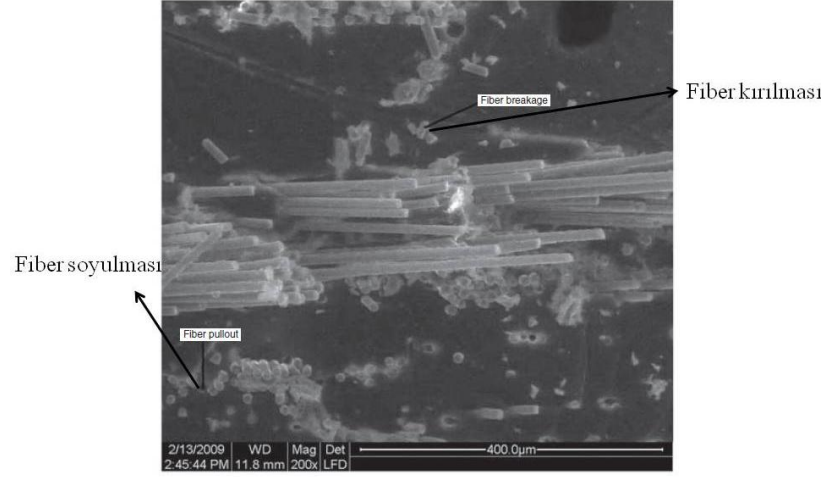
Iaccarino ve diğ. [75] 0/90 S2 cam/epoksi tabakası ve Al 2024 T3 levhaları içeren FMT malzemesinin çekme gerilme-genleme eğrisi, belirlenen normal gerilme seviyelerine bağlı olarak artık çekme genlemesi ve kayma gerilme-genleme eğrisinin belirlenebilmesi için mekanik testler gerçekleştirmişlerdir. FMT malzemesinin teorik olarak davranışını tahmin etmek için alüminyumun elastik olmayan davranışını hesaba katarak kalisk tabaka teorisi modifiye edilmiştir. Son hasarlanma durumu sırasıyla alüminyum ve kompozit katman için maksimum genleme ve Tsai-Hill kriteri varsayılarak hesaplanmıştır. Analizlerden tahmin edildiği gibi alüminyumun anizotropik davranışı akma gerilme değerini etkileyerek FMT malzemesinin çekme davranışını etkilediği belirlenmiştir.

Cortes ve Cantwell [76] farklı hacimde karbon fiber takviyeli kompozit içeren magnezyum alaşımlı FMT malzemelerin çekme davranışlarını incelemiştir. Üç

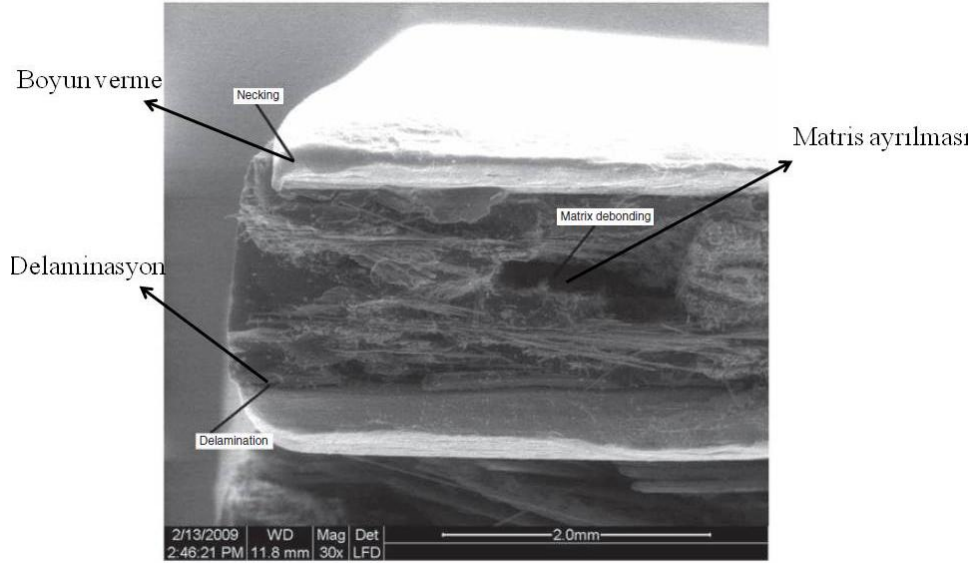
farklı kompozit hakim oranı belirlemişlerdir: 0.36, 0.57 ve 0.67. Üç farklı kompozit hakim oranına sahip FMT malzemelerinin ve magnezyum alaşımının tipik gerilme-gerilme eğrilerinden magnezyum alaşımının çekme dayanımının FMT malzemelere göre daha düşük olmasına rağmen elastik sınırın ötesinde yüksek süneklik derecesine sahip olduğu belirlenmiştir. Her üç FMT malzemesi için ise maksimum gerilmeye kadar neredeyse lineer davranış gösterirken maksimum gerilmeden sonra kompozit katların gevrek kırılma davranışı göstermesi nedeniyle hızlı bir düşüş gözlenmiştir. Numune gözlemlerinden kompozit-metal ara yüzeyine doğru dikey olarak çatlak ilerlemeden çatlağın kompozit katı enine olarak hasara uğrattığı saptanmıştır. Son olarak kompozit hacim oranının yapı içerisinde artması ile çekme dayanımının sürekli olarak arttığı belirlenmiştir.

Mathivanan ve diğ. [77] farklı fiber hacim oranlarında ve farklı metal kalınlıklarına sahip FMT malzemelerin çekme yüklemesi altındaki davranışlarını incelemişlerdir. Gerçekleştirilen çekme testlerinden, yapı içerisindeki metal kalınlığının miktarı arttıkça FMT malzemesinin elastik modülünün arttığı tespit edilmiştir. Metal kalınlığının 0.7 mm olduğu durumda kompozit katmanın alüminyum katının kırılmasından önce hasarlandığı saptanmıştır. Metal kalınlığının 0.7 mm'den az olduğu durumlarda ise, alüminyum katının ilk olarak kırıldığı ve hemen ardından kompozit katmanın hasarlandığı belirlenmiştir. Bu durumda yapı içerisinde delaminasyon oluşumu gözlenmiştir. Bunun nedeninin düşük metal hacim oranlarının FMT malzemesinin düşük akma noktası oluşumuna sebep olarak daha erken yapının plastik bölgeye girmesinden kaynaklanmaktadır. Plastik bölgede metal daha fazla gerilmeye karşı durmakta ve elastik fiber katına göre daha fazla deformasyona uğramaktadır. FMT malzemesinin maksimum dayanımı incelenecek olursa metal kalınlık oranı azaldıkça arttığı saptanmıştır. Yapı içerisindeki fiber hacim oranının değişimiyle FMT malzemesinin elastik modülündeki değişim incelenecek olursa, herhangi bir metal kalınlık oranı için artan fiber hacim oranı ile FMT malzemesinin elastik modülünün arttığı belirlenmiştir. FMT malzemesinin maksimum dayanımı incelenecek olursa fiber hacim oranı arttıkça arttığı saptanmıştır. Gerçekleştirilen taramalı elektron mikroskobu (TEM) analizlerinden kompozit katmanlarda fiber soyulması, fiber kırılması ve matris ayrılması gibi

hasarlanmaların olduğu (Şekil 2.8), alüminyum katlarda ise tipik sünek malzemelerdeki gibi boyun verme hasarlanmasının olduğu gözlenmiştir (Şekil 2.9).



Şekil 2.8: Kompozit katmanlarda çekme yüklemesi nedenli fiber soyulması ve fiber kırılması hasarlarının oluşumu [77]

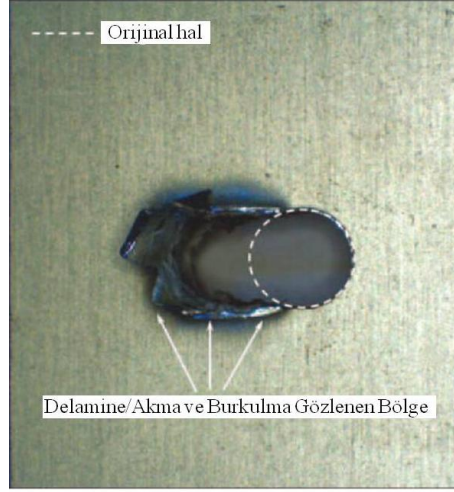


Şekil 2.9: Alüminyum katlarda çekme yüklemesi nedenli boyun verme, ara yüzeyde delaminasyon ve kompozit katmanda matris ayrılması hasarlarının oluşumu [77]

Krimbalis ve diğ. [78] ortotropik FMT malzemesinin pim yük taşıma davranışını çekme yüklemesi altında denemişlerdir. Gerçekleştirilen çalışmada amaç alüminyum katlardaki burkulmanın tespit edilmesi ve yük taşıma dayanımı değerlerinin ölçümünün yapılabilmesidir. Çekme testleri sonrası numunelerin hasarlanan bölgelerinin varlığı ve genişlemesinin gözlenebilmesi için numunelerden resimler



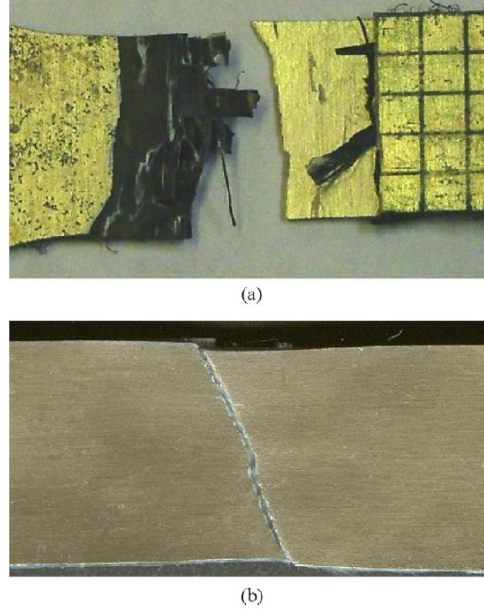
alınmıştır. Şekil 2.10’da gösterildiği gibi numunelerin pim bölgesinde delaminasyon, akma ve son olarak burkulma şeklinde hasarlandığı tespit edilmiştir.



Şekil 2.10: FMT numunelerin pim bölgesinde delaminasyon, akma ve son olarak burkulma şeklinde hasarlanması [78]

Khalili ve diğ. [79] farklı dizilimlerde cam fiber/epoksi tabakalar ile çelik ve/veya alüminyum levhalar içeren FMT malzeme üretimi gerçekleştirmişlerdir. Hem kendi aralarında hem de yekpare metaller veya fiber takviyeli kompozit malzemeler ile mekanik özelliklerini çekme, üç nokta eğilme ve darbe testleri ile karakterize etmeye çalışmışlardır. Çekme testlerinden, FMT malzemelerin spesifik dayanımlarının monolitik alüminyuma göre (% 46-103) ve monolitik çeliğe göre (% 38-91) daha yüksek çıktığı belirlenmiştir. Elastik bölgede yapı içerisindeki metal miktarının artması ile çekme modülünde artış yaşandığı saptanmıştır.

Reyes ve Kang [80] sadece PP ve cam fiber takviyeli PP kompozit tabakaları ve 2024-T3 alüminyum alaşımı içeren hafif FMT malzemesini üretmişlerdir. FMT malzemeleri hızlı tek adımda üretim yapabilen soğuk presleme yöntemi ile üretilmiştir. Yekpare alüminyum, kompozit malzemeler ve FMT malzemelerin çekme özellikleri çekme test yöntemi ile belirlenmiştir. FMT malzemesi için ise akma dayanımına kadar gerilme-gerinim eğrisinin benzer olarak lineer olduğu artan yükleme ile maksimum noktaya kadar sünek davrandığı tespit edilmiştir. Cam fiber takviyeli kompozit az genleme oranı ile gevrek davranış göstermiştir. Şekil 2.11’de çekme yüklemesi ile hasarlanmış PP/PP kompozit katmanlar içeren FMT malzeme ile cam fiber takviyeli kompozit katmanlar içeren FMT malzemesi gösterilmiştir.



Şekil 2.11: Çekme yüklemesi ile hasarlanmış a) PP/PP kompozit katmanlar içeren FMT malzeme ve b) cam fiber takviyeli kompozit katmanlar içeren FMT malzemesi [80]

Şekil 2.11'den her iki FMT malzemesi için farklı kırılma davranışı gösterdikleri görülmektedir. PP/PP kompozit katmanlar içeren FMT malzeme alüminyum alaşımının tipik boyun verme hasarlanması nedeniyle çekme bölgesi doğrultusunda uniform olarak hasarlanmıştır. Kırılma yüzeyi daha detaylı incelenecek olursa kompozit malzeme içerisinde fiberlerin soyulma hasarının olduğu gözlenmiştir. Cam fiber takviyeli kompozit katmanlar içeren FMT malzemesinde ise diğer alüminyum alaşımları ve termoset içerikli hibrit sistemlerde ortak olarak bulunan boyun verme ve bölgesel deformasyon oluşumu gözlenmiştir. Yapılan literatür araştırmasından çekme yüklemesine maruz kalan FMT malzemelerinin takviye elemanı olarak sürekli fiberlerin kullanıldığı ve malzemeye açılan deliklerin malzemenin çekme dayanımını düşürdüğü saptanmıştır. Takviye elemanı olarak genelde alüminyum metali kullanıldığı ve alüminyumun çekme yüklemesi altında sünek davranarak boyun verme şeklinde hasara uğradığı görülmüştür. Kompozit tabakaların ise fiber kırılması, matris ayrılması ve kayma şeklinde hasarlandığı belirtilmiştir. Bu bağlamda FMT üretiminden önce alüminyum levhalar yüzeyine uygulanan yüzey işlem adımları sayesinde metal/kompozit katman ara yüzeyinde oluşturulan adhezif yapışmanın yanı sıra cam elyaf keçe takviyesinin varlığı nedeniyle metal/kompozit katman ara yüzeyinde oluşturulan mekanik bağlantının ara yüzey çekme dayanımına etkisinin araştırılması hedeflenmiştir.

### 3. DENEYSEL ÇALIŞMA

#### 3.1. Polimer Matrisli Kompoziti ve Fiber Metal Tabakalı Kompoziti Oluşturacak Bileşenler

Son yıllarda yarı kristalin polimer matrisli kompozit malzemeler otomotiv ve havacılık sanayilerinde istenilen özelliklere sahip olmaları nedeniyle birçok uygulamada kullanılmıştır. Bu grupta yer alan termoplastik matrisler polietereterketon (PEEK), polipropilen (PP) ve polifenilen sulfid (PPS) vb.'dir. PPS'nin bu sektörlerde kullanılmasında tercih edilmesini sağlayan en önemli özelliklerden birisi yüksek işletme servis sıcaklığına, 225 °C, sahip olmasıdır. Bu özelliği, fenil grupları ile sülfür atomları arasındaki yüksek bağ enerjilerine bağlı olan yüksek erime sıcaklığına ve iyi termal kararlılığına dayanmaktadır [81]. Üretilen polimer matrisli kompozitin ve FMT malzemesinin matris malzemesi olarak PPS polimeri kullanılmış olup Ticona firmasından temin edilmiştir. Ticari kodu FORTRON PPS, 0205B4 olup toz halindedir. PPS'nin fiziksel, mekanik ve ısı özellikleri Tablo 3.1'de gösterilmiştir.

Tablo 3.1: PPS malzemesinin fiziksel, mekanik ve ısı özellikleri [82]

<b>Fiziksel Özellikleri</b>	
Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )	1350
Su emilimi (%)	0.02
<b>Mekanik özellikleri</b>	
Çekme modülü (1 mm/dk) (MPa)	4000
Kopmada çekme gerilmesi (5 mm/dk) (MPa)	66
Eğilme modülü (MPa)	3900
Eğilme dayanımı (MPa)	130
<b>Termal Özellikleri</b>	
Erime sıcaklığı (10°C/dk) (°C)	280
Çamsı geçiş sıcaklığı (10°C/dk) (°C)	90
Lineer termal gen. kats. (paralel) (E-4/°C)	0.53
Lineer termal gen. kats. (normal) (E-4/°C)	0.52

PPS matrisli kompozitlerde genellikle karbon fiber takviyesi uygulanmıştır [83]. Ancak karbon fiber cam fibere kıyasla daha maliyetli, geri dönüşümü mümkün olmayan bir takviye elemanıdır. Bu dezavantajlardan ötürü kompozit üretiminde fiber takviyesi olarak cam fiber seçilmiştir. Cam elyaf keçe takviyesi sıcak pres tekniği ile üretime uygun, düşük maliyetli oluşu, kolay işlenebilirlik, iyi yüzey ıslanabilme ve mekanik özelliklerinin yeterli seviyelerde olması sebebiyle doktora çalışması kapsamında takviye elemanı olarak seçilmesi kararlaştırılmıştır. Cam Elyaf A.Ş. firmasından temin edilen MAT 8 kodlu E cam elyafı içeren cam elyaf keçe malzemesi kullanılmıştır. PPS polimeri ile iyi ara yüzey oluşturabilmesi için cam elyaf keçe malzemesinin yüzeyi silan bağlama ajanı ile kaplanarak Cam Elyaf A.Ş. firması tarafından üretilmiştir. Üretimde kullanılan cam elyaf keçe malzemesinin ürün spesifikasyonu Tablo 3.2’de gösterilmiştir.

Tablo 3.2: Sıcak pres tekniği ile üretilen polimer matrisli kompozit ve fiber metal tabakalı kompozitin fiber takviyesi olarak kullanılacak olan cam elyaf keçe malzemesinin ürün spesifikasyonu

ÜRÜN SPESİFİKASYONU			
<b>Cam tipi</b>	:E	<b>Reçine uyumu</b>	:Polyester
<b>Elyaf çapı (<math>\mu</math>)</b>	:Nom.12	<b>Birim alan ağırlığı (<math>g/m^2</math>)</b>	:225 $\pm$ %7
<b>Split teksisi (<math>g/1000</math> m)</b>	:30	<b>Islanma</b>	:Çabuk
<b>Bağlayıcı türü</b>	:Silan	<b>Kırpılmış demet uzunluğu (mm)</b>	:50
		<b>Rulo genişliği (mm)</b>	:1000

Cam elyaf keçe takviyeli PPS kompozit üretiminin yanı sıra FMT malzemesinde sıcak pres tekniği ile üretilmesi hedeflenmiştir. Cam elyaf keçe takviyeli PPS kompozit üretimde kullanılan fiber takviyesi ve matris malzemesi fiber metal tabakalı kompozitte de kıyas yapabilmek için aynı tutulmuştur. Metal takviye elemanı ise literatür çalışmaları incelenerek seçilmiştir. Roman ve diğ. [84] PPS monomeri ve tek metal atomlarını kapsayan bir simülasyonla alüminyum, bakır, gümüş ve altına PPS’nin yapışmasını incelemişlerdir. Fonksiyonel yoğunluk teorisi temelli toplam enerji hesaplaması sonuçları PPS monomerinin sonundaki kükürde alüminyumun en iyi şekilde bağlandığını göstermiştir. Yapılan incelemeler

doğrultusunda toz PPS malzemesi ile en iyi bağlanmayı sağlayacak alüminyum malzemesinin takviye elemanı olarak kullanılmasına karar verilmiştir. Alüminyum uzun servis ömrü, kolay şekillendirilebilme, yüksek izolasyon gücü, hafiflik, korozyona karşı direnç, dayanıklılık özellikleri nedeniyle endüstriyel uygulamalarda tercih edilen bir malzemedir. Alüminyum levha malzemesi Assan Alüminyum firmasından temin edilmiştir. FMT malzeme üretiminde takviye elemanı olarak kullanılan alüminyum levha 5000 serisi olup kalınlığı 0.5 mm, 1 mm ve 1.5 mm olarak seçilmiştir. Gerçekleştirilen üretimlerde 0.5 mm ve 1 mm kalınlığına sahip alüminyum levhalar kullanılmıştır. Tablo 3.3'te kullanılan alüminyum levha malzemesinin fiziksel, mekanik ve termal özellikleri verilmiştir. 5000 serisi alüminyum levha malzemesinin korozyon direnci, anodlama özellikleri ve mekanik özelliklerinin iyi olması nedeniyle seçilmesi uygun görülmüştür. 5000 serisi alüminyum levha malzemesi otomotiv endüstrisinde panel parçalarında, çatı ve panel kaplamalarda kullanılmaktadır.

Tablo 3.3: Alüminyum levha malzemesinin fiziksel, mekanik ve termal özellikleri

Yoğunluk: 2,7 g/cm <sup>3</sup>
Erime sıcaklığı aralığı: 630-655 °C
Elastik Modül: 69000 N/mm <sup>2</sup>
20-100 °C arasında lineer genişleme katsayısı: 24x10 <sup>-6</sup> /K
25 °C'de termal iletkenlik (298 K): 2.01 W/cm.K
20 °C'de spesifik elektrik direnci (293 K): 0.033 Ω mm <sup>2</sup> /m

### 3.2. Fiber Metal Tabakalı Kompozitlerde Metal/Cam Elyaf Keçe+Matris Ara Yüzeyinin İyileştirilmesi İçin Alüminyum Levhalara Uygulanan Kimyasal İşlemler

Kaynakça [30]'da belirtildiği gibi, yapıştırma tekniklerindeki ilk deneyimlere göre, üç yönlü yüklemeye maruz kalan yapılarda uzun süreli hizmet kapasitesi kazandırılmak gerektiğinde yapıştırmada öncelikli yer alan yüzey iyileştirme göz ardı edilmemesi gereken en kritik adımdır [32,85]. Belirli bir yüzey iyileştirme bileşenin yüzeyini çeşitli yollarla: yüzeydeki atıkları arındırma; astar veya yapıştırıcı ile ıslanabilirlik; yüksek yüzey pürüzlüğü; mekanik ve hidrolitik olarak kararlılık gibi

özellikler sayesinde modifiye etmeyi sağlar [85]. Adhezif olarak yapıştırılmış fiber metal tabakalı kompozit üretiminde kullanılan yüzey iyileştirme yöntemleri ve gerçekleştirilen çalışmalar göz önüne alınarak üretilen fiber metal tabakalı kompozitlerin adhezif olarak yapıştırılması ve bu sayede istenen metal/fiber-matris ara yüzeyinin oluşturması için alüminyum levha yüzeylerine yapılan yüzey iyileştirme yöntemleri detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

### 3.2.1. Adhezif yapıştırmada kullanılan yüzey iyileştirmeler

Tablo 3.4: Metal yüzeyleri modifiye etmek için yapılan tüm yüzey iyileştirmeler

Yüzey İyileştirme	İyileştirme Tipi	Kaynakça
Kum Püskürtme (Grit-blasting)	Mekanik	[86-89]
Kromik-Sülfirik asit (CAE)	Asitle Dağlama	[90,91]
Sulfo-ferrik asit (P2)	Asitle Dağlama	[92]
Forest Product Laboratory (FPL)	Asitle Dağlama	[93]
Alkalin	Dağlama	[90,94]
Kromik asit anodik oksidasyon (CAA)	DC- Anodik oksidasyon	[95]
Fosforik asit anodik oksidasyon (PAA)	DC-Anodik oksidasyon	[85,96,97]
Sülfirik asit anodik oksidasyon (SAA)	DC- Anodik oksidasyon	[97,98]
Borik-Sülfirik asit anodik oks. (BSAA)	DC- Anodik oksidasyon	[99]
Fosforik asit anodik oks. (AC-PAA)	AC- Anodik oksidasyon	[97]
Sülfirik asit anodik oks. (AC-SAA)	AC- Anodik oksidasyon	[97]
Silan	Bağlama/Oksidasyon	[88,100,101]

Tablo 3.4'te gösterildiği gibi, metal yüzeylerinin modifikasyonu için uygulanan tüm işlemler sınıflandırılırsa:

1. Çözücü ile yağ giderme,
2. Mekanik (abrazif ve kum püskürtme),
3. Kimyasal (Asitle Dağlama),
4. Elektrokimyasal (anodik oksidasyon),
5. Bağlama ajanı (silan),
6. Kuru yüzey iyileştirmeler (lazer ve plazma-ark).

Belirtilen yüzey iyileştirme yöntemlerinin nasıl uygulandığının ve her biri için kullanılan yüzey modifikasyonu malzemelerinin detaylı bir şekilde açıklanması

gerekmektedir. Yukarıda belirtilen elektrokimyasal ve kuru yüzey iyileştirmeleri doktora çalışması kapsamında üretilen FMT numunelerde kullanılan alüminyum levhalara uygulanmamıştır. Yapılan incelemelerde elektrokimyasal iyileştirme genel anlamda kullanıldığı için doktora çalışması'nda ele alınmasına rağmen, kuru yüzey iyileştirmeler irdelenmemiştir.

### **3.2.1.1. Çözücü ile yağ giderme**

Çözücü ile yağ giderme önemli bir işlemdir çünkü kimyasal bağlanmaların biçimini engelleyen yüzeyi kirletici maddelerin giderilmesini sağlamaktadır. Yine de, çözücü ile yağ giderme temiz bir yüzey sağlamasına rağmen, uzun süreli yapışma dayanımı için uygun yüzey koşullarını sağlayamaz [32].

Yağ giderme adımı genellikle trichloroethylen, 1,1,1-trichloroethan, perchloroethylen veya dichloromethan gibi klor içeren çözücülerle yada metil etil keton, metanol, isobutanol, toluen veya aseton gibi klor içermeyen çözücülerle yapılır [99]. Tüm alüminyum alaşımlı levhalara ilk olarak diğer yüzey iyileştirme adımlarından önce yağ giderme işlemi uygulanmalıdır. Test numunelerinin üretiminde ilk adım metil etil keton (MEK) kullanılarak alüminyum bileşenlerinin yüzeyindeki yağı gidermektir [94].

### **3.2.1.2. Mekanik (abrazif ve kum püskürtme)**

Çok-aşamalı programlarda bir ön hazırlık adımı olarak, mekanik abrasif sırasıyla makro-yüzey pürüzlülüğü kazandırılmış yüzey, yüzey dokularında farklı yüzey pürüzlülüğü dereceleri ve istenmeyen oksit tabakasının giderilmesi için kullanılmaktadır [30]. Bu metot tipik olarak zımpara kağıdı ile bileşenin yüzeyinin abrasif olarak pürüzlendirilmesidir. Bu mekanik iyileştirme makro-yüzey pürüzlülüğüne sahip yüzey gibi yüzey topoğrafyasının modifikasyonunu ve yüzeyin ıslanabilirliğini sağlayan fiziko-kimyasal değişimi göstermektedir [86].

Alumina, silika parçacıkları veya cam partikülleri kullanılarak uygulanan püskürtme ile ön iyileştirme topografyayı ve pik-ve-vadi tipli morfolojinin oluşumu ile

alüminyum bileşeninin kimyasal durumunu değiştirmektedir [99]. Genel anlamda, yağ giderme yapışmanın sağlanması için yapılan en düşük ön iyileştirme işlemidir. Kum püskürtme veya diğer mekanik abrazyon yöntemleri ilk yapışma seviyelerini arttırmada yararlı olduğu gözlemlenmiştir [99].

Çeşitli araştırmalarda alüminyum alaşımları için farklı mekanik abrazyon yöntemleri veya farklı orandaki kum püskürtme uygulanmıştır. Temiz, kuru, basınçlı hava ortamında alümina parçacıklarının kullanılmasıyla uygulanan kum püskürtme yöntemi mükemmel yapışma sağlanması için metalik yüzeyin modifikasyonunda mantıklı bir yüzey aktivasyonu adımı olarak kullanılmaktadır [86-89].

### **3.2.1.3. Kimyasal (asitle dağlama)**

En yaygın kullanılan kimyasal iyileştirme kromik-sülfirik asitle dağlamadır [85,102]. Bu iyileştirme sülfirik asit ve potasyum dikromat solüsyonuna bileşenin daldırılmasını içermektedir. Tipik olarak, kimyasal iyileştirme yağ giderme, alkaline temizleme, ve elektrokimyasal iyileştirme arasındaki bir üretim aşamasıdır [30].

Üç klasik asitle dağlama solüsyonu metalik yüzeyleri modifiye etmede kullanılmaktadır: Kromik-Sülfirik asit (CAE) [103], Forest Product Laboratory (FPL) [94], ve Sülfü-ferrik asitle (P2) dağlama. En etkili dağlama kromik ve hidroflorik asitlerin karışımından oluşmaktadır. Yine de, kromatsız asit dağlayıcıları iyi yapışma oluşturabildikleri gözlemlenmiştir [85,104].

Anotlandırılmış yüzeyler oluşturulmadan asitle dağlanarak iyileştirilmiş yüzeylere sahip temel yapılandırılmış yapılarda uygun olmayan tutarsız sonuçların ortaya çıktığı rapor edilmiştir [85]. Bunun nedeninin elektrokimyasal yöntemde anodik oksidasyonla daha önceden kimyasal olarak asitle dağlanmış yüzeylerde kontrollü oksit tabakasının oluşturulmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Kimyasal asit dağlama ile yapılan yüzey iyileştirmesinde kullanılan asidin konsantrasyon oranı, uygulama sıcaklığı ve süresi Tablo 3.5'te verilmiştir.



Tablo 3.5: Kimyasal asit dağlayıcıları ve uygulama yöntemleri

Kimyasal Asit Tipi	Uygulama Yöntemi	Kayn.
CAE	60 °C' de 15 dakika 50g/l potasyum dikromat ile (97% v/v) oranında 330 ml/l kromik-sülfirik asitli sulu solüsyona daldırma ve daha sonra suda yıkama	[90]
	65 °C' de 8 dakika 127 g/l ferrik sülfat ve (97% v/v) oranında 185 ml/l kromik-sülfirik asitli sulu solüsyona daldırma ve daha sonra suda yıkama	[90]
	65 °C' de 15 dakika solüsyona daldırma, daha sonra saf suda yıkama	[91]
P2	Fe(III) içeren sulu asidik solüsyonda yüzeyin iyileştirilmesini içermektedir. (1) 65 °C' de 8 dakika P2 solüsyonuna daldırma (2) 2 veya 3 dakika numuneyi suda yıkama (3) 30 dakika 60 °C' de fırında alüminyum çubukları kurutma	[92]
FPL	62 + 2°C'de 30 dakika FPL solisyonunda iyileştirme. Asitle iyileştirmeden sonra, 20 dakika alüminyum soğuk suda yıkanmalı ve son olarak 30 dakika 40°C'de fırında kurutulmalıdır.	[93]
Alkalin	60 °C'de 1 dakika 100g/l NaOH solüsyonuna daldırma ve daha sonra suda yıkama	[90]
	60 °C'de 2 dakika ağırlıkça %10 NaOH solüsyonuna daldırma	[94]

#### 3.2.1.4. Elektrokimyasal (anodik oksidasyon)

Metal ve adhezif arasındaki iyi yapışma alüminyum yüzeylerinin alkalin solüsyonunda veya organik bir çözücüde yağının giderilmesi ve sulu kromik-sülfirik asit solüsyonunda dağlanması ile sağlanabilir. Yine de, bu yüzey ön iyileştirme işlemi korozyonun oluşabileceği çeşitli bağlanmamış bölgelerde yeterli olamayabileceği belirlenmiştir. Kromik-sülfirik asitle dağlamadan sonra yapıştırmadan önce anotlama alüminyum yüzeyine yapılırsa korozyon şüphesi azaltılacaktır [96]. Adhezif olarak yapıştırılmış alüminyum bağlantılarının optimum dayanımını sağlamak için, anodik oksidasyon yöntemi havacılık endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Anodik oksitleme ince bir oksit filmi olup, hidrasyona karşı yüksek dirençli bir oksit biçimi ve yüksek derecede mikro-yüzey pürüzlülüğü sağlamaktadır [32]. Uçak bileşenleri gibi kritik uygulamalarda yüksek dayanımlı alüminyum alaşımlarının yapısal adhezif yapıştırılmasında dengeli iyileştirme için

kromik asitli anotlama (CAA) veya fosforik asitli anotlama (PAA) solüsyonlarında anodik oksidasyon tercih edilmektedir [105]. Kaynakça [99]'da açıklandığı gibi, çoğu çalışmada, DC elektrokimyasal ön iyileştirme başlangıç adhezyonu için en iyi seviyeleri ve dayanımı sağladığı saptanmıştır [85,97,106,107]. Yaygın olarak üç elektrokimyasal yöntem ön bağlama uygulamalarında kullanılmaktadır: Fosforik asitli anotlama (PAA), Kromik asitli anotlama (CAA) ve Sülfirik asitli anotlama (SAA). Bunların dışında Boeing'in patentine sahip olduğu Borik-sülfirik asitli anotlama (BSAA) çevresel yönetmeliklere uyum için CAA'nın yerine kullanılmaktadır [108]. AC anodik oksidasyon uygulanabilir, dirençli ve doğaya uyumlu bir yöntemdir. DC anodik oksidasyondan farklı olarak sıcak AC anodik oksidasyon yönteminde iyileştirilmiş yüzeyde hidrojen gazı oluşturulur [30]. Metalik yüzeylerin iyileştirilmesi için uygulanan elektrokimyasal iyileştirmeler Tablo 3.6'da gösterilmiştir.

Tablo 3.6: AC ve DC elektrokimyasal iyileştirme

İyileştirme Tipi	Elektrolit (Ağır.%)	Voltaj (V)	Süre (dk.)	Sıcaklık (°C)	Kaynakça
PAA	10 (H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> )	10 (DC)	20	25	[97]
SAA	16 (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )	1.5 (DC) (Akım Yoğ. A/dm <sup>2</sup> )	20	20	[97]
BSAA	5.0–10.0 H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub> /30.0– 50.0 H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	15±1 (DC)	18-22	26.7±2.2	[99]
SAA		15 (DC)	22	15	[98]
CAA	2.5–3.0 CrO <sub>3</sub>	40.0±1.0/50.0±1.0 (DC)	35–45	40.0±2.0	[95]
PAA-AC	10 (H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> )	4 (AC)	30 sn.	50	[97]
SAA-AC	15(H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )	10 (AC)	12 sn.	80	[97]

### 3.1.2.5. Bağlama ajanı (silan)

Silan bazlı ürünler doğaya uyumlu olmalarından ötürü ön iyileştirme çökmesi için ilginç bir malzeme olma yolunda olup geleneksel ön iyileştirmede kullanılan kromatlar gibi kullanılabilirler [100]. Silan kaplamalar alüminyum ve alaşımları, bakır, demir ve çelik, çinko ve magnezyum içeren alaşımlar gibi çeşitli metallerde kullanılması düşünülen çoklu-metal yüzey ön-iyileştirmeleridir [109].

Çoğu çalışmada, alüminyum yapıştırıcılarının dayanımını arttırmak için öncelikli kullanılan  $\gamma$ -glycidoxypropyltrimethoxysilan ( $\gamma$ -GPS) gibi silanların yararlı olduğunun gözlenmiş olması yeterli bir ölçüttür. Bu metal (oksit) ve silan arasında kararlı biçimdeki kovalent bağların oluşumunu sağlamaktadır ve metal ile polimer arasındaki orta modüllü bölge olan uygun ara faz formasyonunu oluşturur ki bu bölge gerilme iletimini kolaylaştırmaktadır [101,110]. Fedel ve diğ. [100] su bazlı silanlı ön iyileştirmenin galvanizli çelik üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Üç farklı silan ön iyileştirme çökeltmesi için kullanılmıştır: Glycidoxypropyltrimethoxysilan, Tetraethoxysilan ve Methyltriethoxysilan. Elektrokimyasal testler ile silan tabakasının sadece inorganik bileşen ile organik kaplama arasında bağlama ajanı rolü oynamayıp ayrıca oksijen ve suya karşı iyi bir sınırlama etkisi oluşturduğu saptanmıştır. Rider ve Arnott [88] silan katmanının adhezif olarak yapıştırılmış bağlantıların hidrolitik kararlılığını arttırdığını açıklamışlardır.

### **3.3. Fiber Metal Tabakalı Kompozitlerde (Alüminyum/cam elyaf keçe takviyeli PPS kompoziti) Metal/Cam Elyaf Keçe-Matris Ara Yüzeyinin İyileştirilmesi İçin Alüminyum Levhaya Uygulanan Kimyasal İşlemler**

Bölüm 3.2’de FMT malzemelerin adhezif olarak yapıştırılmasında metal yüzeylerin iyileştirilme yöntemleri kapsamlı bir şekilde ele alınmıştır. Gerçekleştirilen incelemeler ışığı altında Doktora çalışması’nda üretilen FMT malzemenin metal takviyesi olan alüminyum levha yüzeylerine uygulanan yüzey iyileştirme adımları ve belirtilen işlem adımlarında metal yüzeylerine ne şekilde uygulama yapıldığı Tablo 3.7’de verilmiştir. Tablo 3.7’de belirtilen işlem adımlarından en önemlisi iyi bir yüzey hazırlamadan sonra yüzeyin silanlanmasıdır. Gerçekleştirilen üretimlerde sadece silanın ağırlıkça yüzdesi değiştirilmiş (%1, %2 ve %3) ve silanlama işleminin metal/cam elyaf-matris ara yüzeyinin iyileştirmesine etkisi incelenmiştir. Optimum ağırlıkça silan konsantrasyonunun saptanabilmesi için FMT numunelere çekme, üç nokta eğilme ve TAKD testleri uygulanmıştır. Belirtilen testler sonucunda elde edilen veriler yardımıyla optimum ağırlıkça silan konsantrasyonu belirlenmiş ve düşük hızlı düşen ağırlık ve çekme deneylerine tabi tutulacak ikinci grup FMT numuneler sıcak pres tekniği ile üretilmiştir.

Tablo 3.7: Üretilmesi hedeflenen FMT malzemelerin metal takviyesi olan alüminyum levhaya uygulanan yüzey iyileştirme yöntemleri ve uygulama biçimleri

İşlem Sırası	Uygulanan Yöntem ve Kullanılan Malzeme	Uygulama Şekli
1	Yağ Giderme Metill etil keton (MEK)	MEK içeren solüsyona alüminyum levha 10 dakika süre ile daldırılır. Daldırma işleminden sonra suyla yıkanan sac levha etüvde 100 °C’de 15 dakika bekletilerek kurutulur.
2	Mekanik Zımpara kağıdı (180 grit)	Yağı giderilen alüminyum levha 180lik zımpara kağıdı ile tek yönlü olarak yüzey parlaklaşınca kadar zımparalanır. Daha sonra yüzeye hava ve su tutulur. Yüzeydeki zımpara nedenli tozların giderilmesinden sonra etüvde 100 °C’de 15 dakika bekletilerek kurutulur.
3	Kimyasal (Asitle Dağlama) Sodyum Kromat+ Sülfirik Asit Solüsyonu	<u>Karışım Oranı:</u> 1 litre sülfirik aside daha önce 50 ml saf suda çözüldürülmüş 50 gr sodyum kromatın eklenmesi.  Saf suda çözülmüş olan sodyum kromat yavaş yavaş sülfirik asit üzerine dökülür. Dökme işleminde sıcaklık 70°C’lere kadar çıkmaktadır. Çözülmüş sodyum kromatın tamamı döküldükten sonra çözeltinin 40°C’lere kadar düşmesi beklenir. Zımpara işleminden sonra yüzeyi pürüzlendirilen alüminyum levha 40 °C’de 10 dakika bekletilip daha sonra suyla yıkanıp, bezle kurutulur.
4	Bağlama ajanı (Silan) $\gamma$ -glycidoxypropyltrimethoxysilan ( $\gamma$ -gps)	<u>Karışım Oranı:</u> %50 Etil Alkol + %50 Su (Hacimce) Yaklaşık 1 litrelik etil alkol su karışımına Ağırlıkça %1 Silan konulmaktadır. (optimum silan konsantrasyonunun belirlenebilmesi için silan konsantrasyonu ağırlıkça %1, %2 ve %3 olarak seçilmiştir)  Etil alkol su karışımına silanın istenen yüzdede eklenmesinden sonra karışım 30 dakika karıştırılır. Karıştırma işleminin tamamlanmasından sonra alüminyum levha 10 dakika çözelti içerisine daldırılır. Daldırma işleminden sonra metal yüzeyler etil alkol çözeltisinde yıkanır. Yıkama işlemi gerçekleştirildikten sonra etüvde 100 °C’de 60 dakika bekletilerek kurutulur.

### 3.4. Polimer Matrisli Kompozit (Cam elyaf keçe takviyeli PPS kompoziti) ve Fiber Metal Tabakalı Kompozitlerin (Alüminyum/cam elyaf keçe takviyeli PPS kompoziti) Üretim Yöntemi (Sıcak Pres Tekniği)

Doktora çalışmasında üretilen cam elyaf keçe takviyeli PPS kompoziti ve FMT malzemesi için Carver marka 25-12-2H model numaralı 25 ton yük kapasiteli,

maksimum sıcaklığı 340 °C olan ve alt ve üst plakaları 30x30 cm<sup>2</sup> boyutuna sahip sıcak pres kullanılmıştır. Şekil 3.1’de sıcak pres gösterilmektedir.

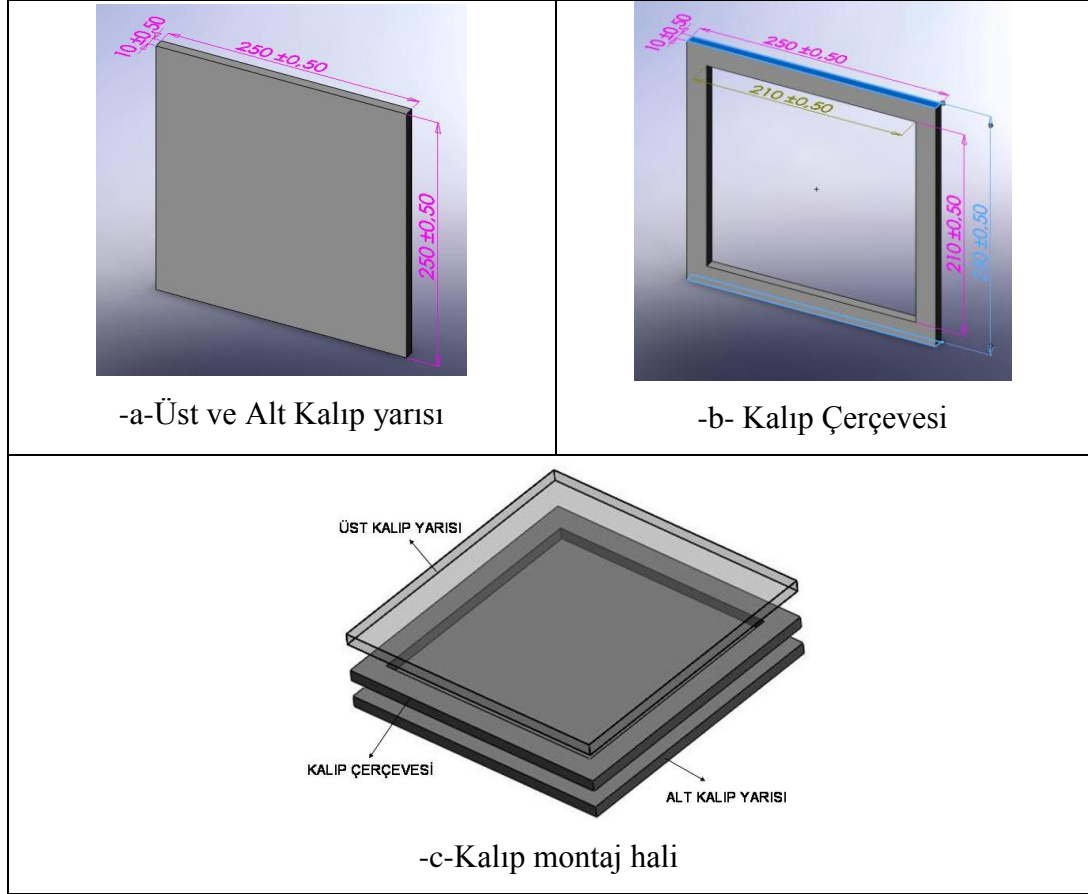


Şekil 3.1: Carver marka sıcak pres cihazı

Sıcak pres tekniğinde imal edilen kompozit üretiminde saptanan önemli bir husus ise PPS polimerinin havanın olumsuz etkilerinden (nem) giderilmesi gerekliliğidir. Sıcak pres tekniği ile üretilen her iki kompozit malzemenin üretiminde matris malzemesi olarak kullanılan toz PPS polimerinin etüvde camsı geçiş sıcaklığından ( $T_g$ ) daha düşük bir sıcaklıkta (75 °C) 24 saat bekletilmiştir. Sıcak pres tekniği ile yapılan kompozit malzeme üretimlerinde kalıp malzemesi olarak paslanmaz çelik tercih edilmiştir. Bu yöntemde düzlemsel parçalar üretileceği için karmaşık olmayan kalıplar üretilmiştir. Sıcak pres tekniğinde kompozit malzeme üretimi için kullanılan paslanmaz çelik kalıbın parçaları ve kalıbın montaj hali şematik olarak Şekil 3.2’de gösterilmiştir.

Sıcak pres tekniğinde yapılan üretimde polimer matrisli kompozit ve FMT numuneleri elde edebilmek için kalıp çerçevesi boyutu 210 mm x 210 mm olarak belirlenmiştir. Farklı kalınlıklarda kompozit numuneler elde edebilmek için üç farklı kalınlıkta kalıp çerçevesi yapılmıştır. Kalıp çerçevesi 1 mm, 2 mm ve 5 mm kalınlıklara sahip kompozit malzemelerin üretimine uygun olarak tasarlanmıştır. Üretilecek olan her iki türdeki kompozit malzemeye düşük hızlı düşen ağırlık darbe,

çekme, TAKD ve üç nokta eğilme testleri uygulanacağından 5 mm kalınlıkta kompozit plaka üretebilecek kalıp çerçevesinin seçilmesi uygun görülmüştür.



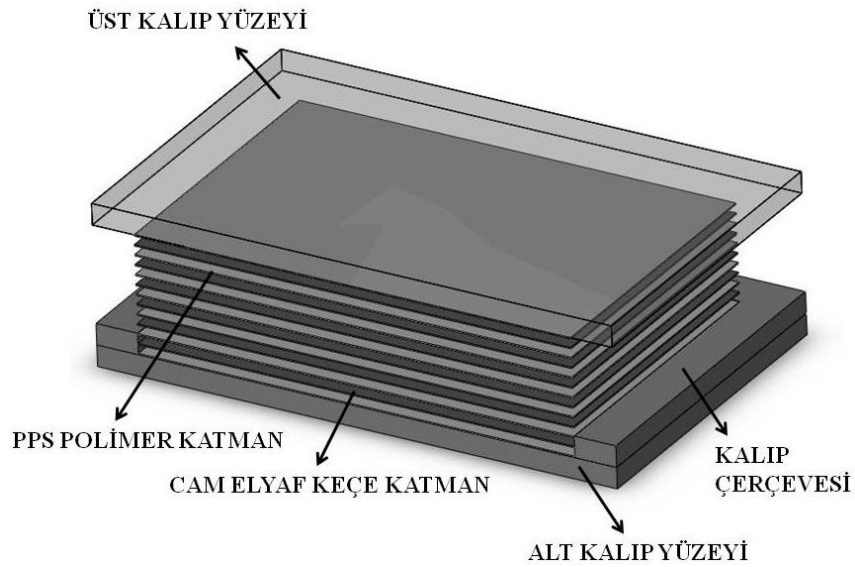
Şekil 3.2: Paslanmaz çelik kalıbın parçaları ve kalıbın montaj hali

Düşük hızlı düşen ağırlık, üç nokta eğilme ve TAKD testlerine tabi tutulacak sıcak presleme tekniği ile üretilen cam elyaf keçe takviyeli PPS kompozitlerin ve FMT malzemelerin üretim adımları sırasıyla belirtilecek olursa; Cam elyaf keçe takviyeli PPS kompozitlerinin üretimi için öncelikle kalıp çerçevesi boyutuna uygun cam elyaf keçelerin kesilmesi işlemi yapıлып daha sonra kalıp çerçevesi hacmine uygun miktarda toz halindeki polimer malzeme hazırlanmaktadır. Kalıp çerçevesi hacminin uygun olarak matris ve cam elyaf keçe malzemesi ile doldurulabilmesi için fiber hacim oranı hesaplanmıştır. Yapılan literatür araştırmasında kompozit malzeme içerisinde cam elyaf keçe hacim oranının yaklaşık %20 olması halinde çekme, eğilme ve darbe dayanım değerlerini arttırdığı saptanmıştır [111]. Ayrıca artan fiber hacim oranı ile (% 40 değerlerine kadar) kompozit malzemenin rijitliğinde (çekme ve eğilme modülünde) artış meydana geldiği fakat bununla birlikte yüksek oranda

kompozitte boşluk oluşması nedeni ile fiberlerin istenilen dayanımı gösteremediği belirtilmiştir [111,112]. %20 fiber hacim oranına sahip polimer matrisli kompozit üretimi için fiber hacim oranı denklem 3.1'e göre hesaplanmıştır [113];

$$V_f = \frac{\rho_m W_f}{\rho_f W_m + \rho_m W_f} \quad (3.1)$$

Denklemden  $V_f$  fiber hacim oranını,  $W_f$  fiber ağırlığını,  $W_m$  matris ağırlığını,  $\rho_f$  fiber yoğunluğunu ve  $\rho_m$  matris yoğunluğunu simgelemektedir. Yapılan hesaplamalar vasıtasıyla polimer matrisli kompozitte cam elyaf keçe hacim oranının yaklaşık %25 değerlerinde olduğu saptanmıştır. %25 cam elyaf keçe hacim oranına sahip polimer matrisli kompozit için 1 katı 19.5 gr olan 6 kat cam elyaf keçe takviyesi ve 1 katı 25 gr olan 7 kat toz PPS polimerinin kalıp çerçevesine yerleştirilmesi uygun görülmüştür. Şekil 3.3'te sembolik olarak polimer matrisli kompozit malzemenin sıcak pres tekniği ile üretimi için matris ve takviye malzemesinin paslanmaz çelik kalıba yerleştirilmesi gösterilmiştir.



Şekil 3.3: Polimer matrisli kompozit malzemenin sıcak pres tekniği ile üretimi için matris ve takviye malzemesinin paslanmaz çelik kalıba yerleştirilmesi

PPS polimerinin kalıp yüzeylerine yapışmaması için 0.5 mm kalınlığında teflon film ayırıcı eleman olarak kullanılmıştır. Teflon film kullanılmasının bir diğer avantajı ise üretim sonrası cam elyaf keçe takviyeli PPS kompozit malzemenin yüzeyinin düzgün

çıkmasıdır. Kalıp içerisine yerleştirilen malzeme önceden 340 °C'ye ısıtılmış sıcak presin tam ortasına gelecek şekilde yerleştirilmiştir. Sıcak presin üst ve alt tablasıyla kalıp alt ve üst yüzeylerinin sürekli temas halinde olmaları sağlanmıştır. Sıcak pres tekniğinde üretilen kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini etkileyecek olan sıcak pres üretim parametrelerinin optimum değerlerinin saptanabilmesi için literatür çalışması yapılmıştır. Yapılan incelemelerde kompozit üretiminde genellikle ön ısıtma yapıp basınç altında kalıplama yapılmış olup, ön ısıtma yapılan fırından ara ürünün prese geçirilme zamanı ve ürünü muhafaza eden kalıbın sıcaklığı ek üretim parametreleri olarak göze çarpmaktadır [114-117].

Ürünü tutan kalıbın sıcaklığının üretilen malzemenin mekanik özelliklerini etkilediğinden sıcak pres cihazına polimer matrisli kompoziti oluşturan matris ve takviye malzemeleri ile paslanmaz çelik kalıp 20 dakika ön ısıtmaya tabi tutulmuştur. Kalıpların sıcak prese konulması ile sıcak presin sıcaklığı 300 °C'ye kadar düşmüş daha sonra ise kalıp yarılarının ısınması ile birlikte tekrar 340 °C'ye çıkmıştır. Bu olay yaklaşık 20 dakikada gerçekleşmiştir. Yapılan literatür araştırmasından diğer önemli parametrenin kalıpta tutma süresi olduğu saptanmıştır [114,116,118]. Wakeman ve diğ. [114] ve Giles ve Reinhard [116] kalıpta tutma süresinin basınçsız yaklaşık 3-4 dakika olduğunu belirtirken, Vlasveld ve diğ. [118] bu sürenin 6 dakika olduğunu çalışmalarında belirtmişlerdir. Doktora çalışmasında sıcak preste ön ısıtmaya tabi tutulan kalıbın sahip olduğu ısıyı toz PPS polimerine aktarması ve polimerin aldığı ısı ile eriyip cam elyaf keçe takviyesinin içine nüfuz edip iyi bir ara yüzey oluşması için kalıp 5 dakika basınç uygulanmadan sıcak preste bekletilmiştir.

PPS polimerinin ısı nedeniyle erimeye başlayıp cam elyaf keçe takviye katlarına sızmasıyla mevcut kalınlıkta azalma gözlenmiştir. Üst kalıp yarısının sıcak pres üst tablası ile temasının kaybolmaması için hava alma diye tabir edilen basınç uygulanmadan sıcak presin üst tablası hidrolik krika yardımıyla aşağı indirilip üst kalıp yarısına temas ettirilmiştir. Presleme aşamasından sonra üretilen kompozit malzemenin tokluğunun arttırılması için suda hızlı soğutma yapılmıştır. Sıcak pres cihazı su hattına bağlı olup soğutma esnasında sıcak presin üst ve alt tablalarının bağlı olduğu su hattı ile numune oda sıcaklığına kadar soğutulmaktadır. Sıcak pres üretim parametreleri Tablo 3.8'de verilmiştir.



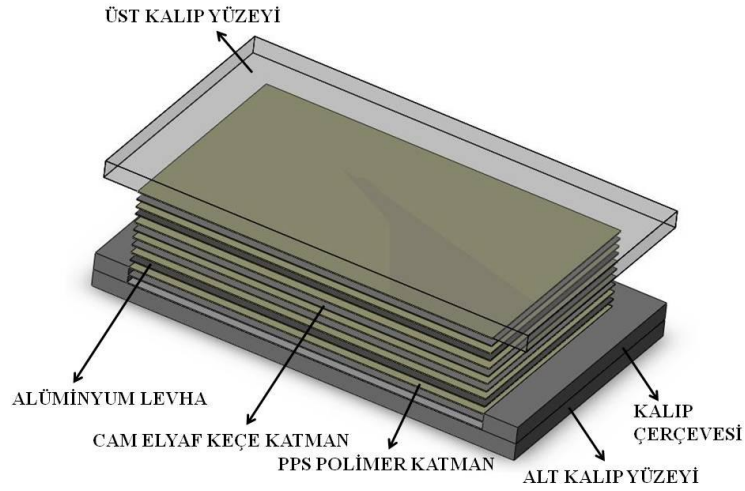
Tablo 3.8: Sıcak pres üretim parametreleri

Üretim Parametreleri	
Kalıp Sıcaklığı	50 °C
Kalıplama Sıcaklığı	340 °C
Kalıplama Süresi	340 °C'de 5 dk.
Basınç	340 °C'de 1 dk 10.3 MPa
Soğutma Şekli	Su ile
Soğutma Hızı	16 °C/dk

Camsı geçiş sıcaklığının ( $T_g$ ) altına inildiğinden kalıp yarıları elle açılarak üretilen cam elyaf keçe takviyeli PPS kompozit plaka kalıptan çıkarılmıştır. Kalıptan çıkan cam elyaf keçe takviyeli PPS kompozit plakanın boyutu şerit testerede çapakların alınmasından sonra 200 mm x 200 mm x 4 - 4.20 mm olmuştur. Son olarak düşük hızlı düşen ağırlık darbe ve üç nokta eğilme deneylerinde mekanik özellikleri belirlenecek olan cam elyaf keçe takviyeli PPS kompozitlerin uygulanacak deneylere uygun olarak istenen boyuta getirilmesi için dairesel testerede kesim işlemi gerçekleştirilmiştir.

Cam elyaf keçe takviyeli PPS kompozit malzemenin sıcak pres tekniği ile üretimi gerçekleştirildikten sonra metal takviyesinin mekanik özelliklere etkisinin saptanabilmesi için FMT malzemesi üretimi sıcak pres tekniği ile gerçekleştirilmiştir. Cam elyaf keçe takviyeli PPS kompozit üretiminde kullanılan paslanmaz çelik kalıp FMT malzemesi üretiminde de kullanılmıştır. Düşük hızlı düşen ağırlık, TAKD ve üç nokta eğilme testlerine tabi tutulacak FMT malzemesinin kalıba yerleştirilmesi şematik olarak Şekil 3.4'te gösterilmiştir.

FMT malzemesi üretiminde 2 kat 0.5 mm kalınlığında alüminyum levha, 4 kat cam elyaf keçe ve 7 kat toz halinde PPS polimeri kullanılmıştır. Kullanılan toz halindeki PPS polimerinin miktarı polimer matrisli kompozit malzemedekiyle aynı tutulmuştur. FMT malzemelerinin sıcak pres tekniği ile üretim adımları ve üretim parametreleri polimer matrisli kompozit üretimi ile aynı tutulmuş olup bu sayede metal takviyesinin üretilen kompozit malzemenin mekanik özelliklerine etkisi saptanmaya çalışılmıştır.



Şekil 3.4: FMT malzemesinin kalıba yerleştirilmesi

Üretim esnasında paslanmaz çelik kalıba Şekil 3.4’te belirtildiği gibi yerleştirilen alüminyum katmanlara sıcak pres üretiminden önce Bölüm 3.3’te belirtilen yüzey iyileştirme işlemleri uygulanmıştır. Üç nokta eğilme, TAKD ve çekme deneyleri ile ağırlıkça optimum silan konsantrasyonun belirlenebilmesi için FMT malzemelere ön testler tabii tutulmuştur. Yüzeyi iyileştirilmiş alüminyum levhaların yüzeylerine herhangi bir delik açılmamıştır.

Optimum silan konsantrasyonun belirlenmesinden sonra adhezif olarak birleştirilmiş fiber metal tabakaların metal/cam elyaf keçe+matris malzemeleri arayüzeyinde mekanik olarak da bağlantı oluşturmak için uygulanan test yöntemine göre farklı formasyonlarda, farklı delik çaplarında ve farklı delik sayılarında alüminyum levha yüzeylerine delikler açılmıştır. Metal/cam elyaf keçe+PPS matris arayüzeyinde oluşturulan mekanik bağlantının delik formasyonları uygulanan test yöntemlerinde gösterilmiştir. Alüminyum levha yüzeylerine delik açılma işlemi yüzey iyileştirme işlemleri ve sıcak pres üretiminden önce uygulanmıştır. Delik açılma işlemi esnasında oluşan çapakların üretilen fiber metal tabakaların metal/cam elyaf keçe+PPS matris arayüzeyine olumsuz etki oluşturmaması için delik delme işlemi sonrası çapak temizleme işlemi gerçekleştirilmiştir.

Sadece yüzey iyileştirme işlemlerinin ve hem yüzey iyileştirme hem de mekanik bağlantı için delik açma işlemlerinin üretilen fiber metal tabakalı kompozitlerin ara yüzey dayanımına etkisinin daha iyi anlaşılması ve deneyler sonucunda elde edilen

verilerin doğrulanması için yüzeyi iyileştirilmemiş sadece metal/cam elyaf keçe+PPS matris ara yüzeyinde delikler yardımıyla mekanik bağlantıya sahip fiber metal tabakalı kompozitlere de düşük hızlı düşen ağırlık ve çekme deneyleri uygulanmıştır. Sıcak pres tekniği ile üretilen fiber metal tabakalı kompozitinin üretim sonrası polimer matrisli kompozitten tek farkı kalınlığının yaklaşık 4.30 - 4.50 mm civarında çıkmasıdır. Bunun nedeninin ise alüminyum levhaların uygulanan basınca cam elyaf keçe malzemesine göre daha fazla direnç göstermesinden kaynaklanmaktadır.

### 3.5. Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DTK) Tekniği

DTK cihazı bir malzemenin ısı emilimini ya da ısı kaybını sıcaklığın bir fonksiyonu olarak ölçmede kullanılmaktadır. Malzemenin sıcaklığa göre verdiği tepkiler o maddenin yapısı, saflığı ve dayanıklılığı gibi özellikleri hakkında bilgi verir. DTK tekniği ile kompozit malzeme üretiminde matris malzemesi olarak kullanılan toz halindeki PPS polimerinin sıcak presteki üretim sıcaklığının kristallenme oranına etkisi incelenmiş ve kompozit malzeme özellikleri için optimum üretim sıcaklığı saptanmıştır. Üretim sıcaklığının saptanmasından sonra PPS polimerinin etüvde bekletilmesi ve sıcak preste gerçekleştirilen kompozit üretim aşamalarının PPS polimerinin kristalinite, camsı geçiş sıcaklığı ve erime sıcaklığına etkisi TA Instruments marka Q200 DTK test cihazı ile incelenmiştir. Şekil 3.5'te TA Instruments marka Q200 DTK test cihazı gösterilmiştir.



Şekil 3.5: TA Instruments marka Q200 DTK test cihazı

Tablo 3.9'da TA Instruments marka Q200 DTK test cihazının teknik özellikleri belirtilmiştir.

Tablo 3.9: TA Instruments marka Q200 DTK test cihazının teknik özellikleri [119]

TA Instruments marka Q200 DTK test cihazının teknik özellikleri	
Çalışma Sıcaklığı Aralığı	20-725 °C
Soğutma Sistemi ile Çalışma Sıcaklığı Aralığı	-180-725 °C
Sıcaklık Hassasiyeti	+/- 0.05 °C
Dinamik Ölçüm Aralığı	>+/- 500mW
Hassasiyet	0.2 µw
Indium Yüksekliği/Genişliği (Mw/+ °C)	30

### 3.6. Üç-Nokta Eğilme, Kısa Kiriş Kayma Dayanımı ve Tabakalar Arası Kayma Dayanımı Test Yöntemleri

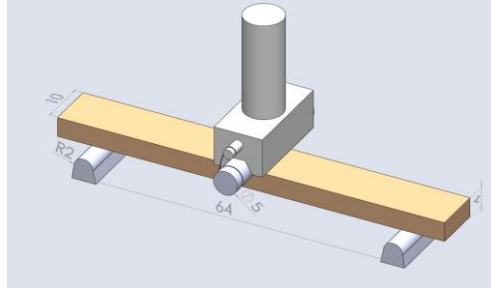
Shimadzu AG-X çekme test cihazı ile üretilmiş olan cam elyaf keçe takviyeli PPS kompozitlere üç nokta eğilme testi uygulanarak malzemelerin eğilme dayanımları ve eğilme modülleri tespit edilmiştir. Ayrıca, düşük hızlı düşen ağırlık darbe testleri sonrası artık eğilme dayanımı ve artık eğilme modüllerinin saptanabilmesi için polimer matrisli kompozit numunelere üç nokta eğilme testi uygulanmıştır. 10 kN yük kapasiteli Shimadzu AG-X çekme test cihazı “Trapezium X” programı ile kontrol edilebilmektedir. Şekil 3.6’da Shimadzu AG-X çekme test cihazı gösterilmiştir.



Şekil 3.6: Shimadzu AG-X çekme test cihazı

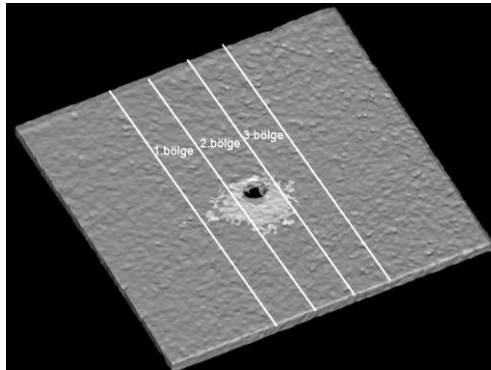
Darbe öncesi ve sonrası üç nokta eğilme testlerine tabi tutulan cam elyaf keçe takviyeli PPS kompozit numuneler ASTM D790 [120] standardına uygun olarak

dairesel testerede 80 mm x 16 mm x 4-4.20 mm boyutuna getirilmişlerdir. Darbe öncesi üç nokta eğilme testine maruz bırakılan numunelerin eğilme modül ve dayanım değerlerinin belirlenebilmesi için 10 deney yapılmıştır. Şekil 3.7’de gösterildiği gibi üç nokta eğilme testlerinde cam elyaf keçe takviyeli PPS kompozit numunelere uygulanan yük alttaki iki desteğe eşit mesafeden uygulanmıştır. Üç nokta eğilme deneylerinde iki destek arası mesafe 64 mm olup, 2 mm/dk sabit hızla numuneler kırılana kadar yük uygulanmıştır.



Şekil 3.7: Üç nokta eğilme testi şematik gösterimi

Düşük hızlı düşen ağırlık darbe testlerine maruz bırakılmış polimer matrisli kompozit numunelerin artık eğilme dayanımı ve artık eğilme modüllerinin belirlenebilmesi için darbe yüklemesine maruz kalan bölgeye en yakın üç ayrı dikdörtgen bölgeden numune alınarak ASTM D790 standardına uygun olarak üç nokta eğilme testleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.8’de numunede darbe nedenli oluşan hasar bölgesinin üç ayrı kısma bölünmesi sembolik olarak gösterilmiştir. Alt destek mesafesi ve yükleme hızı darbe öncesi üç nokta eğilme testleri ile aynı tutulmuştur.

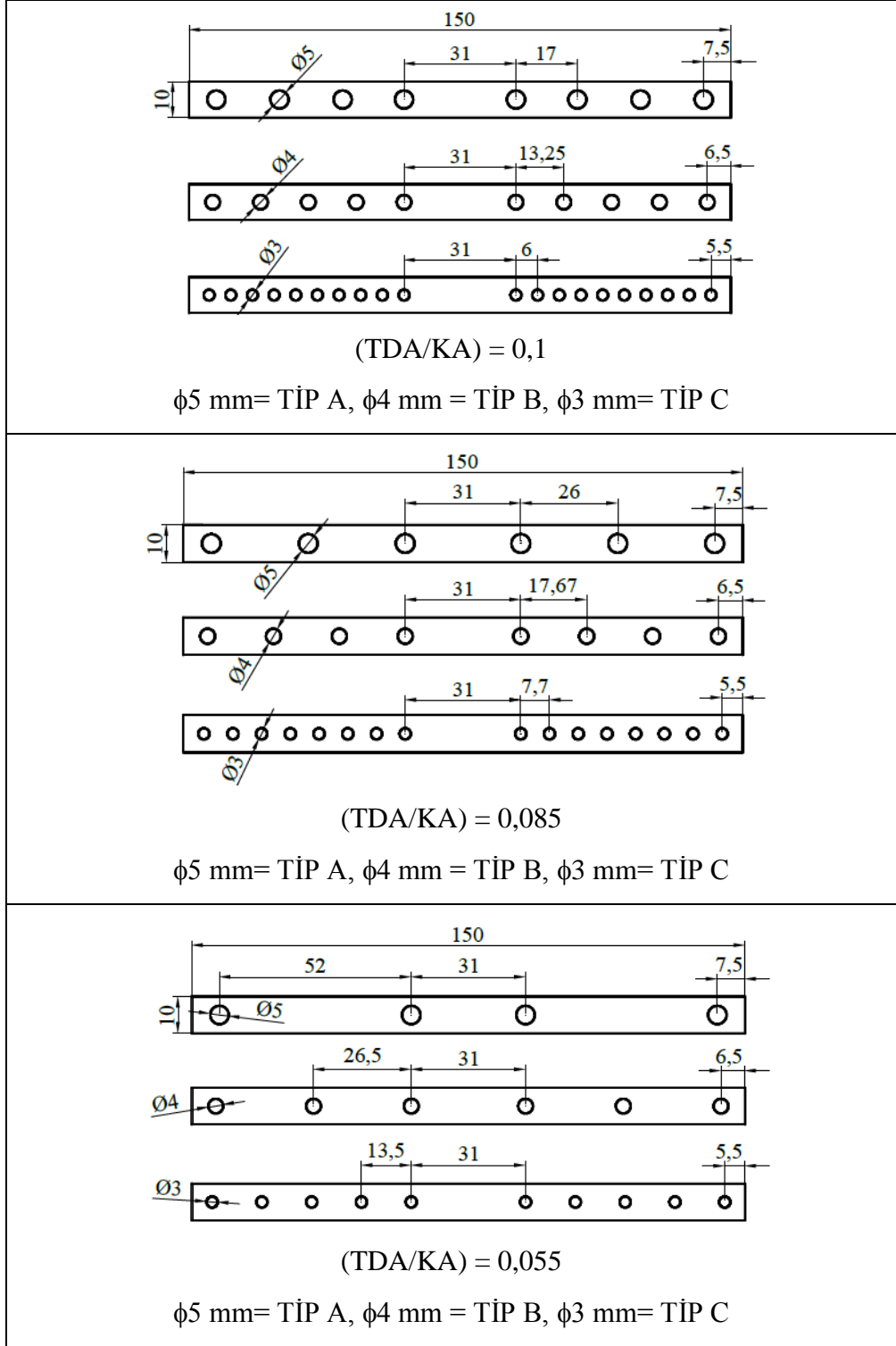


Şekil 3.8: Numunede darbe nedenli oluşan hasar bölgesinin üç eşit kısma bölünmesi

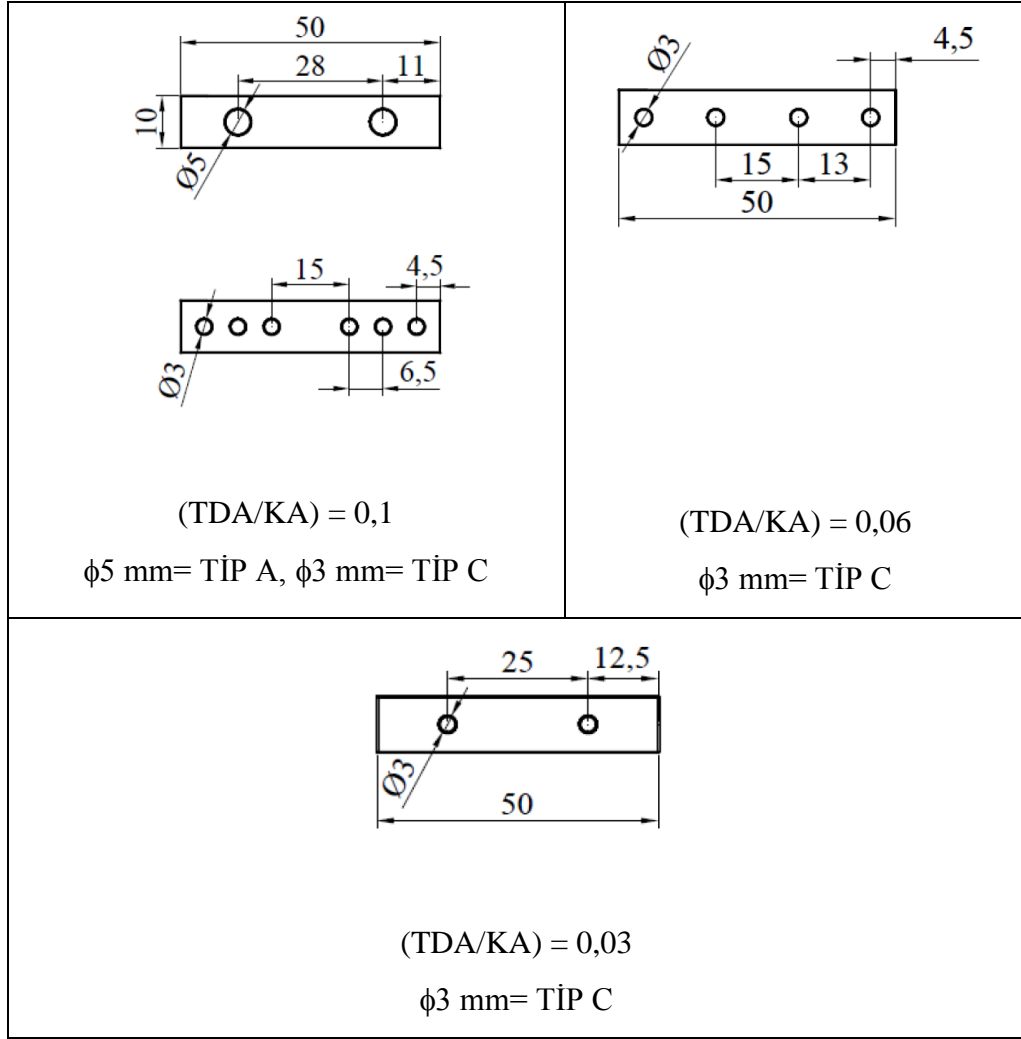
Takviye elemanı olarak kullanılan alüminyum levhaların Bölüm 3.3’te belirtildiği gibi yüzeylerinin iyileştirilmesinin fiber metal tabakalı kompozit numunelerin eğilme

dayanımına ve modülüne ne ölçüde etki ettiğinin saptanabilmesi için üç nokta eğilme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Alüminyum levha yüzeylerine yapılan iyileştirme adımlarından sadece ağırlıkça yüzde silan oranının değiştirilmesi kararlaştırılmış ve değişen yüzde silan oranı ile FMT numunelerdeki eğilme dayanımı ve modülü değerleri belirlenmiştir. Yapılan üç nokta eğilme deneylerinde alt destek mesafesi 128 mm'dir. 128 mm alt destek mesafesi ile yapılan deneylerde numune boyutu 150 mm x 10 mm x 4.2-4.5 mm ve baskı ucu hızı 6.8 mm/dk olarak seçilmiştir. Üç nokta eğilme deneyleri haricinde yüzeyi iyileştirilmiş alüminyum levhalı FMT numunelerin ara yüzey dayanımlarının tespiti için kısa kiriş kayma dayanımı ve TAKD deneyleri de gerçekleştirilmiştir. ASTM D2344/D2344M [121] standardına göre yapılan kısa kiriş kayma dayanımı deneylerinde numune boyutu 24 mm x 10 mm x 4-4.5 mm olup, baskı ucu hızı 1 mm/dk olarak seçilmiştir. Alt destek mesafesi ise 16 mm'dir. Çalışma kapsamında üretilen FMT numunelerin metal/cam elyaf+ PPS matris ara yüzey dayanımının belirlenebilmesi için yapılan TAKD deneylerinde numune boyutu 50 mm x 10 mm x 4-4.5 mm olup, baskı ucu hızı 1.3 mm/dk olarak seçilmiştir. Alt destek mesafesi ise 10 mm'dir [122]. Kısa kiriş kayma dayanımı ve TAKD deneylerinde baskı ucu ve alt destek çapları sırasıyla 6 mm ve 3 mm'dir. Ağırlıkça yüzde silan oranının deliksiz sadece yüzey iyileştirme işlemleri yapılmış FMT numunelerin ara yüzey dayanımına etkisi belirlendikten sonra optimum yüzde silan oranı her bir deney için belirlenmiştir. Alüminyum levhaların yüzeylerine uygulanan yüzey iyileştirme yöntemleri ile geliştirilmeye çalışılan metal/cam elyaf+ PPS matris ara yüzeyinin ayrıca mekanik olarak da birleştirilmeye çalışılması nedeni ile yüzey iyileştirme işlemlerinden önce alüminyum levhalara TU5032B model numaralı TOSS UNITED marka matkap tezgahında delikler açılmıştır. Alüminyum levhalara açılan deliklerin çapları  $\phi$  3 mm,  $\phi$  4 mm ve  $\phi$  5 mm olarak numune genişliğine bağlı olarak seçilmiştir. Delik açılmış FMT numunelere üç nokta eğilme ve TAKD deneyleri uygulanmış ve numunelere açılan deliklerin ara yüzey dayanımına etkisi incelenmiştir. Üç nokta eğilme ve TAKD deneyleri için numune boyutu, baskı ucu hızı, alt destek mesafeleri deliksiz sadece yüzey iyileştirme yapılmış FMT numunelere yapılan deneylerle aynı tutulmuştur. Gerçekleştirilen deneylerde deliksiz sadece yüzey iyileştirme yapılmış FMT numuneler için belirlenen optimum ağırlıkça yüzde silan oranı referans alınmıştır. Alüminyum levha

yüzeylerine açılan deliklerin formasyonu ve toplam delik alanı/kapalı alan oranı (TDA/KA) Şekil 3.9 ve Şekil 3.10’da gösterilmiştir.



Şekil 3.9: Üç nokta eğilme deneyleri için alüminyum levha yüzeylerine açılan deliklerin delik çapları, delik çaplarına göre deliklerin dizilişi ve bir deney numunesindeki (TDA/KA) oranı



Şekil 3.10: TAKD deneyleri için alüminyum levha yüzeylerine açılan deliklerin delik çapları, delik çaplarına göre deliklerin dizilişi ve bir deney numunesindeki (TDA/KA) oranı

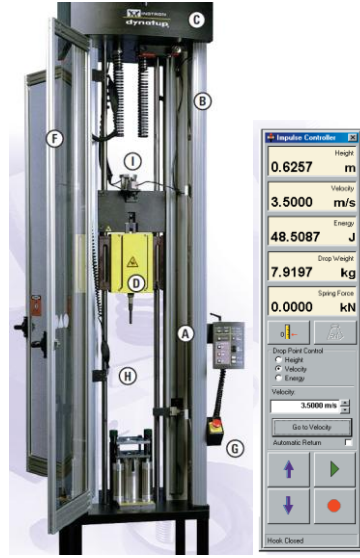
### 3.7. Düşük Hızlı Düşen Ağırlık Darbe Testi

Tübitak-MAM Malzeme Enstitüsü' nde bulunan Dynatup 9200 modellenli düşen ağırlık test cihazı ve cihazın testler esnasında kontrolünü sağlayan impulse controller programı ile birlikte üretilen polimer matrisli kompozitlerin ve FMT malzemelerin darbe dayanımları, penetrasyon derinlikleri, hasara uğrayacakları düşme enerjisi ve absorbe enerji mekanizmaları incelenmiştir. Şekil 3.11'de Dynatup 9200 düşen ağırlık test cihazı gösterilmiştir.

Dynatup 2009 modellenli düşük hızlı düşen ağırlık test cihazında cam elyaf keçe takviyeli PPS kompozit plakaları ve FMT plakaları düşük hızlı darbe yüklemesine



maruz bırakılmıştır. Test cihazının maksimum düşme yüksekliği 2 m olup bu yükseklikte uygulayabileceği maksimum darbe enerjisi 196 J'dür. Düşen ağırlık aparatı motorize edilmiş kaldırma hattı ile donatılmıştır. Veriler her darbe yüklemesi sonrası Impulse Data Acquisition programı ile kayıt altına alınabilmektedir ve darbe ucu da uygulanan başlangıç enerjisine geri dönmektedir.

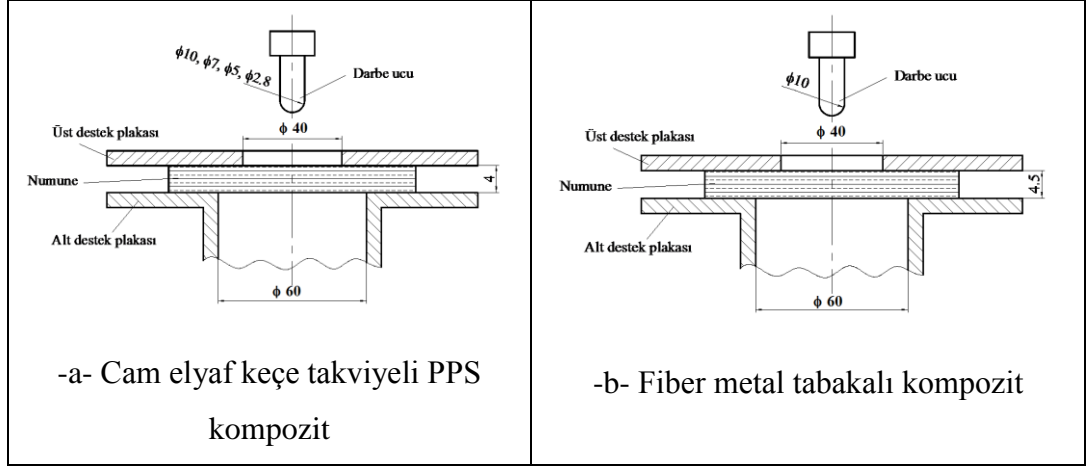


Şekil 3.11: Dynatup 9200 düşen ağırlık test cihazı

Cam elyaf keçe takviyeli PPS kompozit plakalara 4 farklı çapta ( $\phi 2.8$  mm,  $\phi 5$  mm,  $\phi 7$  mm ve  $\phi 10$  mm) ve 2 farklı biçimde (düz ve yarıküresel) darbe uçları ile matris çatlama hasarının oluşumundan tam penetrasyon hasarına sebebiyet verecek enerji seviyelerine kadar darbe yüklemesi uygulanmıştır. FMT numunelere ise  $\phi 10$  mm düz ve yarıküresel darbe uçları ile matris çatlama hasarının oluşumundan tam penetrasyon hasarına sebebiyet verecek enerji seviyelerine kadar darbe yüklemesi uygulanmıştır.

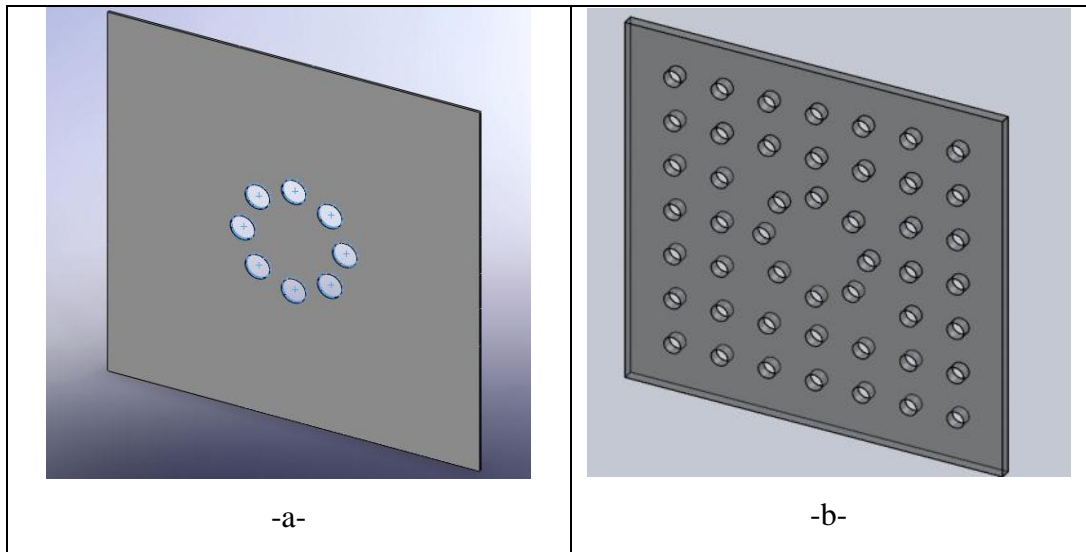
Kompozit malzemelere uygulanan düşen ağırlık ise darbe ucu dahil 10.5487 kg olup, plakaların tam ortasından etki etmiştir. Belirtilen her darbe ucu sadece bir kere darbe yüklemesi uygulamıştır. Düşük hızlı darbe deneyleri ASTM D7136/D7136M [123] standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. düşük hızlı darbe yüklemesine maruz bırakılacak olan cam elyaf keçe takviyeli PPS kompozitler için numune boyutu 90 mm x 90 mm x 4-4.20 mm, FMT numuneler için ise numune boyutu 90 mm x 90 mm x 4-4.5 mm olarak belirlenmiştir. Numuneler için belirtilen boyut cam elyaf keçe

takviyeli PPS kompozitler ve FMT numuneler için sırasıyla dairesel ve düşey şerit testere yardımıyla getirilmiştir. Şekil 3.12’de kompozit numunelerin şematik olarak düşük hızlı düşen ağırlık darbe cihazına yerleştirilmesi gösterilmiştir.



Şekil 3.12: Cam elyaf keçe takviyeli PPS kompozit numunenin ve FMT numunenin düşük hızlı düşen ağırlık test cihazına yerleştirilmesi

Dynatup 2009 modelli düşük hızlı düşen ağırlık test cihazında yüzeyi iyileştirilmiş ve iyileştirilmemiş bölgesel ve tüm yüzeyi iki farklı çapta ( $\phi 4$  mm ve  $\phi 6$  mm) delinmiş FMT plakaları düşük hızlı darbe yüklemesine maruz bırakılmıştır. Şekil 3.13’te bölgesel ve tüm yüzeyi iki farklı çapta ( $\phi 4$  mm ve  $\phi 6$  mm) delinmiş FMT plakaları gösterilmiştir.



Şekil 3.13: Alüminyum levha malzemesine  $\phi 4$  mm ve  $\phi 6$  mm’lik matkap uçları ile delikler açılması

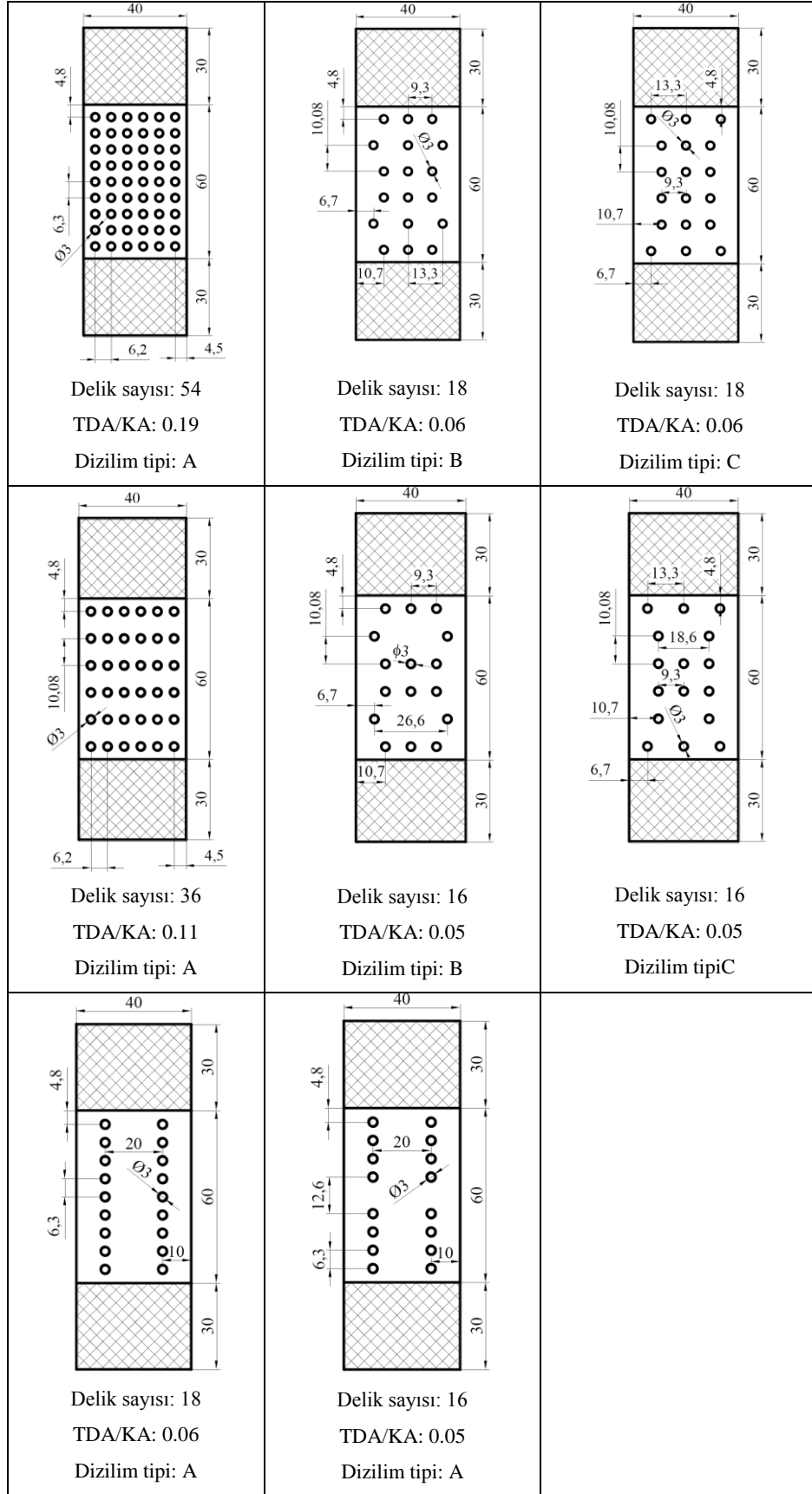
FMT numunelerde metal/cam elyaf keçe+PPS matris ara yüzeyinde mekanik bağlantının etkisinin anlaşılabilmesi için sıcak pres üretiminden önce alüminyum levha malzemesinin yüzeyine herhangi bir iyileştirme işlemi uygulanmadan Şekil 3.13'te belirtilen formasyonlarda delik açılmıştır. Şekil 3.13-a'da belirtilen delik formasyonu düşük hızlı düşen ağırlık darbe test cihazındaki numunenin sıkıştırıldığı yer hesaba katılarak belirlenmiştir. Merkezden 12.5 mm yarıçap bölgesine 8 adet delik yerleştirilmiştir.

Aynı delik formasyonu Şekil 3.13-b'de de mevcut olup, daha fazla mekanik bağlantı yüzeyi elde edebilmek için numunenin tüm bölgesine delik açılmıştır.  $\phi 4$  mm ve  $\phi 6$  mm'lik matkap uçları ile delinen alüminyumlarda delik çapı değişmesine rağmen aynı sayıda delik delinmiştir. Yüzey iyileştirme işlemleri uygulanmış ve uygulanmamış bölgesel ve tam delikli alüminyum levha takviyeli FMT numunelere  $\phi 10$  mm düz ve yarı küresel darbe uçları ile düşük hızlı düşen ağırlık darbe testleri uygulanmıştır.

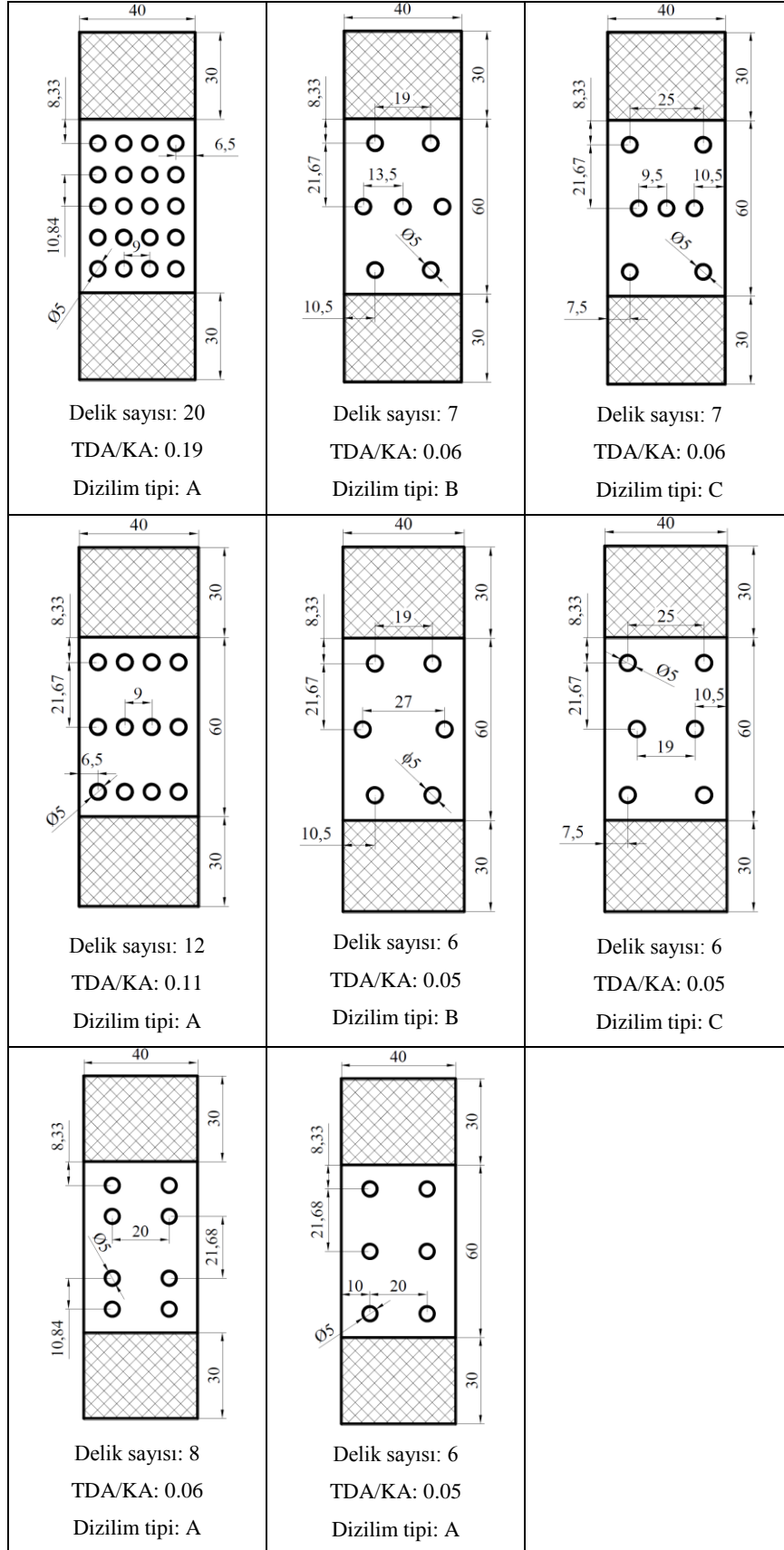
### **3.8. Çekme Deneyi**

Üç nokta eğilme, kısa kiriş kayma dayanımı ve TAKD test yöntemleri ile belirlenen ağırlıkça yüzde silan oranı referans alınarak yüzeyi iyileştirilmiş delikli ve deliksiz FMT numunelere çekme testi uygulanmıştır. Ayrıca alüminyum levhalar ile cam elyaf keçe- PPS matris malzemesi arasında sadece cam elyaf keçe+matris sütunlarının sağladığı mekanik bağlanmanın FMT malzemesinin arayüzey dayanımına etkisinin de belirlenebilmesi için yüzey iyileştirme işlemleri uygulanmamış FMT malzemelerine çekme testi de uygulanmıştır.

Alüminyum levhaların yüzeyine açılan deliklerin mekanik olarak metal/cam elyaf keçe-matris ara yüzey dayanımına etkisi incelenmiştir. İki temel başlık altında çekme test numuneleri hazırlanmıştır. Birinci olarak iki farklı çapta ( $\phi 3$  mm ve  $\phi 5$  mm), üç farklı diziliş şeklinde (A, B ve C) ve her diziliş için iki farklı toplam delik alanı/kapalı alan oranı (TDA/KA) belirlenmiştir. Her iki çap için deliklerin alüminyum levhalar üzerine diziliş şekli ve her diziliş için TDA/KA Şekil 3.14 ve 3.15'te gösterilmiştir.



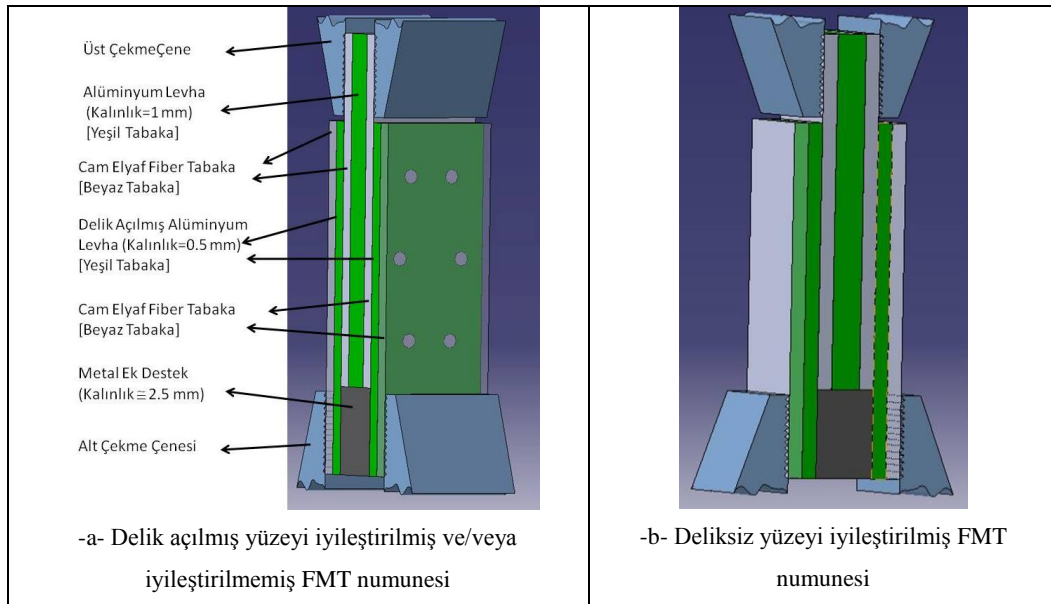
Şekil 3.14: Alüminyum levha yüzeylerine açılan  $\phi 3$  mm çaplı deliklerin plaka üzerindeki dizilimi, toplam delik alanı/ kapalı alan oranı ve tabakadaki delik sayısı



Şekil 3.15: Alüminyum levha yüzeylerine açılan  $\phi 5$  mm çaplı deliklerin plaka üzerindeki dizilimi, toplam delik alanı/ kapalı alan oranı ve tabakadaki delik sayısı

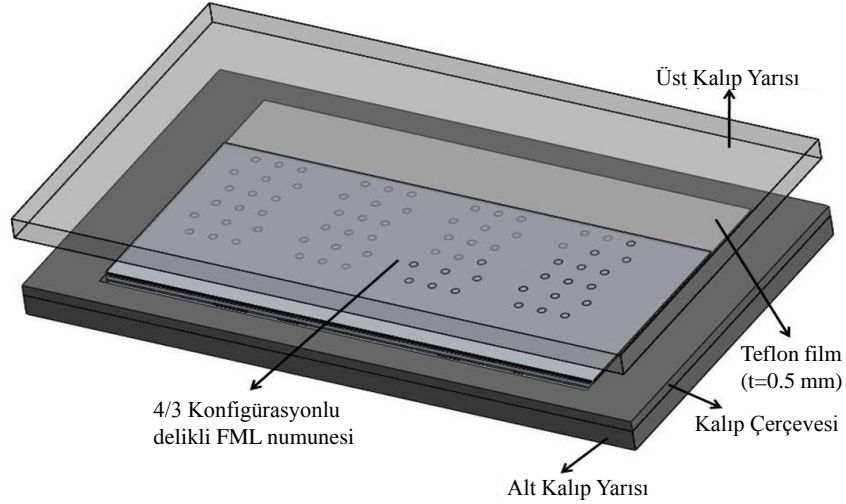
Şekil 3.14 ve Şekil 3.15'te gösterildiği gibi alüminyum levha yüzeylerine üç farklı dizilimde (A, B ve C) delikler açılmıştır. TDA/KA her iki delik çapı içinde aynı dizilim tipleri için aynı değerde alınmıştır.

Çekme testine tabi tutulacak FMT numunelerin paslanmaz çelik kalıba düşük hızlı düşen ağırlık, üç nokta eğilme ve tabakalar arası kayma testlerine tabi tutulan FMT numunelerine göre farklı dizilimde yerleştirilmiştir. Şekil 3.16'da sembolik olarak gösterildiği gibi 4/3 konfigürasyonunda (4 kat cam elyaf keçe katman ve 3 kat alüminyum levha) sıcak pres tekniği ile üretilen üç farklı dizilimdeki yüzeyi iyileştirilmiş ve iyileştirilmemiş delikli FMT malzemelerinin ve yüzeyi iyileştirilmiş deliksiz FMT malzemesinin çekme çenelerine yerleştirilirken çekme yönüne bağlı olarak numunelerin sadece delik açılmış metal/cam elyaf keçe+ PPS matris arayüzeyinden kopmasının istenmesinden kaynaklanmaktadır. Alt ve üst çekme çenelerinde çekme eksenine göre simetri sağlanması için numunelerin orta bölgesine deliksiz 1 mm kalınlığında alüminyum sac plaka konulmuştur. Diğer taraftan çekme çenelerin numuneyi daha iyi kavrayabilmesi ve sadece delik açılmış metal/cam elyaf keçe+ PPS matris arayüzeylerinden hasarlanma oluşturabilmek için FMT malzemesini oluşturan birleşenler kalıp çerçevesine yerleştirilirken metal ek destek ve ek teflon filmler yerleştirilmiştir.



Şekil 3.16: 4/3 konfigürasyonunda sıcak pres tekniği ile üretilen üç farklı dizilimdeki yüzeyi iyileştirilmiş ve iyileştirilmemiş FMT malzemelerinin ve yüzeyi iyileştirilmiş deliksiz FMT malzemesinin çekme çenelerine sembolik olarak yerleştirilmesi

Şekil 3.17’de çekme testine tabi tutulacak yüzeyi iyileştirilmiş veya yüzeyi iyileştirilmemiş delikli FMT numunenin paslanmaz çelik kalıba yerleştirilmesi gösterilmiştir. Sıcak pres üretiminden sonra blok halinde üretilen FMT numune yatay şerit testere yardımıyla herhangi başka bir işlem uygulamadan istenen ölçülere getirilmiştir.

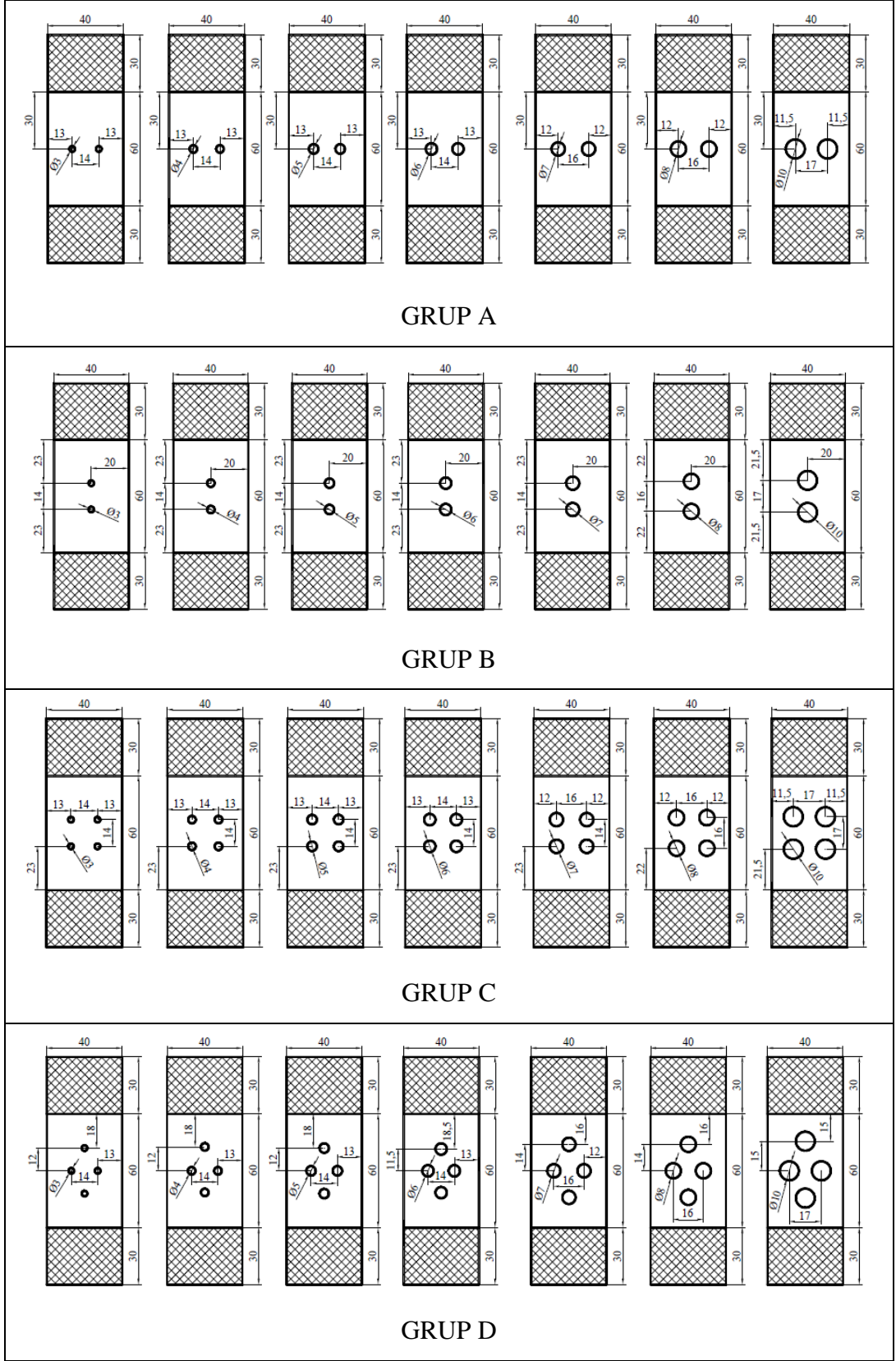


Şekil 3.17: Çekme testine tabi tutulacak yüzeyi iyileştirilmiş veya yüzeyi iyileştirilmemiş delikli FMT numunenin paslanmaz çelik kalıba yerleştirilmesi

İkinci olarak delik çapının ve delik formasyonunun üretilen FMT malzemesinin arayüzey dayanımına etkisinin belirlenebilmesi için 7 farklı çapta ( $\phi 3$  mm,  $\phi 4$  mm,  $\phi 5$  mm,  $\phi 6$  mm,  $\phi 7$  mm,  $\phi 8$  mm,  $\phi 10$  mm) ve 4 farklı delik formasyonunda (A, B, C ve D) delik açılmış yüzeyi iyileştirilmiş FMT numuneleri sıcak pres tekniği ile üretilmiştir. Şekil 3.18’te delik formasyonları gösterilmiştir.

Her iki temel başlık altında belirtilen FMT numuneleri TÜBİTAK-MAM yerleşkesinde bulunan Zwick Z250, 30 kN, enstrümente edilmiş çekme test cihazında çekme testlerine tabi tutulmuşlardır. Çekme hızı 5 mm/dk olup ortam sıcaklığı 25 °C’dir. Sıcak pres tekniğinde FMT malzemesinin dog-bone şeklinde üretilmesi zor olduğundan test edilecek numuneler üretimden sonra yatay şerit testere yardımıyla istenilen boyutlara getirilmiştir. Literatür araştırmalarında FMT malzemeleri için çekme testleri ASTM D3039 test standardına uygun olarak yapıldığı tespit edilmiştir [29,62,74].





Şekil 3.18: 7 farklı çapta ( $\phi 3$  mm,  $\phi 4$  mm,  $\phi 5$  mm,  $\phi 6$  mm,  $\phi 7$  mm,  $\phi 8$  mm,  $\phi 10$  mm) ve 4 farklı delik formasyonunda (A, B, C ve D) delik açılmış yüzeyi iyileştirilmiş FMT numuneleri



Çekme hızı ve uygun ortam sıcaklığı gibi şartlar ASTM D3039 standardına uygun olarak seçilmiştir. Ancak literatürde delikler yardımı ile oluşturulan mekanik ara yüzey bulunmadığından çekme deneyi için numune boyutu uygun delik dizilişi sağlanabilmesi için delikli ve deliksiz FMT numuneler için 120 mm x 40 mm x 5 mm olarak belirlenmiştir. Delik açılan kısım 60 mm x 40 mm olup, numunelerin 30 mm'lik kısmı alt ve üst çenelere bağlanmıştır. İlk grup çekme numuneleri için en az 5 adet numune test edilmiştir. İkinci grup çekme numuneleri için ise her grup için en az 3 adet numune teste tabi tutulmuştur.

### **3.9. Bilgisayarlı Tomografi Yöntemi ile Hasar Analizi**

Yapılan çalışmada düşük hızlı darbe yüklemesi sonrası ortaya çıkan iç yapı hasarlarını ortaya koymak için klasik inceleme yöntemlerinden farklı olarak bilgisayarlı tomografi cihazıyla incelemeler gerçekleştirilmiştir. Tıp alanında yaygın olarak kullanılan bilgisayarlı tomografi ile görüntüleme tekniğinin malzeme iç yapısını ve hasar mekanizmalarını görmek için uygun olabileceği düşünülmüş, deneysel çalışması yapılan malzemeyle denemeler yapılarak görüntüler elde edilmiştir. Elde edilen görüntüler malzeme iç yapısında ortaya çıkan delaminasyon ve fiber kırılması gibi hasar mekanizmaları hakkında önemli ipuçları vermiştir.

Bilgisayarlı tomografi görüntüleri Kocaeli Üniversitesi Araştırma ve Uygulama Hastanesi Radyoloji Bölümü'nde bulunan Toshiba Aquilion 64 marka bilgisayarlı tomografi cihazı ile elde edilmiştir. Malzeme iç yapısını gösteren görüntüler tomografi cihazında 40 miliamper akım değerinde 120 kiloVolt ile elde edilmiştir. Tomografi çekim programında FOV değeri olarak 120 seçilmiştir. FOV (field of view) değeri; bilgisayarlı tomografide ekrana yansıyan görüntüye uyan numunenin büyüklüğüdür. İç yapıdaki hasar mekanizmalarını ortaya çıkarmada önemli olan bir başka tomografi çekim parametresi de doku cinsi ve çözünürlüğüdür.

Cam elyaf keçe takviyeli PPS kompozit numunelerin tomografi çekimlerinde kullanılacak en uygun doku cinsinin kemik dokusu olduğu yapılan denemelerde görülmüş ve bu değer kullanılmıştır. Ayrıca iç yapı hasarlarının netliği açısından

yüksek çözünürlük değeri seçilmiştir. Tomografi görüntüleri çekilirken “axial” ve “sagittal” ilerleme hızı olarak sırasıyla  $0.5 \times 0.3$  mm seçilmiştir.

### **3.10. Optik Mikroskop ve Dijital Kamera ile Hasar Analizi**

Düşük hızlı düşen ağırlık darbe ve çekme testlerine tabi tutulan farklı delik formasyonlarına sahip yüzeyi iyileştirilmiş ve iyileştirilmemiş FMT numunelerinin yüzeylerinde oluşan hasar mekanizmaları 1.0-5.0x dijital büyütme, 14.2 Megapiksel Görüntü Algılayıcılı Samsung ST600 dijital fotoğraf makinası ile makro boyutta, ara yüzeyde oluşan hasar mekanizmaları ve oluşan fiber+matris sütunlarının tespitinde ise 80x büyütme kadar çıkabilen Leica S8 APO Stereo Mikroskop ile incelemeler gerçekleştirilmiştir. Üretim esnasında alüminyum levhalar ile cam elyaf-matris arayüzey yapışmasının ve fiber+matris sütunlarının varlığının FMT malzemesinin ara yüzey dayanımına etkisi gözlemlenmiştir.

## **4. DENEY SONUÇLARI**

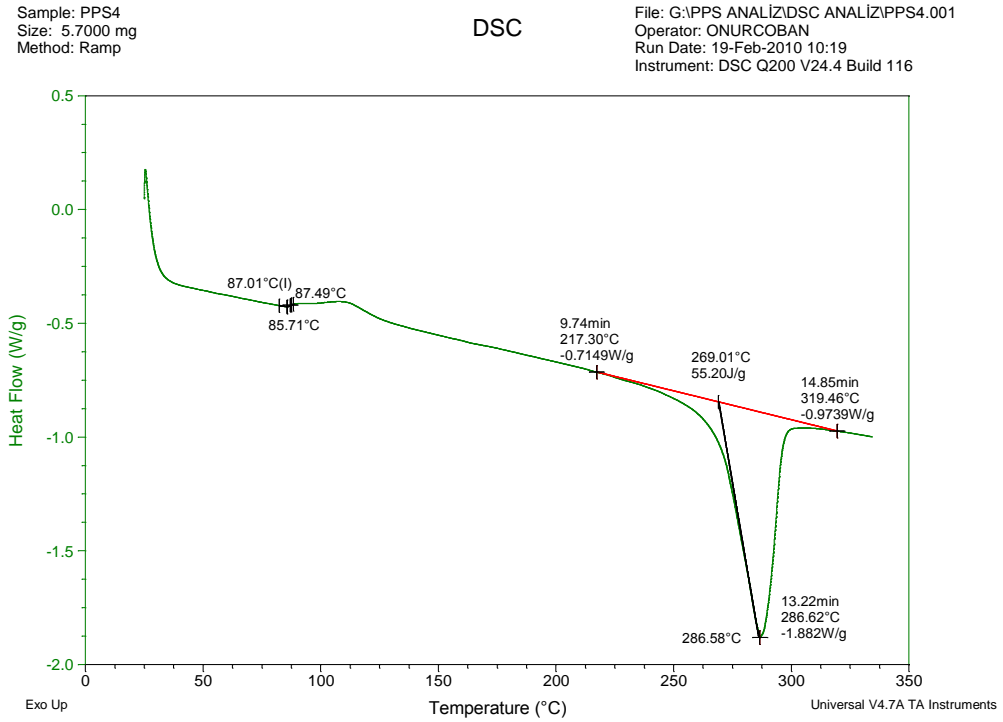
### **4.1. DTK Analizleri**

#### **4.1.1. DTK analizleri ile sıcak pres üretim sıcaklığının belirlenmesi**

Otomotiv ve havacılık endüstrilerinde kullanılacak, yüksek ara yüzey dayanımına ve darbeye karşı dirençli bunun yanında yüksek çevresel ve kimyasal dirence sahip polimer matrisli ve FMT malzemelerin sıcak pres tekniği ile üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretilecek malzemeyi oluşturacak bileşenlerin, üretim şartlarının ve üretim sonrası işlemlerin üretilecek olan malzemenin amaçlanan özelliklerini ne derece etkiledikleri ve bu parametrelerin optimizasyonu önem arz etmektedir. Kompozit malzemelerin sıcak pres yöntemi ile üretiminde kullanılacak olan parametreler sıcaklık, basınç, malzemeyi kalıpta basınçsız olarak tutma süresi, basınç uygulama süresi ve soğutma hızıdır. Polimer matrisli kompozitlerin üretim parametrelerinin malzemenin özelliklerine etkilerini inceleyen çalışmalar literatürde oldukça fazladır [114,124-127]. Ancak PPS esaslı kompozitlerin üretim şartlarının malzeme özelliklerine etkilerini araştıran çok sınırlı çalışma mevcuttur. Bölüm 3.4'te cam elyaf keçe takviyeli PPS kompozit ve FMT malzemelerin sıcak pres yöntemi ile üretiminde basınç, malzemeyi kalıpta basınçsız olarak tutma süresi, basınç uygulama süresi ve soğutma hızı gibi parametreler literatür araştırmaları yardımıyla belirlenmesine rağmen sıcak preste üretim sıcaklığı parametresinin PPS polimerinin kristallenme derecesine önemli bir şekilde etki ettiği düşünüldüğünden DTK cihazı ile üretim sıcaklığı optimizasyonu gerçekleştirilmiştir.

Literatürde PPS polimerinin kristallenme davranışını inceleyen bir çok çalışma mevcuttur [83,128-131]. Bu sayede üretilen kompozitin matris malzemesi olan PPS'nin kristallenme davranışı literatür çalışmalarından faydalanılarak iyileştirme yönünde adımlar atılmıştır.

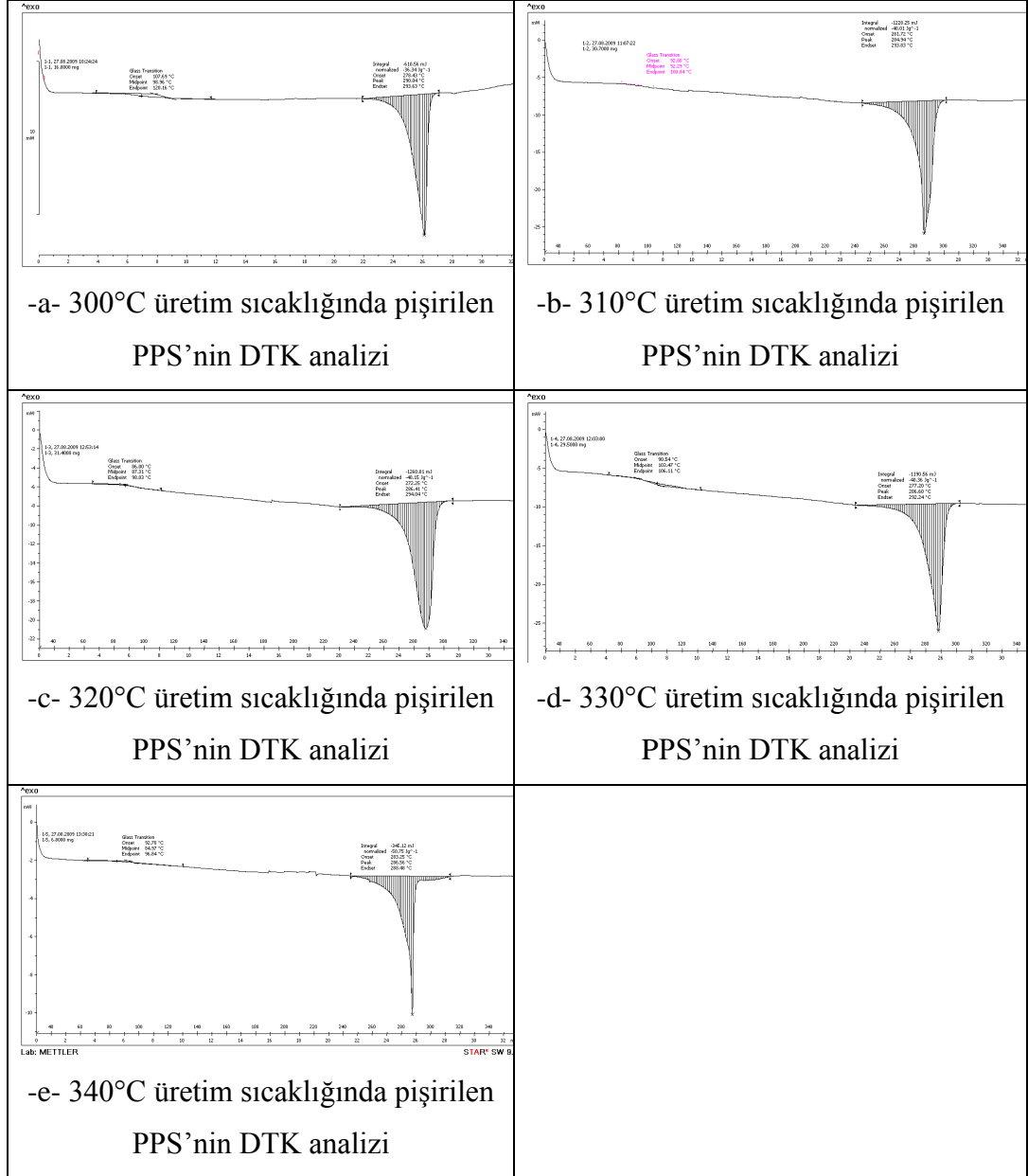
Sıcak pres tekniği ile üretilen cam elyaf keçe takviyeli PPS kompozitin ve FMT malzemelerin matris malzemesi olan işleme maruz bırakılmamış toz halindeki PPS polimerinin kristalinite, camsı geçiş sıcaklığı ve erime sıcaklığı değerlerinin saptanabilmesi için TA Instruments marka Q200 DTK test cihazı ile incelemeler yapılmıştır. Şekil 4.1’de herhangi bir işleme maruz bırakılmamış toz halindeki PPS polimerinin DTK analizi gösterilmiştir. 5-10 mg ağırlık aralığında 5 adet PPS polimer numunesinin DTK analizi 25-340 °C aralığında 10 °C/dak artış oranında gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.1’den 5.7 mg ağırlığındaki toz halindeki PPS polimerinin camsı geçiş sıcaklığının 87.01 °C olduğu saptanmıştır. Polimer malzemenin erime sıcaklığının ise 286.58 °C olduğu saptanmıştır. Polimer malzemenin kristallerinin tamamen erimesi için harcanan enerji miktarının 1 gr polimer malzeme için 55.20 J olduğu saptanmıştır.



Şekil 4.1: İşleme maruz bırakılmamış toz halindeki PPS polimerinin DTK analizi

Sıcak pres tekniği ile üretilen cam keçe takviyeli PPS kompozitinin mekanik davranışına etki edecek optimum üretim sıcaklığı parametresinin tespiti için toz halindeki PPS polimeri 300-340 °C sıcaklığı arasında 5 farklı sıcaklıkta 1 saat sıcak preste pişirilmiştir. 5 farklı sıcaklıkta pişirilen polimer malzemeler soğuyana kadar

kalıp içerisinde bekletilmiştir. PPS polimer malzemesinin kristallerinin tamamen erimesi için harcanan enerji miktarlarının değişimi Şekil 4.2’de gösterilmiştir.



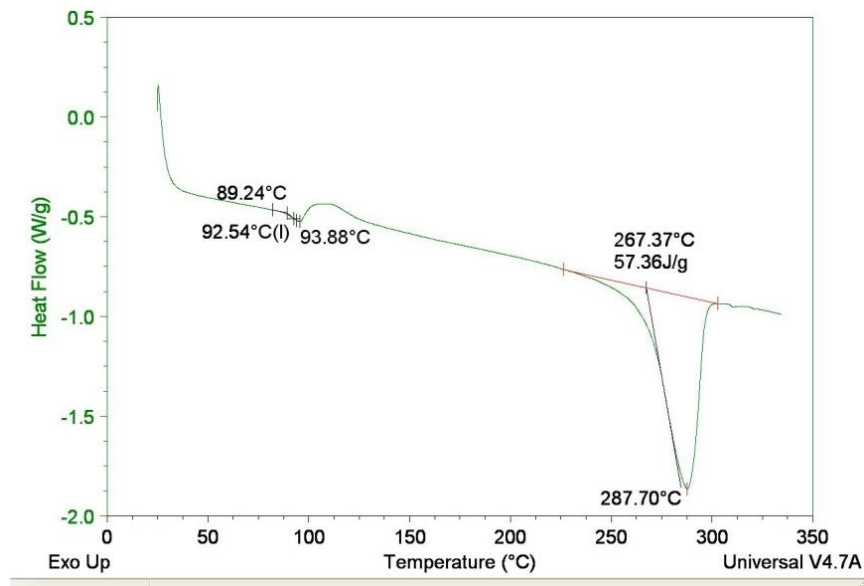
Şekil 4.2: DTK ile üretim sıcaklığının kristallenme oranına etkisi

Farklı sıcaklıklarda pişirilen PPS polimerinin DTK analizleri incelendiğinde (Şekil 4.2) 300°C için polimer malzemenin kristallerinin tamamen erimesi için harcanan enerji değerinin 36.34 J/gr, 310°C için 40.01 J/gr, 320°C için 40.15 J/gr, 330°C için 40.36 J/gr, 340°C için 50.75 J/gr olduğu tespit edilmiştir. Sonuçlar göstermektedir ki saf PPS'nin özelliklerine en yakın özelliklere sahip malzeme 340 °C’de pişirilmiş PPS’dir. Bu sonuç PPS polimerinin termodinamik erime sıcaklığı olarak bilinen 340

°C ile bağdaştırılabilir [128]. Çünkü erime esnasında PSS polimeri içerisindeki düzensiz çekirdeklenme yaratabilecek kalıntı kristaller dahi kalmayacak şekilde tüm kristallerinin eriyebileceği termodinamik sıcaklığa kadar ısıtılıp daha sonra soğuma esnasında düzenli kristallenme sağlanabileceği saptanmıştır [128,132-134]. Bu bağlamda cam keçe takviyeli PPS ve FMT malzemelerin üretim sıcaklığı olarak 340°C'nin kullanılmasına karar verilmiştir.

#### 4.1.2. Sıcak pres üretim prosesinin uygun bir yazılımla DTK cihazına aktarılması ve proses adımlarının PPS malzemesinin kristallenme derecesi, camı geçiş sıcaklığı ve erime sıcaklığına etkisinin belirlenmesi

Toz halindeki PPS polimeri kompozit üretiminden önce kapalı bir ortamda tutulmasına rağmen havanın malzeme üzerindeki olumsuz etkilerini ortadan kaldırmak ve polimer malzeme ile takviye elemanları arasında iyi bir ara yüzey oluşturulabilmesi için toz halindeki PPS polimeri etüvde 75 °C'de 24 saat kurutulmuştur. Yapılan literatür araştırmasında, Parlevliet ve diğ. [130] PPS karbon semipreglerini 80 °C'de kuruturken, Lu ve diğ.[135] PPS polimerini 95 °C'de 36 saat vakum altında bekletmişlerdir. Doktora çalışmasında PPS polimerinin neminin alınması için belirtilen sıcaklık ve süre seçilmiştir. Şekil 4.3'te 75 °C'de 24 saat etüvde kurutulmuş toz halindeki PPS polimerinin DTK analizi gösterilmiştir.

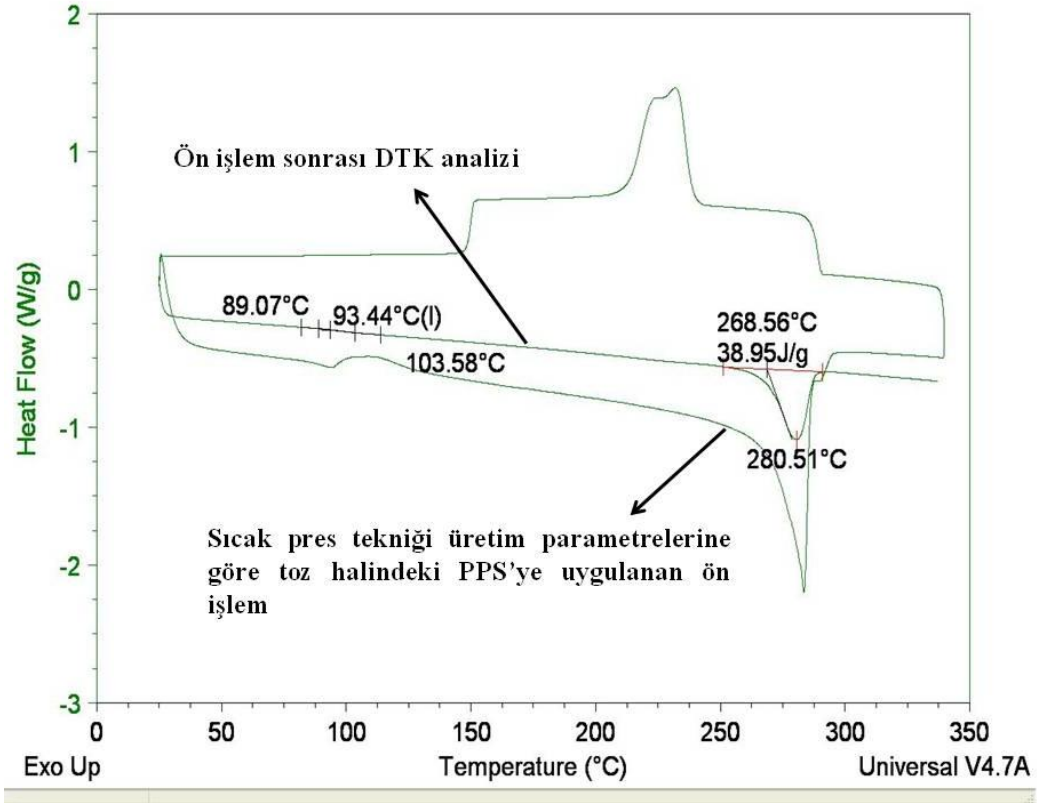


Şekil 4.3: 75 °C'de 24 saat etüvde kurutulmuş toz halindeki PPS polimerinin DTK analizi

Şekil 4.3'te 75 °C'de 24 saat etüvde kurutulmuş toz halindeki PPS polimerinin camsı geçiş sıcaklığı, erime sıcaklığı ve 1 gr polimer malzeme için kristallerinin tamamen erimesi için harcanan enerji miktarının arttığı tespit edilmiştir. Etüvde bekletilen toz halindeki PPS malzemesinin camsı geçiş sıcaklığı, erime sıcaklığı ve kristallerinin tamamen erimesi için harcanan enerji miktarının 1 gr polimer malzeme için değerleri sırasıyla 92.54 °C, 287.70 °C ve 57.36 J olduğu görülmüştür. Camsı geçiş sıcaklığının işlemsiz toz halindeki PPS malzemesinin değerine göre artması malzemenin oda sıcaklığında az da olsa gevrekleşmesine sebep olmuştur. 1 gr polimer malzeme için kristallerinin tamamen erimesi için harcanan enerji miktarı değerinin artması ise yapıda kristallerin arttığını ve malzemenin tokluğunun azaldığını göstermektedir. Düşük hızlı darbe yüklemesine ve üç nokta eğilme deneylerine tabi tutulacak kompozit malzemelerin darbe dayanımları ve eğilme dayanımlarının daha yüksek çıkması için tokluk değerlerinin yüksek çıkması gerekmektedir. Kompozit malzemelerin üretiminde matris malzemesi olarak seçilen toz halindeki PPS polimerinin etüvde kurutulmasının tek amacının havanın olumsuz etkilerini bertaraf etmek olduğu düşünüldüğünden malzemenin camsı geçiş sıcaklığı, erime sıcaklığı ve 1 gr polimer malzeme için kristallerinin tamamen erimesi için harcanan enerji miktarı değerlerindeki artışın sıcak pres tekniği üretiminde gerçekleştirilen hızlı soğutma ile giderilebileceği düşünülmüştür. Bu bağlamda etüvde kurutulmuş toz halindeki PPS polimeri polimer matrisli kompozit ve FMT malzemelerin üretiminde matris malzemesi olarak kullanılmıştır. Şekil 4.4'te Bölüm 3.4'te belirtilen sıcak pres üretim prosesine göre etüvde kurutulmuş toz halindeki PPS polimerine DTK analizi uygulanmıştır.

Polimer malzeme ilk önce 20 dakikada 25 °C'den 340 °C'ye çıkartılıp, 6 dakika boyunca 340 °C'de bekletilmiştir. Daha sonra sıcak pres tekniği parametreleri hesaba katılarak 340 °C'den 25 °C'ye yaklaşık 20 dakikada kalıpların su ile soğutulduğu saptanmıştır. Bu nedenle etüvde kurutulmuş toz halindeki PPS polimeri de 20 dakikada oda sıcaklığına soğutulmuştur. En son olarak polimer malzemeye DTK analizi yapılmıştır. Şekil 4.4'ten PPS polimerinin 1 gr'ı için kristallerinin tamamen erimesi için harcanan enerji miktarı değerlerinde hızlı bir düşüş yaşandığı ve malzemenin kristallenme derecesinin hızlı soğutma nedeniyle düştüğü gözlenmiştir. Sıcak pres tekniğinde üretilen polimer matrisli kompozit ve fiber metal tabakalı kompozit

malzemelerin darbe dayanımlarının yüksek çıkması için tokluk değerlerinin yüksek olması gerektiği yapılan çalışmalarda belirtilmiştir [65,136]. Kristallenme derecesinin düşmesi malzemenin tokluğunda artış meydana getireceğinden üretilen malzemelerin darbe dayanımlarının artacağı düşünülmektedir.



Şekil 4.4: Sıcak pres üretim prosesine göre etüvde kurutulmuş toz halindeki PPS polimerine yapılan DTK analizi

#### 4.2. Düşük Hızlı Düşen Ağırlık Darbe Testlerine Maruz Bırakılan Cam Elyaf Keçe Takviyeli PPS Kompozitlerin Darbe Davranışları

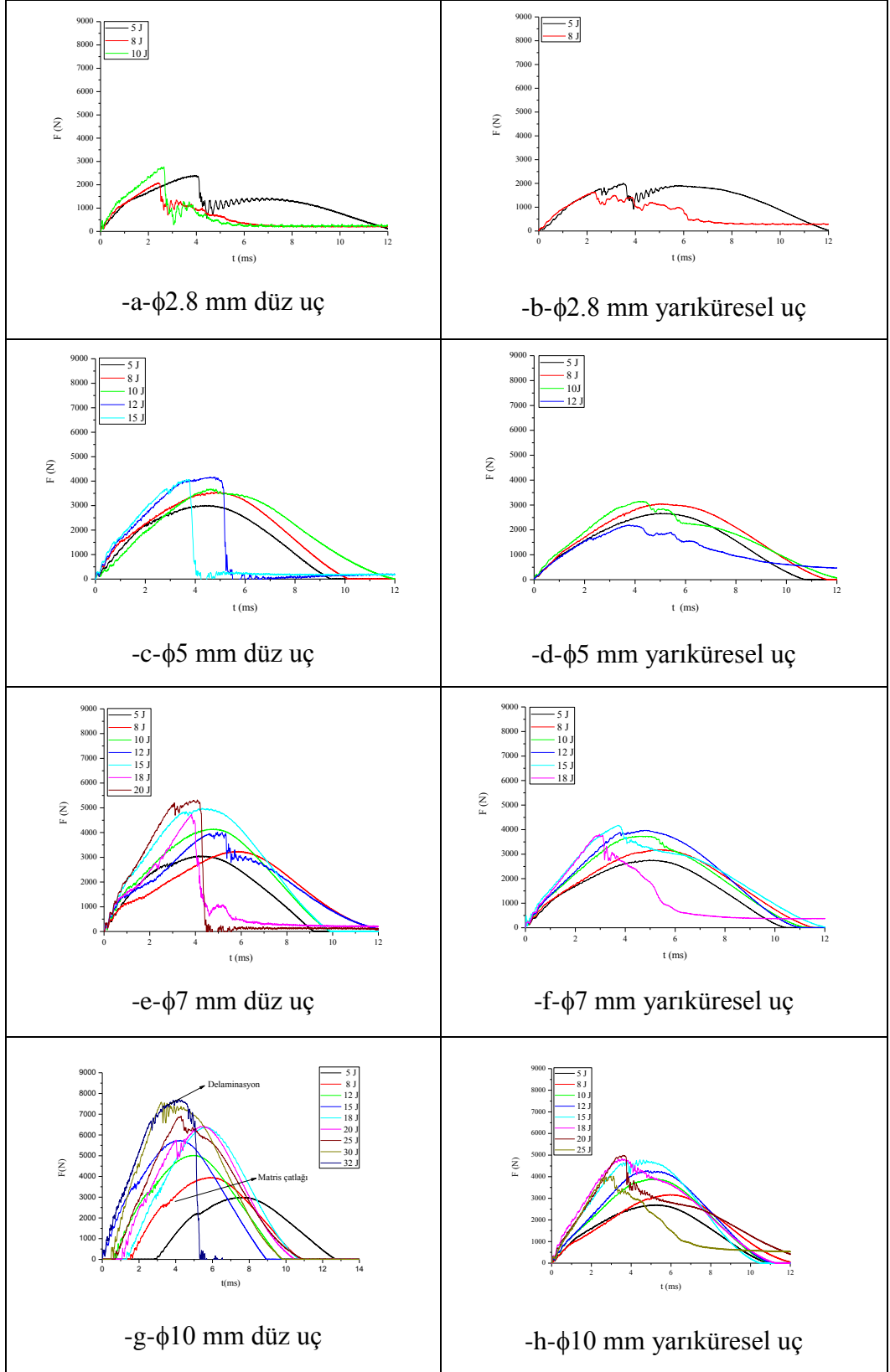
Malzemelerde yerine göre sağlamlık, esneklik, hafiflik, çevre şartlarına (nem, güneş ışınları, gibi) dayanıklılık, darbe dayanımı, sertlik gibi günlük yaşamda kullanılan terimlerle ifade edilen özellikler yanında daha bilimsel dille ısıl genişleme katsayıları, yorulma, çatlama ve kırılma, çekme, eğme dayanımları ve benzeri değerlerin uygunluğu aranır. Bütün bu istenen özellikleri tek bir malzemede bulmak son derece ender rastlanan bir durumdur. 1950’li yıllardan itibaren polimer kompozitler aranan boşluğu doldurmuştur [137]. Polimer matrisli kompozitler yüksek spesifik modülleri ve dayanımları ile birlikte düşük üretim maliyetleri sayesinde otomotiv ve uçak



sanayinde yaygınca kullanılmaktadır. Polimer matrisli kompozitlerden üretilen makine elemanlarının veya yapılarının artan orandaki uygulamaları, 21. yüzyılda otomobil parçalarının çoğunun polimer kompozit yapılardan oluşacağını göstermektedir [138-146]. Son yirmi yılda, termoplastik matrisli kompozitler mühendislik uygulamalarında büyük ilgi görmüştür. Üretim ve işleme teknolojilerinin gelişmesiyle, termoplastik matrisli kompozit uygulamaları savunma ve uzay/havacılık endüstrileri gibi ileri teknoloji alanlarında yaygınlaşmıştır. Örneğin; termoplastik kompozitler biomedikal, otomotiv, deniz taşımacılığı ve altyapı endüstrilerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Termoset matrisli kompozitlere kıyasla, termoplastik kompozitler yüksek darbe dayanımı, çevre şartlarına karşı daha dirençli ve hızlı malzeme üretimi gibi birbirine paralel olmayan bazı avantajlara sahiplerdir [147].

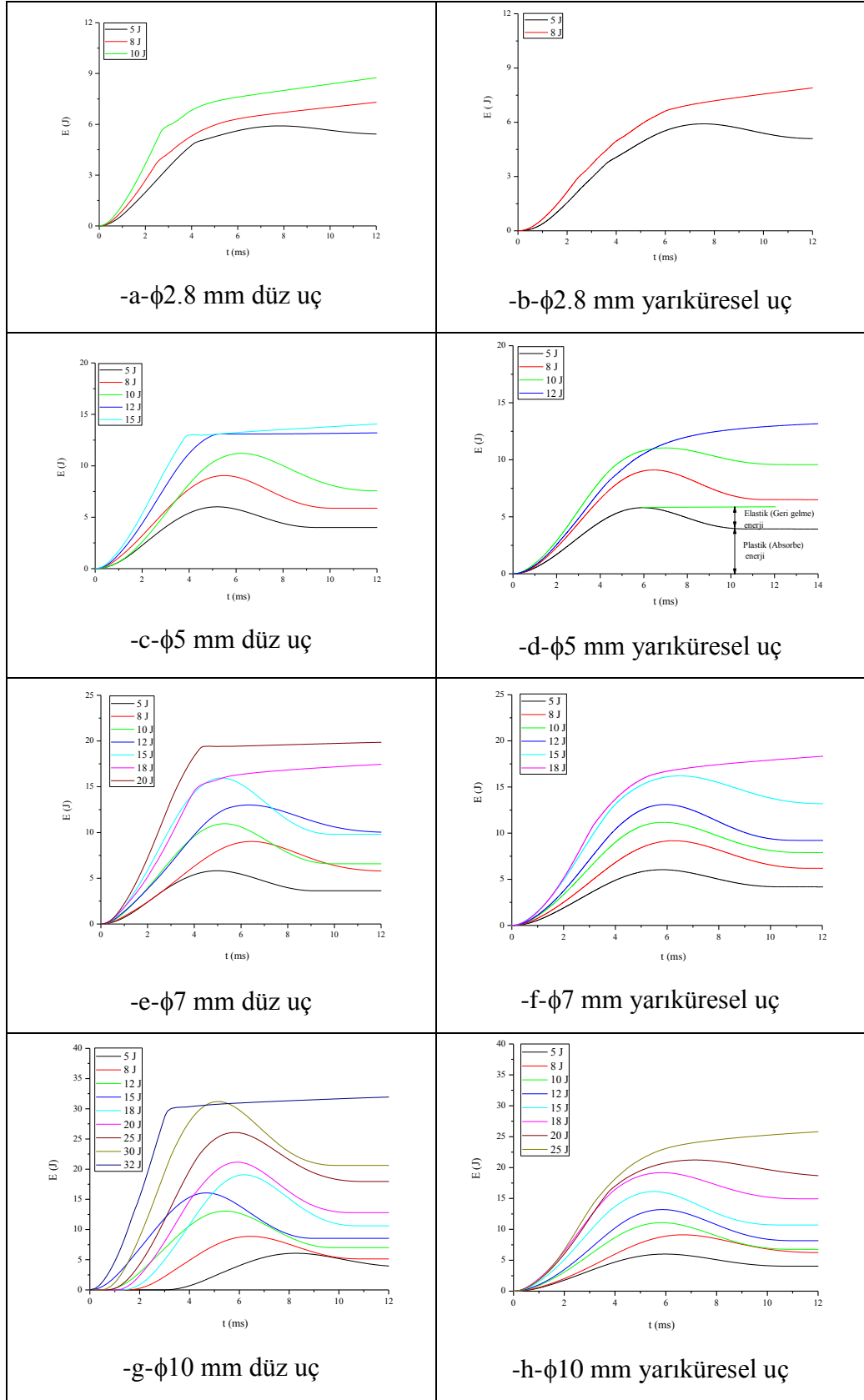
Toplumların gelişmesi ile birlikte insanlar otomobilin içindeki yolculara zarar verdirmeden darbe dayanımını ve otomobilin hafifliğini geliştirmek için otomobil güvenliği ve yakıt verimliliği konularında daha fazla yaptırımlar getirmektedirler [148]. Genellikle mevcut otomobil modelinin hafifliği iki şekilde sağlanmaktadır; yapının geliştirilmesi yada malzeme değiştirilmesi. Yapılan çalışmalarda yapının yüksek dayanımlı çelik ile optimize edilmesi ile otomobil ağırlığında %7 oranında hafifleme gözlenirken [149], otomobilin tüm gövdesi alüminyum ile imal edilince bu değer % 30-50, sadece fiber takviyeli malzeme ile üretilen otomobilin ağırlığının ise %50 oranından daha fazla hafiflemesini sağladığı saptanmıştır [150]. Fiber takviyeli malzemelerin korozyona direnci, sesi geçirmeme ve darbe etkisini azaltabilme özelliklerine sahip olduğu bilindiğinden otomobil yapılarında artan oranda kullanılmaktadırlar [151]. Cam elyaf keçe takviyeli termoplastik (GMT) kompozitleri mekanik özelliklerinin iyi olması, hem karmaşık şekillerde hem de büyük parçalarda boyutsal stabilitelerinin iyi olması, iyi darbe direnci ve tekrar kazanılabilmeleri nedeniyle otomobil endüstrisinde koltuk kasasında, tamponda, motorun gürültüsünün önlenildiği muhafazada ve panel konsolunda genellikle tercih edilmektedir [151,152]. Genellikle otomotiv sektöründe kullanılan cam elyaf keçe takviyeli termoplastik kompozitlerin darbe yüklemesine karşı dayanımı incelenmesi gereken bir konudur. Kompozit malzemeler kullanım ve montaj esnasında düşük hızlı darbelere maruz kalmaktadırlar. Bu nedenle sıcak pres tekniği ile üretilmiş olan

cam elyaf keçe takviyeli PPS kompozitlerinin darbe dayanımlarını, penetrasyon dirençlerini, hasara uğrayacakları düşme enerjisini ve enerji absorbe mekanizmalarını belirlemek için düşük hızlı düşen ağırlık darbe testleri uygulanmıştır. Düşük hızlı düşen ağırlık darbe deneylerinde, farklı çaptaki ve farklı biçimdeki her darbe ucu için cam elyaf keçe takviyeli PPS kompozit numunelerin matris çatlaması hasarı eşik değerinden tam penetrasyon eşik değerine kadarki enerji seviyeleri tespit edilmiştir. Düşük hızlı düşen ağırlık darbe testlerinde, yük-zaman ve enerji-zaman eğrileri malzemede oluşan hasar başlangıcı ve ilerlemesi hakkında önemli bilgiler verebilmektedir [153]. Şekil 4.5'te dört farklı çaptaki ( $\phi 2.8$  mm,  $\phi 5$  mm,  $\phi 7$  mm,  $\phi 10$  mm) ve iki farklı biçimdeki (yarı küresel ve düz) darbe uçları ile gerçekleştirilen düşük hızlı düşen ağırlık darbe deneylerinden elde edilen kuvvet-zaman (F-t) grafikleri gösterilmiştir. Şekil 4.5'ten genel olarak düz uçlarla gerçekleştirilen darbe deneylerinde kompozit numunelerin daha yüksek kuvvet değerlerine ulaştığı gözlenmiştir. Benzer sonuç Mitrevski ve diğ. [154,155]'nin çalışmalarında da saptanmıştır. Düz darbe uçları ile yapılan deneylerde daha yüksek pik kuvveti değerleri elde edilirken, uç keskinleştikçe (konik uç) daha uzun süre temas sağlandığı saptanmıştır. Yapılan çalışmada yarı küresel ucun düz uca göre az da olsa oval olması pik kuvvetin daha düşük çıkmasına sebep olmuştur. Şekil 4.5'ten ayrıca her darbe ucu için artan darbe enerjisi ile kuvvet değerlerinin arttığı ve hasar mekanizmalarının ortaya çıkma süresinin azaldığı belirlenmiştir. F-t eğrileri darbe yüklemesi nedeni ile malzemede oluşan hasar mekanizmalarının saptanmasına da yardımcı olmaktadır. Şekil 4.5-g'de numunelerde oluşan hasar mekanizmaları gösterilmiştir. Matris çatlaması (Hertzian hasarı) F-t eğrisinde, kuvvet artarken ilk ani düşüşün gözlemlendiği bölgede oluştuğu belirtilmiştir [14]. F-t grafikleri incelendiğinde her darbe ucu için 5 J darbe enerjisinde matris çatlaması hasarı oluştuğu, darbe enerjisinin artırılması ile matris çatlaması hasarının daha erken sürelerde ortaya çıktığı gözlenmiştir. Collombet ve diğ. [156] matris çatlamasının hesaba katılması gerektiğinin ve matris çatlaması hasarının tabakalar içi ve tabakalar arası hasar oluşumuna öncülük ettiğini belirterek, delaminasyon hasarının sadece alt tabakanın yeterli oranda matris çatlaması ile doyurulmasından sonra ortaya çıkabileceğini tespit etmişlerdir [156,157].



Şekil 4.5: Dört farklı çaptaki ve iki farklı biçimdeki darbe uçlarıyla gerçekleştirilen düşük hızlı düşen ağırlık darbe deneylerinden elde edilen F-t grafikleri

Düşen ağırlık darbe etkisi nedeniyle yüzey altında oluşan en önemli hasar delaminasyondur. Delaminasyon kompozit malzemede tabakalar arası kayma neticesi ile oluşur. Kayma hareketi, üretim esasında birleştirilmiş katmanların ya da fiber-matris ara yüzeyi boyunca oluşabilir [53]. Cam elyaf keçe takviyeli PPS kompozit numunelerinin F-t grafikleri incelendiğinde kuvvetin pik yaptığı bölgede zig-zag oluşumlarının gözlenmesinin malzemede delaminasyon hasarının oluştuğunu göstermektedir. 5 mm, 7 mm ve 10 mm çaplarındaki her iki uç biçimi ile yapılan deneylerde artan darbe enerjisi ile ana hasar mekanizmasının matris çatlağından delaminasyon hasarına dönüştüğü saptanmıştır (Şekil 4.5-c-d-e-f-g-h).  $\phi$  2.8 mm düz ve yarı küresel uçlarda ise kompozit numunelerin tam penetrasyona düşük darbe enerjilerinde ulaştığı için darbe enerjisi artışı pek gözlenmemiştir (Şekil 4.5-a ve b). Artan darbe enerjisi ile numunede oluşan delaminasyon hasarının kompozitin darbe dayanımını ciddi bir şekilde etkilediği görülmüştür. Hosur ve diğ. [158]'nin belirttiği gibi delaminasyon hasarının oluşumundan sonra kompozit malzemenin rijitliğinin ve basma dayanımının ciddi bir şekilde etkilendiği saptanmıştır. Diğer önemli bir husus ise her darbe ucu için kompozit numunelerde delaminasyon hasarının oluşumundan sonra polimer kompozit malzemenin uygulanan darbe enerjisi ile hasara uğrama süresinin azaldığı gözlemlenmiştir (Şekil 4.5-e-f-g-h). Son olarak düz ve yarıküresel uç için artan uç çapı ile kompozit numuneyi tam penetrasyon hasarına uğratabilmek için gerekli darbe enerjisinin arttığı saptanmıştır. Bunun nedeninin ise küçük çaplarda darbe ucunun uyguladığı darbe enerjisinin kompozit malzemede yarattığı gerilme bölgesinin düşük olmasındandır. Küçük çaplarda uygulanan enerjiyi daha az bir bölgede karşılamaya çalışan numune darbe uç çapının artması ile daha büyük bir bölgede uygulanan enerjiye karşı direnç gösterir. Bu nedenle de oluşan hasar bölgesi çapı artmaktadır.  $\phi$  10 mm düz ve yarı küresel darbe uçları karşılaştırılacak olursa, düz darbe ucu ile hasara uğratılmış polimer matrisli kompozit numunelerde delaminasyon hasarının oluştuğu ilk darbe enerjisi değerinin 20 J olduğu ve 25 J değerinde ise numunedeki tabakalar arasında oluşan delaminasyon hasarlarının birleşerek numunenin dayanımını ciddi bir şekilde etkilediği tespit edilmiştir (Şekil 4.5-g). Şekil 4.5-h'dan görüldüğü gibi, yarı küresel darbe ucuna maruz kalan numunelerde ise ilk delaminasyon hasarının 15 J'de ortaya çıktığı ve 20 J değerinde ise delaminasyon hasarının ana hasar mekanizması olduğu gözlenmiştir.



Şekil 4.6: Dört farklı çaptaki ve iki farklı biçimdeki darbe uçlarıyla gerçekleştirilen düşük hızlı düşen ağırlık darbe deneylerinden elde edilen E-t grafikleri

Şekil 4.6’da dört farklı çaptaki ( $\phi 2.8$  mm,  $\phi 5$  mm,  $\phi 7$  mm,  $\phi 10$  mm) ve iki farklı biçimdeki (yarı küresel ve düz) darbe uçları ile gerçekleştirilen düşük hızlı düşen ağırlık darbe deneylerinden elde edilen Enerji-zaman (E-t) grafikleri gösterilmiştir. Enerji dengelerinin darbe olayı esnasında hasar gelişimi seviyesinin belirlenmesinde genellikle kullanıldığı belirtilmiştir [159-161]. Belingardi ve diğ. [159-161] düşük hızlı darbe yüklemeleri esnasında darbe enerjisi ile plastik (absorbe) enerji arasındaki orandan saptanan hasar derecesi ile numunenin ne zaman tam penetrasyona uğrayacağını belirlemişlerdir. Hasar derecesi değeri 1 değerine yaklaştıkça yani absorbe edilen enerjinin değerinin uygulanan darbe enerjisi seviyesine yaklaşması ile numunenin tam penetrasyona uğradığını belirtmişlerdir. Şekil 4.6-d’de sembolik olarak düşük hızlı darbe sonrası numunede enerjinin iki şekilde depolandığı gösterilmiştir. Geri gelme enerjisi (elastik enerji) darbe ucunun geri dönmesine sebep olan enerji değerini simgelerken, kalan enerji numune tarafından absorbe edilen enerji olup numuneyi hasara uğratmayı sağlayan plastik enerjiyi simgelemektedir [162]. Şekil 4.6’dan her darbe ucu için artan darbe enerjisi ile numunenin absorbe ettiği enerjinin arttığı gözlenmiştir. 10 mm çaplı darbe uçları hariç diğer uçlarla yapılan darbe deneylerinde kompozit numuneler aynı darbe enerjisinde hasara uğramışlardır. 10 mm çaplı darbe deneylerinde ise düz darbe ucu ile daha yüksek darbe enerjilerinde numunenin hasara uğradığı saptanmıştır. Dört farklı çaptaki ( $\phi 2.8$  mm,  $\phi 5$  mm,  $\phi 7$  mm,  $\phi 10$  mm) düz darbe uçları ile darbe yüklemesine maruz bırakılan kompozit numunelerin geri gelme ve absorbe edilen enerjileri sırasıyla Tablo 4.1 ve Tablo 4.2’de verilmiştir.

Tablo 4.1: Düz darbe uçları ile darbe yüklemesine maruz bırakılan kompozit numunelerin geri gelme enerjileri

Darbe enerjisi	$\phi 2.8$ mm	$\phi 5$ mm	$\phi 7$ mm	$\phi 10$ mm
5 J	0.48456 J	2.02198 J	2.18376 J	2.1852 J
8 J	0 J	3.1548 J	3.18709 J	3.72549 J
10 J		3.626 J	4.3509 J	-
12 J		0 J	3.007 J	6.0404 J
15 J			6.158 J	7.5465 J
18 J			0 J	8.388 J
20 J				8.3918 J
25 J				8.15628 J
30 J				10.458 J
32 J				0 J

Tablo 4.2: Düz darbe uçları ile darbe yüklemesine maruz bırakılan kompozit numunelerin absorbe edilen enerjiler

Darbe enerjisi	φ2.8 mm	φ5 mm	φ7 mm	φ10 mm
5 J	5.41794 J	3.93471 J	3.51664 J	3.8661 J
8 J	7.24 J	5.9265 J	5.85851 J	5.39511 J
10 J		7.6203 J	6.6052 J	5.882 J
12 J		13.0953 J	10.0186 J	7.0234 J
15 J			9.8987 J	8.4555 J
18 J			17.4085 J	10.8036 J
20 J				12.8282 J
25 J				17.91672 J
30 J				23,764 J
32 J				32,902 J

Tablo 4.1'den darbe ucu çapı arttıkça uygulanan darbe enerji seviyesi aynı kalmak koşuluyla geri gelme enerji değerlerinin arttığı gözlenmiştir. Bunun nedeninin artan darbe ucu çapı ile (darbe ucu/numune temas) bölgesinin artmasıdır. Artan temas bölgesi ile kompozitin mevcut bölgesindeki fiber miktarının arttığı ve bu sayede kompozit numunenin darbe ucuna daha fazla direnç gösterdiği tespit edilmiştir. Her çap için uygulanan darbe enerji seviyesinin arttırılması ile geri gelme enerjinin arttığı gözlemlenmiştir. Düşük darbe enerjilerinde numunenin geri gelme enerji değerleri uygulanan enerjinin yaklaşık yarısı kadar olurken darbe enerji seviyesinin arttırılması ile bu değer %30'lara kadar düşmüştür. Kompozit malzemelerin tam penetrasyona uğradığı darbe enerji seviyelerinde ise geri gelme enerji değeri 0'a düşmüştür.

Tablo 4.2'den darbe ucu çapı arttıkça uygulanan darbe enerji seviyesi aynı kalmak koşuluyla absorbe edilen enerji değerlerinin azaldığı gözlenmiştir. Tablo 4.2'nin açıklamasında belirtildiği gibi artan darbe ucu çapı ile darbe ucu/numune temas bölgesi artmış bu nedenle de kompozit malzeme uygulanan aynı darbe enerjisi için daha az hasara uğramıştır. Uygulanan darbe enerji seviyesinin arttırılması ile kompozit malzemenin gelen darbe yüklemesini daha fazla absorbe ettiği gözlenmiştir.

Dört farklı çaptaki (φ2.8 mm, φ5 mm, φ7 mm, φ10 mm) yarı küresel darbe uçları ile darbe yüklemesine maruz bırakılan kompozit numunelerin geri gelme ve absorbe edilen enerjileri sırasıyla Tablo 4.3 ve Tablo 4.4'te verilmiştir.

Tablo 4.3: Yarı küresel darbe uçları ile darbe yüklemesine maruz bırakılan kompozit numunelerin geri gelme enerjileri

Darbe enerjisi	$\phi 2.8$ mm	$\phi 5$ mm	$\phi 7$ mm	$\phi 10$ mm
5 J	0.7806 J	1.84236 J	1.8424 J	1.9359 J
8 J	0 J	2.5987 J	2.9691 J	2.8681 J
10 J		1.6479 J	3.2393 J	4.2493 J
12 J		0 J	3.898 J	4.96046 J
15 J			3.107 J	5.4668 J
18 J			0 J	4.0459 J
20 J				2.7004 J
25 J				0 J

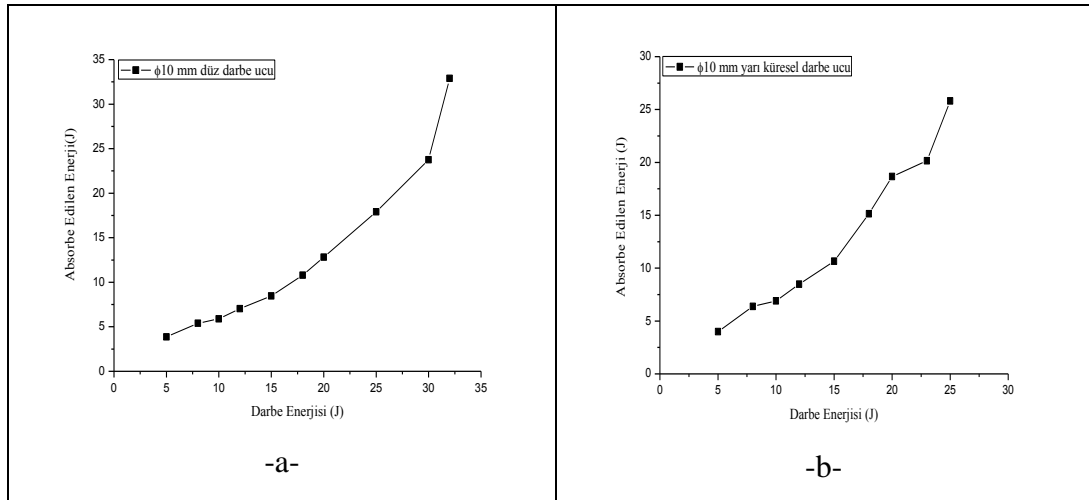
Tablo 4.4: Yarı küresel darbe uçları ile darbe yüklemesine maruz bırakılan kompozit numunelerin absorbe edilen enerjileri

Darbe enerjisi	$\phi 2.8$ mm	$\phi 5$ mm	$\phi 7$ mm	$\phi 10$ mm
5 J	5.1283 J	3.94944 J	3.8943 J	3.9952 J
8 J	8.2045 J	6.4768 J	3.3092 J	6.3727 J
10 J		9.4057 J	2.525 J	6.903 J
12 J		12.9643 J	1.9239 J	8.48574 J
15 J			3.3142 J	10.6558 J
18 J			11.7994 J	15.1457 J
20 J				18.654 J
25 J				25.811 J

Tablo 4.3 ve Tablo 4.4'teki yarı küresel darbe uçları ile darbe yüklemesine maruz bırakılan kompozit numunelerin geri gelme ve absorbe edilen enerjileri incelendiğinde düz darbe uçları ile yapılan darbe deneylerine benzer sonuçlar çıktığı gözlenmiştir. Bununla birlikte  $\phi 7$  mm yarı küresel darbe ucu ile gerçekleştirilen deneylerin sonucunda çıkan absorbe edilen enerji değerlerinin tüm veriler incelendiğinde tutarsız sonuçlar verdiği gözlemlendiğinden  $\phi 7$  mm çaplı yarı küresel darbe ucu ile yapılan deneylerin hesaba katılmamasına karar verilmiştir. Farklı çaplardaki düz ve yarı küresel uçlarla yapılan darbe deneylerinin sonucunda elde edilen geri gelme ve absorbe edilen enerjileri kıyaslanacak olursa, aynı darbe enerji seviyelerinde her farklı çaptaki darbe ucu için geri gelme enerji değerlerinin düz darbe uç ile deformasyona uğratılan kompozit malzemelerde daha yüksek çıktığı gözlenmiştir. Bunun nedeninin düz ucun temas yüzeyinin yarı küresel uca göre daha fazla olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Düz uçta kompozit numune ile alan teması oluşurken, yarı küresel uçta noktasal temas oluşmaktadır. Bu da düz uç



ile yapılan darbe yüklemelerinde kompozit malzemenin bölgesel bir bölgede hasara uğrarken, yarı küresel uçta ise daha geniş bir bölgede kompozit malzemenin hasara uğramasına sebebiyet vermektedir. Absorbe edilen enerji değerleri kıyaslandığında ise yarı küresel uç ile deformasyona uğrayan kompozit malzemelerin absorpsiyon enerjilerinin daha yüksek çıktığı görülmüştür. Yarı küresel uç ile yapılan deneyler sonucunda absorbe edilen enerji değerlerinin daha yüksek çıkması deney sonuçlarının doğruluğunu kanıtlamaktadır. Yarı küresel uç ile daha geniş bir alanda hasara uğrayan kompozit malzeme hasara uğrarken uygulanan darbe enerjisini de kendi içerisinde depolamıştır. Şekil 4.7'de  $\phi 10$  mm düz ve yarı küresel darbe uçlarıyla gerçekleştirilen darbe deneyleri sonucu oluşturulan enerji-zaman eğrilerinden elde edilen absorbe edilen enerji-darbe enerjisi eğrileri verilmiştir.  $\phi 10$  mm düz ve yarı küresel uçlarla yapılan darbe deneylerinin sonucunda elde edilen absorbe edilen enerjiler kıyaslanacak olursa, aynı darbe enerji seviyelerinde düz darbe ucu ile deformasyona uğratılan kompozit malzemelerde absorbe edilen enerji değerlerinin daha düşük çıktığı gözlenmiştir (Şekil 4.7-a ve b). Yarı küresel uç ile daha geniş bir alanda hasara uğrayan kompozit malzeme daha düşük enerji seviyesinde (25 J) tam penetrasyon hasarına uğrarken uygulanan darbe enerjisini de kendi içerisinde depolamıştır. Şekil 4.7-a ve b'de görüldüğü gibi absorbe edilen enerji değerlerinin uygulanan darbe enerjisi değerlerine düz ve yarı küresel uç için sırasıyla 32 J ve 25 J darbe enerjileri değerlerinde ulaştığı ve bu darbe enerjisi değerlerinde tam penetrasyon hasarına uğradıkları tespit edilmiştir.

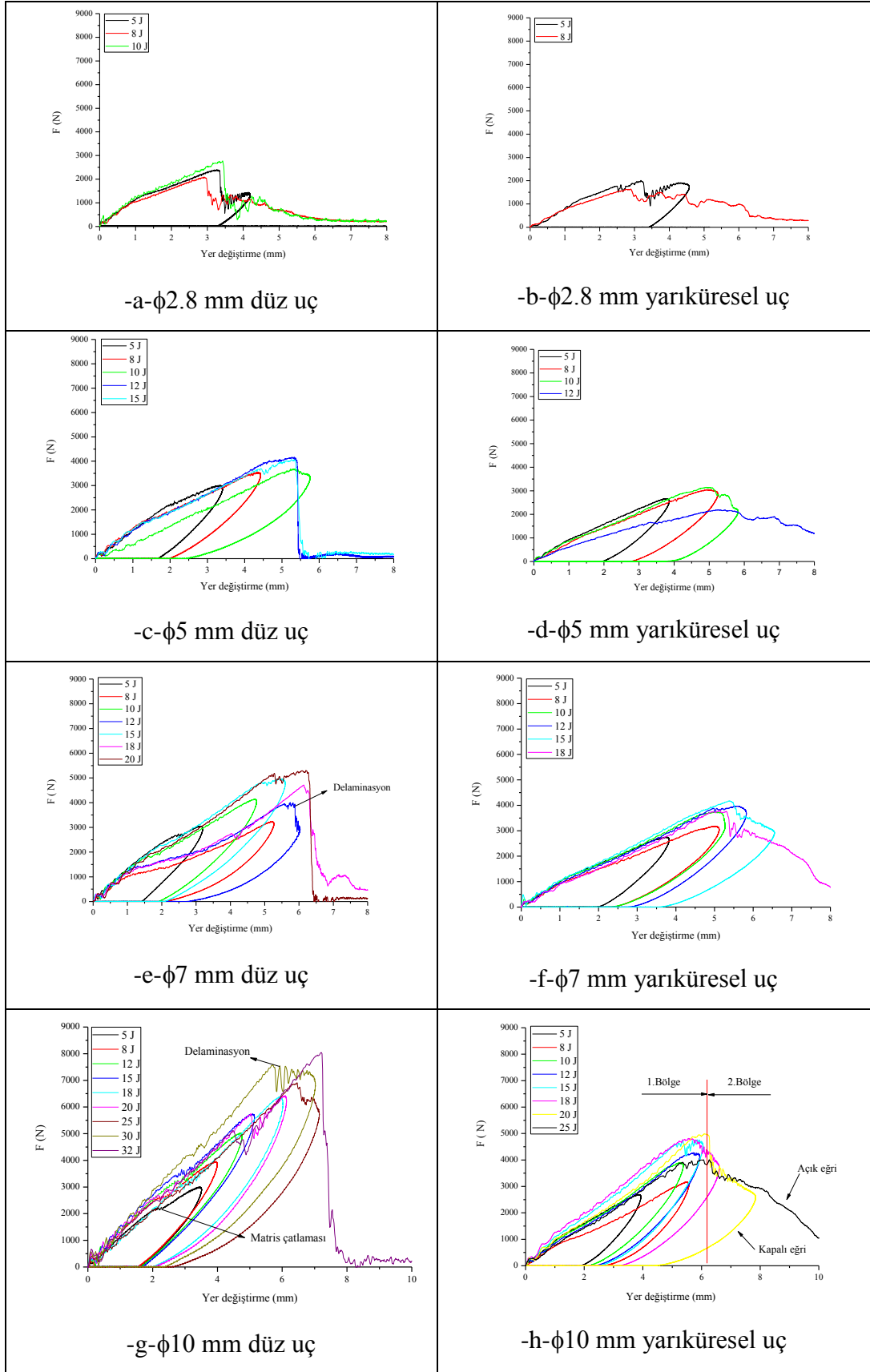


Şekil 4.7:  $\phi 10$  mm düz ve yarı küresel darbe uçlarıyla gerçekleştirilen düşük hızlı düşen ağırlık darbe deneylerinden elde edilen absorbe edilen enerji- darbe enerjisi grafikleri

Şekil 4.8’de dört farklı çaptaki ( $\phi 2.8$  mm,  $\phi 5$  mm,  $\phi 7$  mm,  $\phi 10$  mm) ve iki farklı biçimdeki (yarı küresel ve düz) darbe uçları ile gerçekleştirilen düşük hızlı düşen ağırlık darbe deneylerinden elde edilen Kuvvet-Yer değiştirme grafikleri gösterilmiştir. Düşük hızlı darbe deneylerinde kuvvet-yer değiştirme eğrileri kompozit malzemenin darbe yüklemesine karşı davranışını belirleyebilmektedir [163].

Kuvvet-yer değiştirme eğrilerinde kapalı ve açık eğri olarak iki tip eğri biçimi bulunmaktadır [164]. Kapalı eğri biçiminde uygulanan darbe enerjisi numuneyi tam penetrasyon hasarına uğratamadığı için darbe ucu numuneden geri çıkmaktadır. Darbe ucunun numuneden geri çıkması ile kuvvet-yer değiştirme eğrisi kapanır (Şekil 4.8-h). Kısacası numune uygulanan darbe enerjisinin bir kısmını elastik enerji olarak harcayabilmektedir. Açık eğri biçiminde ise uygulanan darbe enerjisi numunenin tam penetrasyonuna neden olabilecek bir enerji seviyesidir ki bu enerji seviyesinde darbe yüklemesi sonrası darbe ucu numuneden geri dönemez (Şekil 4.8-h).

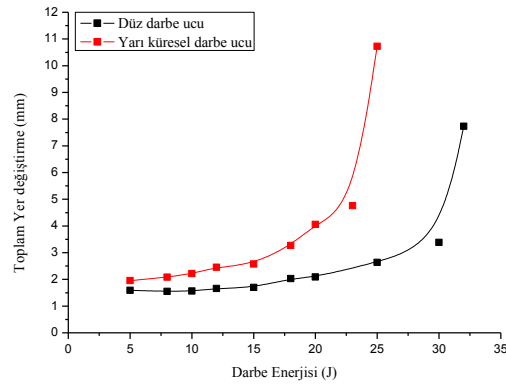
Şekil 4.8’den genel olarak düşük darbe enerjilerinde matris çatlama hasarının bütün darbe ucu çaplarında kuvvet-yer değiştirme eğrisindeki kuvvetin ilk düşüş gösterdiği yer olarak belirlenmiştir (Şekil 4.8-g). Matris çatlama hasarının oluşması ile kuvvet-yer değiştirme eğrisinin eğiminin değiştiği belirlenmiştir. Uygulanan darbe enerjisinin artırılması ile yer değiştirme eğrisinin pik yaptığı bölgede eğrinin düzgünlüğünü kaybettiği ve bu bölgede delaminasyon hasarının olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 4.8-e). Delaminasyon hasarının oluşmasından sonra kompozit malzemeye delaminasyon hasarını oluşturan darbe enerjisinden daha yüksek darbe enerjilerinin uygulanması ile tabakalar arasında oluşan delaminasyon hasarının gelişerek diğer katmanları da etkilediği ve bu nedenle de numunenin en sonunda tam penetrasyona uğradığı belirlenmiştir. Bununla birlikte her iki darbe ucu geometrisi için genel olarak artan darbe ucu çapı ile numuneyi hasara uğratacak darbe enerjisinin arttığı ve artan darbe enerjisi ile darbe ucunun yer değiştirmesinin arttığı görülmüştür.



Şekil 4.8: Dört farklı çaptaki ve iki farklı biçimdeki darbe uçlarıyla gerçekleştirilen düşük hızlı düşen ağırlık darbe deneylerinden elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafikleri

Şekil 4.9’da  $\phi 10$  mm düz ve yarı küresel darbe uçları ile gerçekleştirilen darbe yüklemesi sonucu polimer matrisli kompozit numunelerde oluşan toplam yer değiştirmenin uygulanan darbe enerjisine göre değişimi gösterilmiştir. Her iki grafikten de açıkça toplam yer değiştirme-darbe enerjisi eğrilerinin eğiminin belli bir darbe enerjisi seviyesinde değiştiği tespit edilmektedir (Şekil 4.9). Düz ve yarı küresel darbe uçları için toplam yer değiştirme-darbe enerjisi eğrilerinin eğimindeki değişimin sırasıyla 20 J ve 15 J darbe enerji seviyelerinde olduğu görülmektedir. Toplam yer değiştirme-darbe enerjisi eğrilerinin eğimindeki değişimin sebebi Şekil 4.8’de belirtilen F-t eğrilerinden saptanan delaminasyon hasar mekanizmasıdır.

Kompozit numunelerde oluşan delaminasyon hasarının oluşumu ile yaklaşık olarak sabit olan toplam yer değiştirme değerlerinin hızlı bir şekilde arttığı gözlemlenmiştir. Artan darbe enerjisi seviyeleri ile (düz uç için 25 J, Yarı küresel uç için 20 J) delaminasyon hasarının ana hasar mekanizması olarak ortaya çıktığı belirlenmiştir. Tam penetrasyon halinde ise darbe ucunun numuneyi delip geçmesi nedeni ile darbe ucunun numune kalınlığından daha fazla yer değiştirdiği ve geri dönemediği görülmüştür. Yarı küresel darbe ucu ile 20 J ve 23 J darbe enerjilerinde gerçekleştirilen deneylerde toplam yer değiştirme değerleri yaklaşık 4.5 mm seviyelerinde çıkmıştır. Numunelerin tam penetrasyona yakın bir şekilde hasarlandığının fakat halen en alt katta fiber demetlerinin tam olarak kopmadığı gözlemlenmiş ve bu nedenle de tam penetrasyon hasar enerji değerleri olarak kabul edilmemiştir.



Şekil 4.9:  $\phi 10$  mm düz ve yarı küresel darbe uçlarıyla gerçekleştirilen düşük hızlı düşen ağırlık darbe deneylerinden elde edilen toplam yer değiştirme-darbe enerjisi eğrileri

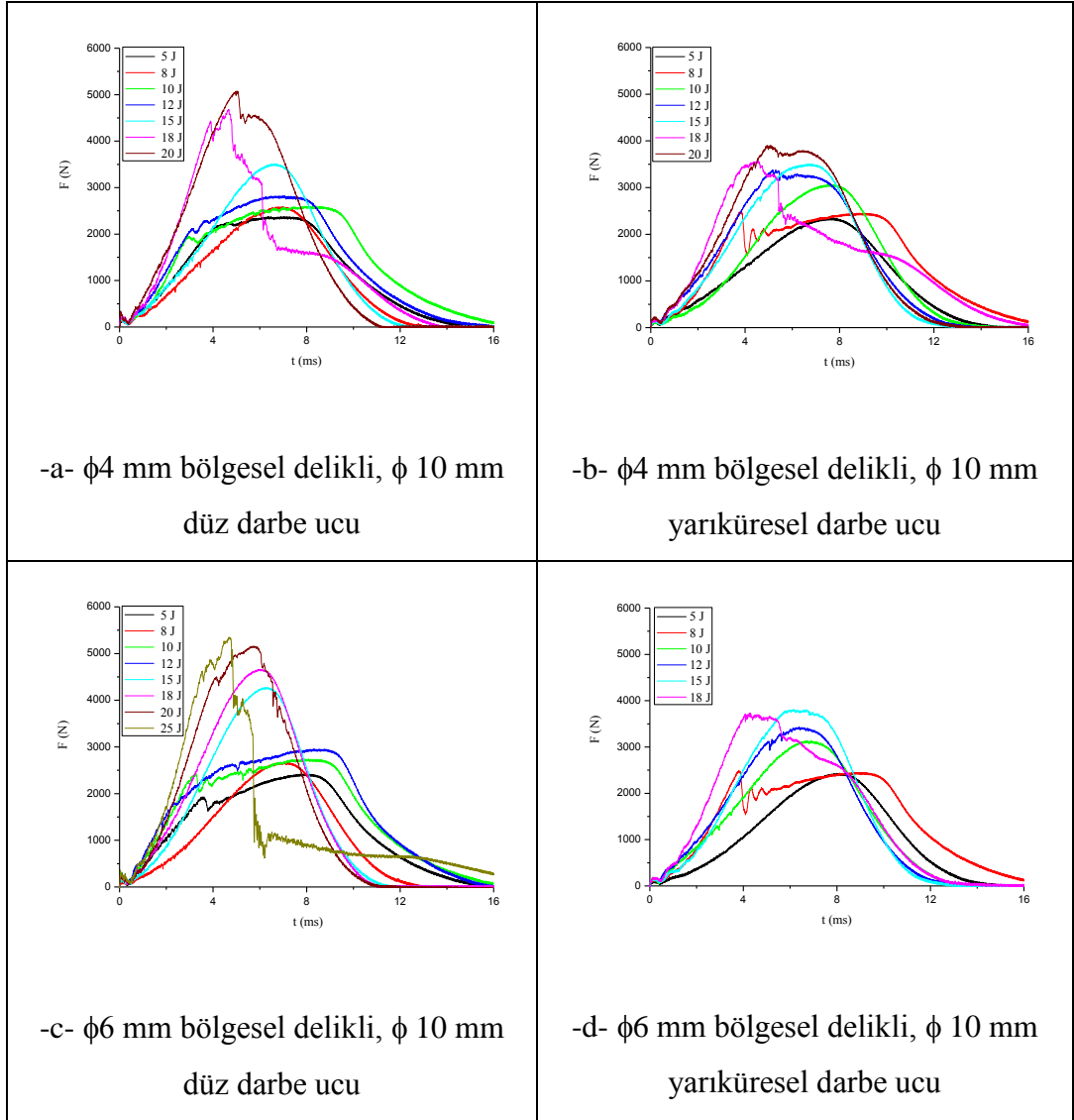
### **4.3. Düşük Hızlı Düşen Ağırlık Darbe Testlerine Maruz Bırakılan Yüzeyi İyileştirilmiş ve İyileştirilmemiş, Bölgesel ve Tüm Yüzeyi Delinmiş Fiber Metal Tabakalı Kompozitlerin Darbe Davranışları**

Uçak tasarımında, ağırlığın uçuş performansına, taşıma kapasitesine ve yakıt tüketimine önemli ölçüde etkisi bulunmaktadır. Düşük ağırlık ciddi şekilde önem arz etmektedir. Buda yüksek spesifik dayanıma sahip malzemelerin gereksinimini ortaya çıkarmıştır [165]. Fiber metal tabakalar (FMT), farklı metal levhalar ile fiber takviyeli polimer (FRP) katmanların bileşiminden oluşan hibrit yapılardır. Bu ürünlerin en önemli özelliklerinden biri fiber takviyeli polimer tabakaların hafifliği ile metallerin iyi darbe dirençlerinin bileşimine sahip olmasıdır [166]. Bu yüzden havacılık uygulamalarında kullanılabilecek mükemmel bir malzeme tipidir. Ticari olarak iki tip fiber metal tabakalı malzeme mevcuttur: S2 cam-epoksi ve alüminyum katmanlardan imal edilen cam fiber takviyeli fiber metal tabakaları (GLARE) ve aramid-epoksi ve alüminyum katmanlardan oluşturulmuş aramid fiber takviyeli fiber metal tabakaları (ARALL) [167]. Başta uçak bileşenlerinin yorulma özelliklerini geliştirmek için kullanılan GLARE, aynı alansal yoğunluğa sahip yekpare alüminyuma göre darbe dayanımını iyileştirmesi nedeniyle kullanılmaktadır [168]. Bununla birlikte GLARE tabakaların balistik sınırı %15 arttırdığı saptanmıştır [169]. Herhangi bir yüzey iyileştirme işlemi uygulanmadan ve yüzeyine herhangi bir delik açılmayan alüminyum levhalar içeren FMT malzemelerinde alüminyum ile kompozit tabakalar arasında herhangi bir yapışma oluşturulmadığı için deliksiz ve yüzeyi iyileştirilmemiş FMT malzemelerinin darbe yüklemelerine karşı davranışını tespit edilememiştir. Sıcak pres tekniği ile üretilen yüzeyi iyileştirilmiş ve iyileştirilmemiş tüm yüzeyi delikli ve yüzeyi iyileştirilmemiş bölgesel delikli alüminyum levhalar içeren FMT numunelerin darbe dayanımları düşük hızlı düşen ağırlık darbe yüklemeleri ile belirlenmiştir. Mekanik bağlanmanın üretilen FMT malzemelerin metal/cam elyaf keçe+PPS matris ara yüzey dayanımına etkisinin belirlenebilmesi için hiçbir yüzey iyileştirme işlemi uygulanmamış sadece delikler açılarak oluşturulan mekanik bağlanmaya sahip FMT malzemelere de düşük hızlı düşen ağırlık darbe testleri uygulanmıştır. Alüminyum katmanları ile cam elyaf keçe takviyesi - PPS matris katmanları arasında oluşturulan mekanik bağlanmanın FMT

malzemelerin darbe davranışını ve absorbe edilen enerji mekanizmasını ne şekilde etkileyeceği belirlenmeye çalışılmıştır.

Bölüm 4.2’de cam elyaf keçe takviyeli PPS kompozitlerin düşük hızlı düşen ağırlık darbe testlerinden elde edilen veriler yardımıyla darbe ucu çapının  $\phi 10$  mm olduğu durumda numunelerin darbe karakteristiğini daha detaylı olarak gösterdiği görülmüştür. Bu nedenden ötürü FMT malzemelere sadece  $\phi 10$  mm yarı küresel ve düz darbe uçları ile düşük hızlı düşen ağırlık darbe testleri uygulanmıştır. Bölgesel ve tüm yüzeye açılan delik formasyonlarının etkisini ayrı ayrı göstermek amacı ile ilk önce yüzeyi iyileştirilmemiş bölgesel delikli alüminyum takviyeli FMT malzemelerin darbe davranışları açıklanmıştır. Şekil 4.10’da  $\phi 10$  mm yarı küresel ve düz darbe uçları ile gerçekleştirilen düşük hızlı düşen ağırlık darbe deneylerinden elde edilen F-t grafikleri gösterilmiştir. Şekil 4.10’dan genel olarak alüminyum levhalara sıcak pres üretiminden önce açılan bölgesel deliklerin delik çaplarının büyümesi ile maksimum kuvvet değerlerinde her iki darbe ucu içinde artış meydana geldiği saptanmıştır.

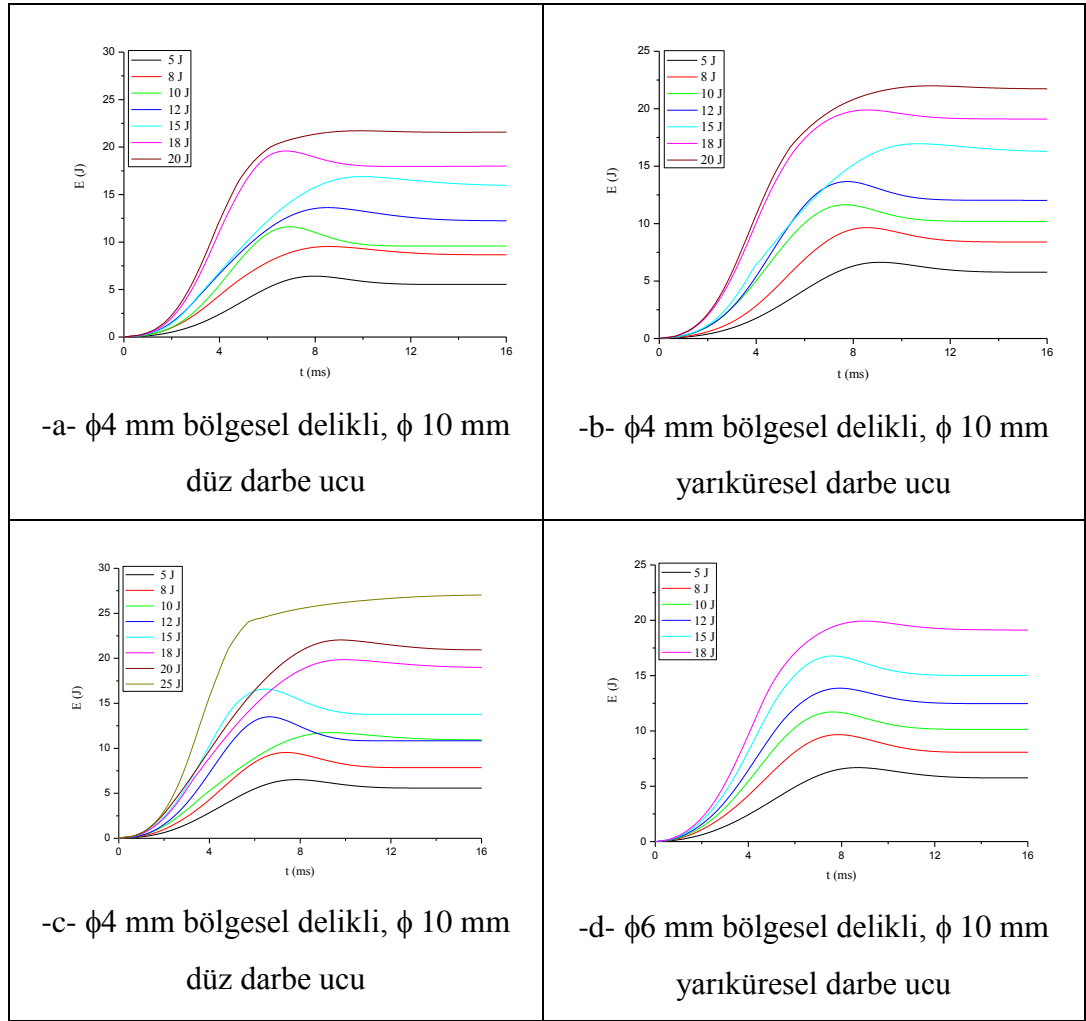
Alüminyum levha yüzeylerindeki bölgesel deliklerin delik çapının artması ile numune metal/cam elyaf keçe+PPS matris ara yüzeyinde oluşturulmak istenen mekanik bağlantının daha geniş bir bölgede olduğu bununda maksimum kuvvet değerlerini arttırdığı belirlenmiştir. Bununla birlikte tam penetrasyon hasarının olduğu darbe enerji değerlerinin ise düz darbe ucu ile hasara uğratılan numuneler için delik çapının büyümesiyle arttığı, yarı küresel darbe ucu ile hasarlanan numunelerde ise azaldığı belirlenmiştir. Düz darbe ucu ile hasarlanan FMT numunelerdeki tam penetrasyon için gerekli darbe enerjisindeki artışın nedeni darbe ucunun şekli ile alakalı olup, numunelerin daha bölgesel bir bölgede (metal/cam elyaf keçe+PPS matris mekanik bağlantısı) hasarlanmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. FMT malzemelerin ara yüzeyinde oluşturulmak istenen mekanik bağlantı belli ölçüde ara yüzey dayanımını iyileştirse de üretimden önce alüminyum levha yüzeylerine herhangi bir yüzey iyileştirme işlemi uygulanmadığından her iki darbe ucunda numuneye etki etmesinden sonra bölgesel delikli FMT numunelerin metal/cam elyaf keçe-PPS matris ara yüzeyinden ayrıldığı gözlenmiştir.



Şekil 4.10:  $\phi 10$  mm yarı küresel ve düz darbe uçları ile gerçekleştirilen düşük hızlı düşen ağırlık darbe deneylerinden elde edilen F-t grafikleri

Bölüm 4.2’de  $\phi 10$  mm düz ve yarı küresel darbe uçları ile hasarlanan polimer matrisli kompozit numunelerin tam penetrasyon için gerekli darbe enerjileri kıyaslanacak olursa, bölgesel delikli FMT malzemelerin tam penetrasyon hasarı için gerekli darbe enerji seviyelerinin gözle görülür bir şekilde azaldığı görülmektedir. Benzer durum maksimum kuvvet değerleri içinde geçerlidir. Buda bölgesel delikli FMT numunelerde darbe ucunun etkideği bölgedeki metal/cam elyaf keçe-PPS matris arayüzeyinde oluşturulan mekanik bağlantının numunenin darbe dayanımına olumlu katkıda bulunmasına rağmen yeterli olmadığını göstergesidir. Deliksiz bölgedeki yüzeyi iyileştirilmemiş alüminyum yüzeyinde cam elyaf keçe ve toz halindeki PPS polimeri üretim esnasında tutunamayıp yapışma sağlayamadığı için darbe yüklemesi

sonrası numune ara yüzeyinde oluşan bölgesel hasarlar yapışmayan metal/cam elyaf keçe+PPS matris ara yüzeyinden ilerleyerek daha düşük darbe enerji seviyelerinde numunenin hasarlanmasına neden olmaktadır. Şekil 4.10'daki F-t eğrileri incelendiğinde kuvvet değerlerindeki ilk ani düşüşün fiber hasarı olduğu [64], her darbe ucu için artan darbe enerji seviyesi ile kuvvet değerlerinin yükselerek kuvvetin pik yaptığı bölgede zig-zag formasyonu ve kuvvette ani düşüşler yaşandığı (delaminasyon hasarı) tespit edilmiştir. Şekil 4.11'de  $\phi 10$  mm yarı küresel ve düz darbe uçları ile gerçekleştirilen düşük hızlı düşen ağırlık darbe deneylerinden elde edilen E-t grafikleri gösterilmiştir. Şekil 4.11'deki E-t grafikleri, alüminyum levha yüzeylerine açılan bölgesel deliklerin darbe yüklemesi esnasında numunede depolanan absorbe edilen enerji değerlerine ne şekilde etki ettiğinin belirlenebilmesi için verilmiştir.



Şekil 4.11:  $\phi 10$  mm yarı küresel ve düz darbe uçları ile gerçekleştirilen düşük hızlı düşen ağırlık darbe deneylerinden elde edilen E-t grafikleri

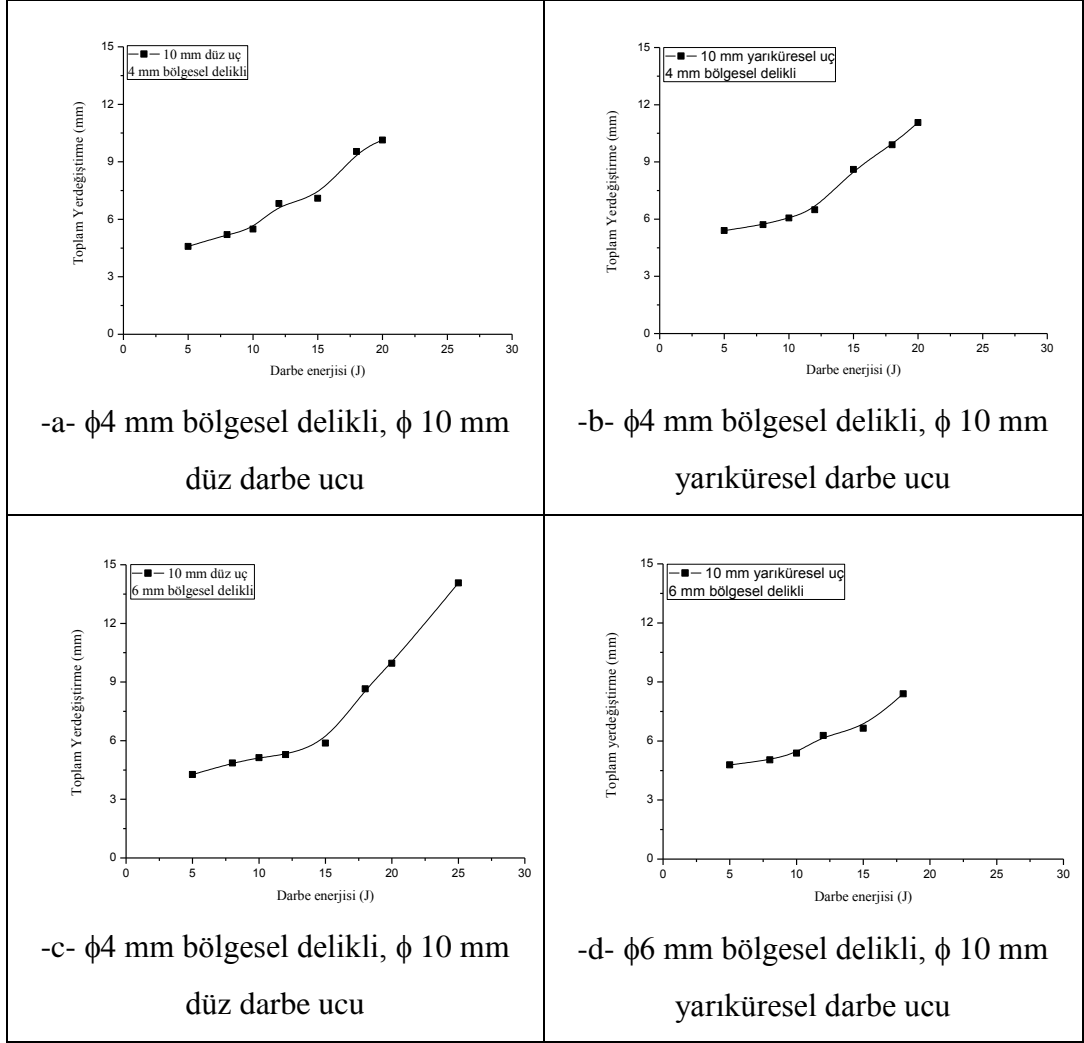


Şekil 4.11'den elde edilen absorbe edilen enerji değerlerinin uygulanan darbe enerjisine, alüminyum sac plakadaki deliklerin delik çapına ve darbe ucu formasyonuna göre değişimi Tablo 4.5'te verilmiştir. Tablo 4.5'te verilen bölgesel delikli FMT malzemelerin absorbe edilen enerji değerlerindeki değişim incelenecek olursa, her iki darbe ucu içinde alüminyum levha yüzeylerindeki deliklerin delik çaplarının artması ile genel olarak aynı darbe enerjisi seviyeleri için absorbe edilen enerji değerlerinin azaldığı saptanmıştır. Şekil 4.10'da belirtilen F-t grafiklerinden elde edilen maksimum kuvvet değerlerindeki artışa benzer olarak alüminyum levha yüzeylerindeki deliklerin delik çaplarının artması ile birlikte numunelerdeki mekanik bağlantının uygulanan darbe enerjisini daha iyi bir şekilde karşılayarak numunenin daha az deforme olmasına neden olduğu belirlenmiştir.

Tablo 4.5: Bölgesel delikli FMT malzemelerin  $\phi 10$  mm düz ve yarı küresel darbe ucu ile gerçekleştirilen düşük hızlı darbe yüklemelerinden elde edilen absorbe edilen enerji değerleri

Darbe enerjisi (J)	$\phi 10$ mm Yarıküresel darbe ucu		$\phi 10$ mm Düz darbe ucu	
	$\phi 4$ mm	$\phi 6$ mm	$\phi 4$ mm	$\phi 6$ mm
5	5,773	5,746	5,455	5,584
8	8,417	8,057	8,660	7,855
10	10,211	10,172	9,616	10,97
12	12,485	12,034	12,287	10,825
15	16,248	15,040	16,04	13,760
18	19,130	19,973	19,046	17,958
20	21,988	-	21,735	20,977
25	-	-		26,748

Bununla birlikte artan darbe enerjisi seviyesi ile her iki darbe ucu içinde absorbe edilen enerji değerlerinde artış yaşandığı gözlemlenmiştir. Darbe ucu formasyonu karşılaştırılacak olursa,  $\phi 10$  mm yarıküresel darbe ucu ile hasarlanan numunelerin absorbe edilen enerji değerlerinin tüm darbe enerji seviyeleri ve her iki delik çapı için daha yüksek çıktığı bunda nedeninin yarı küresel darbe ucunun darbe yüklemesi esnasında numuneyi daha geniş bir bölgede deforme etmesinden (hatta bölgesel delik hattını aştığı) kaynaklanmaktadır. Mekanik bağlantı bölgesinin yarı küresel darbe ucunda daha hızlı bir şekilde aşılması nedeniyle zayıf metal/cam elyaf keçe+PPS matris ara yüzeyi boyunca darbe hasarının ilerlediği bunda numunenin absorbe edilen enerji değerlerini aynı darbe enerji seviyeleri için daha yüksek çıkmasına neden olduğu belirlenmiştir.

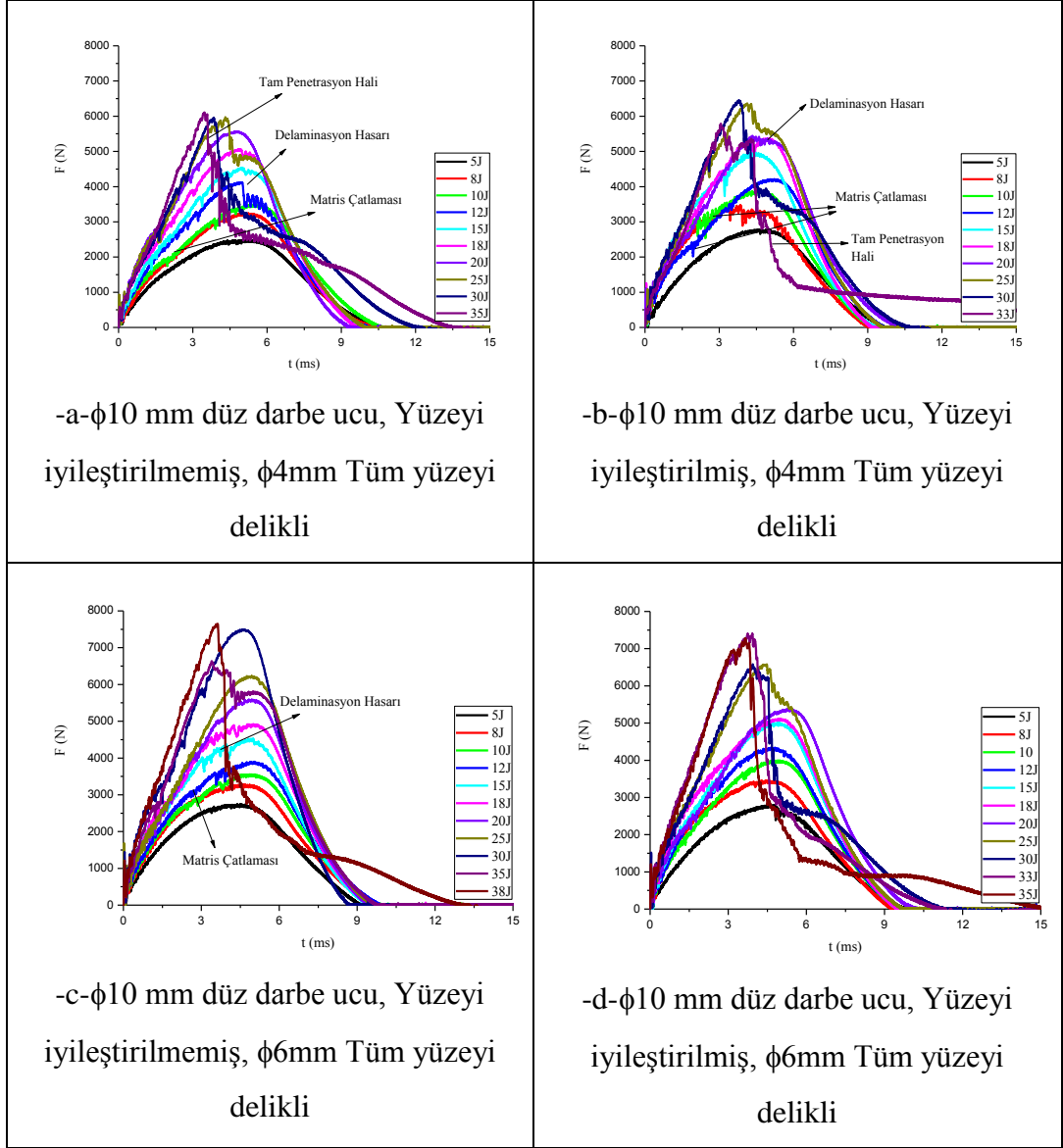


Şekil 4.12: Bölgesel delikli FMT malzemelerin  $\phi 10$  mm düz ve yarı küresel darbe ucu ile gerçekleştirilen düşük hızlı darbe yüklemelerinden elde edilen darbe ucunun toplam yer değiştirme miktarının darbe enerjisine göre değişimi

Bölgesel delikli FMT malzemelerin  $\phi 10$  mm düz ve yarı küresel darbe ucu ile gerçekleştirilen düşük hızlı darbe yüklemelerinden elde edilen darbe ucunun toplam yer değiştirme miktarının darbe enerjisine göre değişimi Şekil 4.12’de verilmiştir. Bölüm 4.2’de Şekil 4.9’da verilen polimer matrisli kompozitlerdeki darbe ucunun toplam yer değiştirme miktarının darbe enerjisine göre değişiminden farklı olarak, fiber metal tabakalı kompozitlerde yapı içerisindeki alüminyumun sünek davranışı nedeniyle tam penetrasyon için gerekli toplam yer değiştirme miktarının arttığı gözlenmiştir. Gerçekleştirilen darbe deneylerinde her darbe ucu için artan darbe enerji seviyesi ile Langdon ve diğ.[170]’ın çalışmasına benzer olarak alüminyum levhalarda uzama ve yırtılma miktarının arttığı saptanmıştır. Buda polimer matrisli kompozit numunelere kıyasla aynı darbe enerjisi değerleri için toplam yer değiştirme

değerlerinin artmasını açıklamaktadır. Darbe uçları karşılaştırılacak olursa,  $\phi 10$  mm yarıküresel darbe ucu ile gerçekleştirilen darbe deneylerinde (Şekil 4.12-b ve d) her iki delik çapı içinde toplam yer değiştirme değerlerinin daha fazla olduğu bununda absorbe edilen enerji ve maksimum kuvvet değerleri ile örtüştüğü saptanmıştır. Düz darbe ucu ile yapılan deneylerde ise numunenin daha bölgesel bir bölgede (alan teması) hasara uğradığı için yarı küresel darbe ucu ile hasarlanan numunelerden farklı olarak hasar konisi oluşmadığı, oluşmayan hasar konisi nedeniyle alüminyum levhalardaki sünme ve yırtılma gibi deformasyonların daha az olduğu belirlenmiştir. Buda toplam yer değiştirme değerlerinin düz darbe ucu ile hasarlanan numunelerde daha az çıkmasına neden olmuştur (Şekil 4.12-a ve c). Son olarak alüminyum levha yüzeylerine açılan deliklerin delik çapları kıyaslanacak olursa, her iki darbe ucu içinde delik çapının artması ile darbe ucunun toplam yer değiştirme miktarının azaldığı, oluşturulan mekanik bağlantının metal/cam elyaf keçe+PPS matris ara yüzeyinde daha iyi tutunma sağlayarak darbe ucunun daha az batmasına yol açtığı saptanmıştır.

Yüzeyi iyileştirilmemiş bölgesel delikli alüminyum levha takviyeli fiber metal tabakalı kompozitlerin darbe davranışları belirtildikten sonra Bölüm 3.7'deki Şekil 3.13-b'de belirtilen delik formasyonuna sahip yüzeyi iyileştirilmiş ve iyileştirilmemiş alüminyum levha takviyeli fiber metal tabakalı kompozitlerin darbe davranışları ve absorpsiyon mekanizmaları incelenmiştir. Alüminyum levhaların yüzeylerine delik delme işleminden sonra yüzey iyileştirme işlemleri uygulanmıştır. Üç nokta eğilme, TAKD ve çekme test yöntemleri ile belirlenen optimum ağırlıkça % 2 silanla silanlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Ağırlıkça silan konsantrasyonunun belirlenmesi üç nokta eğilme, TAKD ve çekme test yöntemlerinin deney sonuçlarında ele alınmıştır. Şekil 4.13 ve Şekil 4.14'te sırasıyla  $\phi 10$  mm düz ve yarıküresel darbe uçları ile gerçekleştirilen düşük hızlı darbe yüklemeleri sonucu tüm yüzeyi delikli yüzeyi iyileştirilmiş ve iyileştirilmemiş FMT malzemelerin F-t grafikleri gösterilmiştir. Şekil 4.13 ve Şekil 4.14'te belirtilen kuvvet değerleri alüminyum levha üzerindeki mevcut deliklerin çapı ve yüzey iyileştirme işleminin olup olmamasına göre ilişkilendirilmiştir.

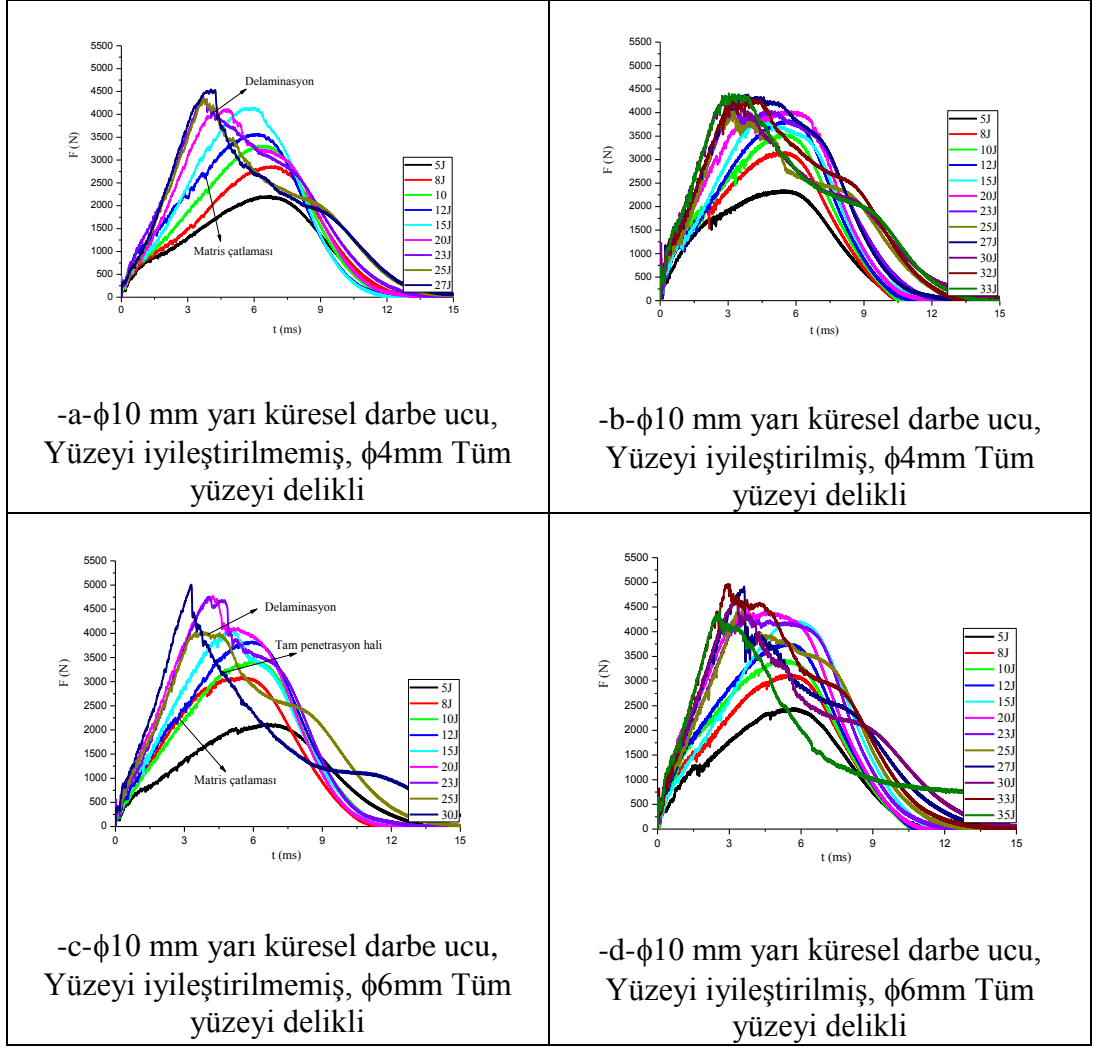


Şekil 4.13:  $\phi 10$  mm düz darbe ucu ile gerçekleştirilen düşük hızlı darbe yüklemeleri sonucu tüm yüzeyi delikli yüzeyi iyileştirilmiş ve iyileştirilmemiş FMT malzemelerin F-t grafikleri

Şekil 4.13'ten her iki delik çapı içinde ( $\phi 4$  mm ve  $\phi 6$  mm tüm yüzeyi delikli) yüzey iyileştirme işlemlerinin alüminyum levhalara uygulanması ile maksimum kuvvet değerlerinde artış yaşandığı gözlenmektedir (Şekil 4.13-b ve d). Bununla birlikte alüminyum levha yüzeylerindeki deliklerin delik çapının artması ile maksimum kuvvet değerlerinin arttığı saptanmıştır (Şekil 4.13-c ve d). Alüminyum levha yüzeylerine delik delme işleminden sonra yapılan yüzey iyileştirme işlemlerinin ve alüminyum levha yüzeylerine açılan deliklerin delik çaplarının artmasının FMT malzemelerin metal/cam elyaf keçe+PPS matris ara yüzey dayanımını iyileştirdiği fakat ara yüzey bölgesinde oluşturulan mekanik bağlantının daha etkin rol oynadığı görülmektedir. Yüzey iyileştirme işlemine tabi tutulmuş tüm yüzeyi delikli

alüminyum levhalar içeren fiber metal tabakaların tam penetrasyona uğrama darbe enerjisinin bir miktar düşmesi bunun bir gösterge olabileceği düşünülmektedir. Tam penetrasyon için gerekli darbe enerjisinin düşüşünde diğer önemli bir husus ise düz darbe ucu formasyonundan kaynaklandığı göz ardı edilmemelidir. Çünkü düz darbe ucu formasyonunda daha bölgesel bir bölgede hasarlanan numuneler genelde darbe ucunun etkin rol aldığı orta bölgeden hasarlanmışlardır. Bölgesel delikli FMT malzemelerin darbe davranışlarına göre kıyas yapılacak olursa, tüm yüzeyi delikli yüzeyi iyileştirilmiş ve iyileştirilmemiş FMT malzemelerin darbe dayanımlarının ciddi bir şekilde iyileştiği saptanmıştır. Bölgesel delikli FMT malzemeler maksimum 25 J (Şekil 4.10-c) darbe enerjisinde tam penetrasyon hasarına maruz kalırken, yüzeyi iyileştirilmiş ve iyileştirilmemiş tüm yüzeyi delikli FMT malzemeler sırasıyla maksimum 35 J (Şekil 4.13-d) ve 38 J (Şekil 4.13-c) darbe enerjilerinde hasarlanmışlardır. Buda tüm yüzeye açılan deliklerle mekanik bağlantının daha iyi bir şekilde oluşturularak üretilen FMT malzemelerin tüm bölgesinde yaklaşık aynı darbe dayanımı sağlayabildiği ve daha rijit davrandığının göstergesi olduğu düşünülmektedir. Alüminyum levha yüzeylerine uygulanan yüzey iyileştirme işlemleri sayesinde delik açılmayan bölgelerinde cam elyaf keçe+PPS matris ile adhezif olarak yapıştığı bunda darbe dayanımına ek katkı sağladığı düşünülmektedir. Şekil 4.13'ten ayrıca polimer matrisli ve bölgesel delikli FMT malzemelere benzer olarak hasar mekanizmalarının ortaya çıktığı belirlenmiştir. Düşük darbe enerjilerinde matris çatlaması hasarının (Şekil 4.13-a) etkin olduğu, darbe enerji seviyelerinin artması ile matris çatlaması hasarlarının birleşerek delaminasyon hasarına yol açtığı gözlenmiştir. Burada belirtilmesi gereken diğer bir hususta metal/cam elyaf keçe+PPS ara yüzeyinde oluşturulan cam elyaf keçe+PPS matris sütunlarının darbe esnasında kesilme hasarıdır. Cam elyaf keçe+PPS matris sütunlarının darbe esnasında kesile hasarı tüm sütunlarda gözlenmemesine rağmen uygulanan darbe enerjisinin bir kısmının sütunların kesilmesine harcandığı için bölgesel delikli FMT malzemelere göre daha yüksek darbe enerji seviyelerine numunelerin dayanmasını sağlamaktadır.

φ10 mm yarı küresel darbe ucu ile gerçekleştirilen düşük hızlı darbe yüklemeleri sonucu tüm yüzeyi delikli yüzeyi iyileştirilmiş ve iyileştirilmemiş FMT malzemelerin F-t grafikleri Şekil 4.14'te gösterilmiştir.



Şekil 4.14:  $\phi 10$  mm yarı küresel darbe ucu ile gerçekleştirilen düşük hızlı darbe yüklemeleri sonucu tüm yüzeyi delikli yüzeyi iyileştirilmiş ve iyileştirilmemiş FMT malzemelerin F-t grafikleri

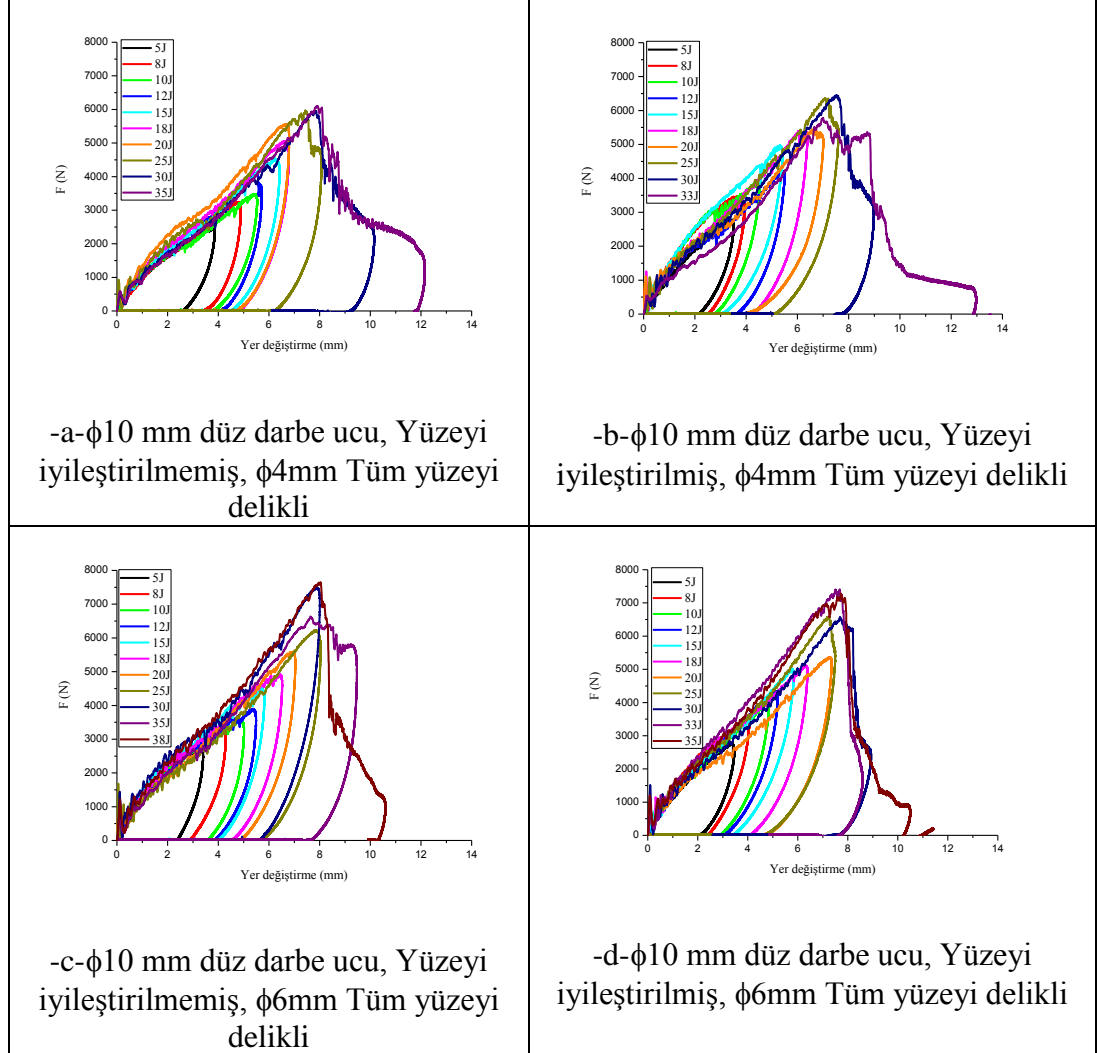
Şekil 4.14'ten Şekil 4.13'te belirtilen düz darbe ucu ile hasarlanan numunelere benzer olarak  $\phi 10$  mm yarı küresel darbe ucu ile düşük hızlı darbe yüklemelerine maruz bırakılan tüm yüzeyi delikli yüzeyi iyileştirilmiş ve iyileştirilmemiş FMT malzemelerdeki deliklerin delik çapının artması ve yüzey iyileştirme işlemlerinin alüminyum levha yüzeylerine uygulanması iyi maksimum kuvvet değerlerinin arttığı bununla birlikte yarı küresel darbe ucu formasyonu nedeniyle maksimum kuvvet değerlerinin düz darbe ucu ile hasarlanmış numunelere göre aynı darbe enerji seviyelerinde daha düşük çıktığı belirlenmiştir. Düz darbe ucu ile hasarlanan numunelerden farklı olarak  $\phi 10$  mm yarı küresel darbe ucu ile hasarlanan FMT numunelerde tam penetrasyon hasarının olduğu darbe enerji seviyesinin yüzey iyileştirme işlemleri ile arttığı gözlenmiştir (Şekil 4.14-b ve d). Yarı küresel darbe

ucu ile hasarlanan numunelerde uygulanan darbe yüklemesi daha geniş bir bölgede numuneyi etkileyip numunede hasar konisi oluşmaktadır. Hasar konisinin varlığı nedeniyle numunenin daha geniş bir bölgede uygulanan darbe enerjisini karşıladığı ve bu sayede daha fazla cam elyaf keçe+PPS matris sütununun ve yüzey iyileştirme işlemleri nedeniyle metal/cam elyaf keçe+PPS matris ara yüzeyinde oluşturulan adhezif yapışmanın etkin rol oynadığı düşünülmektedir. cam elyaf keçe+PPS matris sütunlarının varlığı nedeniyle ara yüzeyde oluşan mekanik bağlantı ve adhezif yapışmanın etkinliğinin daha iyi gözlenebilmesi için bölgesel delikli yüzeyi iyileştirilmemiş FMT numunelere göre kıyaslama yapılacak olursa,  $\phi 4$  mm ve  $\phi 6$  mm bölgesel delikli yüzeyi iyileştirilmemiş FMT malzemelerin tam penetrasyon hasarı için gerekli darbe enerjileri sırasıyla 20 J (Şekil 4.10-b) ve 18 J iken (Şekil 4.10-d),  $\phi 4$  mm ve  $\phi 6$  mm tüm yüzeyi delikli yüzeyi iyileştirilmemiş FMT malzemeler için bu değer sırasıyla 27 J (Şekil 4.14-a) ve 30 J (Şekil 4.14-c) seviyelerine yükselmiştir.  $\phi 4$  mm ve  $\phi 6$  mm tüm yüzeyi delikli yüzeyi iyileştirilmiş FMT malzemelerde ise tam penetrasyon hasarı için gerekli darbe enerji değerlerinin sırasıyla 33 J (Şekil 4.14-b) ve 35 J (Şekil 4.14-d) olduğu belirlenmiştir. Buda yüzey iyileştirme işlemlerinin ve mekanik bağlantının FMT malzemelerin darbe dayanımını iyileştirdiğinin bir kanıtıdır.

$\phi 10$  mm düz ve yarıküresel darbe uçları ile gerçekleştirilen düşük hızlı darbe yüklemeleri sonucu tüm yüzeyi delikli FMT numunelerde oluşan hasar mekanizmaları belirtilecek olursa, ana hasar mekanizmalarının matris çatlaması, delaminasyon hasarı, darbe ucu bölgesinde batma ve tabakaların kesilmesi, cam elyaf keçe+PPS matris sütunlarının kesilmesi, kompozit tabakanın arka yüzeyinde şişme ve çekme nedenli fiber kırılmaları ve alüminyum levhaların sünerek yırtılması olarak ortaya çıktığı gözlenmiştir.

Şekil 4.15'te  $\phi 10$  mm düz darbe ucu ile gerçekleştirilen düşük hızlı darbe yüklemeleri sonucu tüm yüzeyi delikli yüzeyi iyileştirilmiş ve iyileştirilmemiş FMT numunelerin kuvvet-yer değiştirme grafikleri verilmiştir. Şekil 4.15'ten açıkça görülmektedir ki, alüminyum levha yüzeylerine açılan deliklerin delik çaplarının artması ile aynı darbe enerji seviyesi için darbe ucunun yer değiştirme miktarı

azalmıştır. Benzer sonuç alüminyum levha yüzeylerine yüzey iyileştirme işlemlerinin uygulanmasında da gözlenmektedir (Şekil 4.15-b ve d).

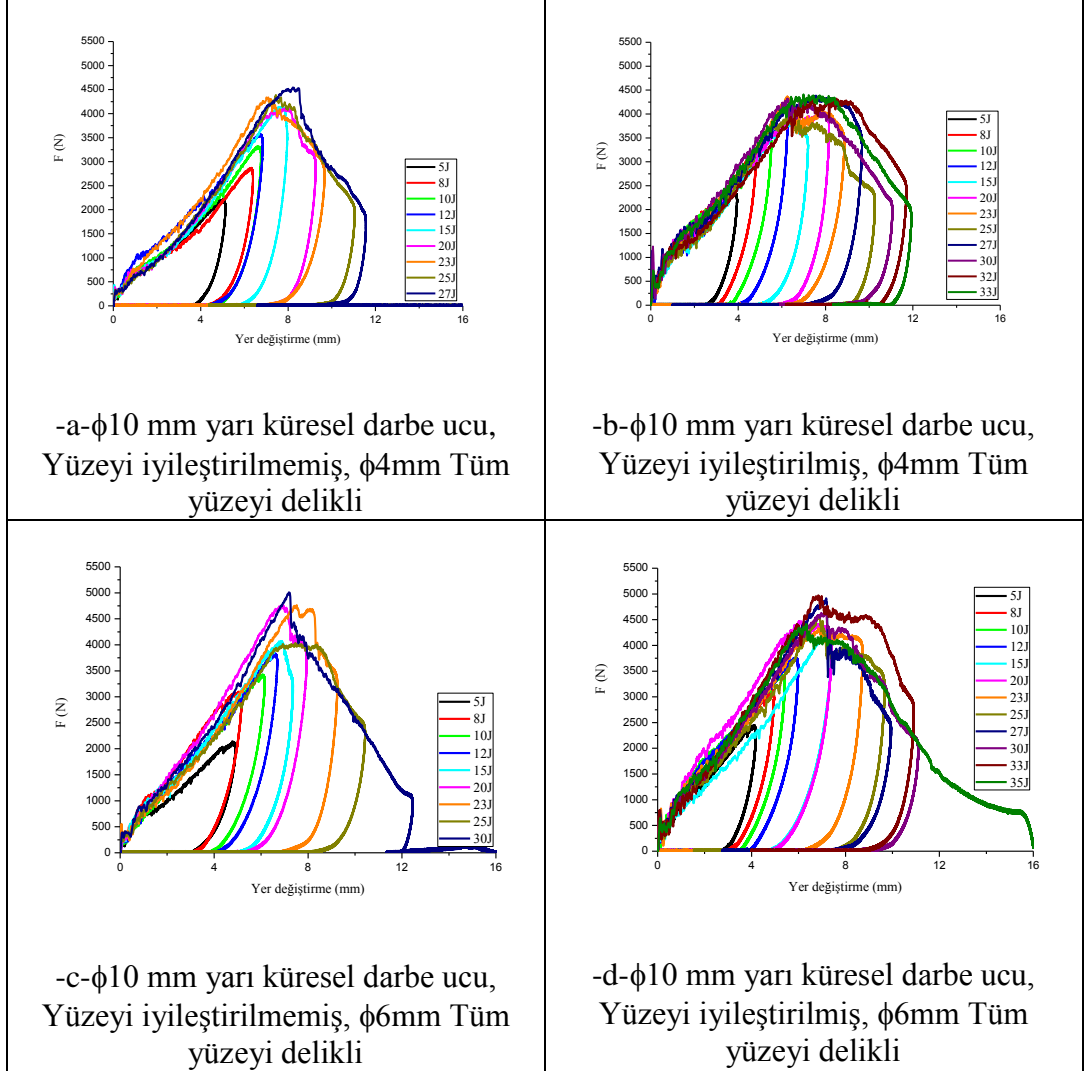


Şekil 4.15:  $\phi 10$  mm düz darbe ucu ile gerçekleştirilen düşük hızlı darbe yüklemeleri sonucu tüm yüzeyi delikli yüzeyi iyileştirilmiş ve iyileştirilmemiş FMT numunelerin kuvvet-yer değiştirme grafikleri

Alüminyum levhalara uygulanan yüzey iyileştirme işlemleri sayesinde metal/cam elyaf keçe+PPS matris ara yüzeyinde oluşturulan adhezif yapışma ve delik formasyonu ile sağlanan mekanik bağlantı ile darbe ucunun yer değiştirme miktarının düştüğü, yer değiştirme miktarının düşmesi ile numunenin aynı darbe enerjisi seviyesi için daha yüksek darbe dayanımı gösterdiği saptanmıştır. Bu sayede tüm yüzeyi delikli yüzeyi iyileştirilmiş ve iyileştirilmemiş fiber metal tabakalı kompozitlerin tam penetrasyona uğrama darbe enerji seviyelerinin arttığı belirlenmiştir.  $\phi 10$  mm yarı küresel darbe ucu ile gerçekleştirilen düşük hızlı darbe



yüklemeleri sonucu tüm yüzeyi delikli yüzeyi iyileştirilmiş ve iyileştirilmemiş FMT numunelerin kuvvet-yer değiştirme grafikleri Şekil 4.16'da gösterilmiştir.

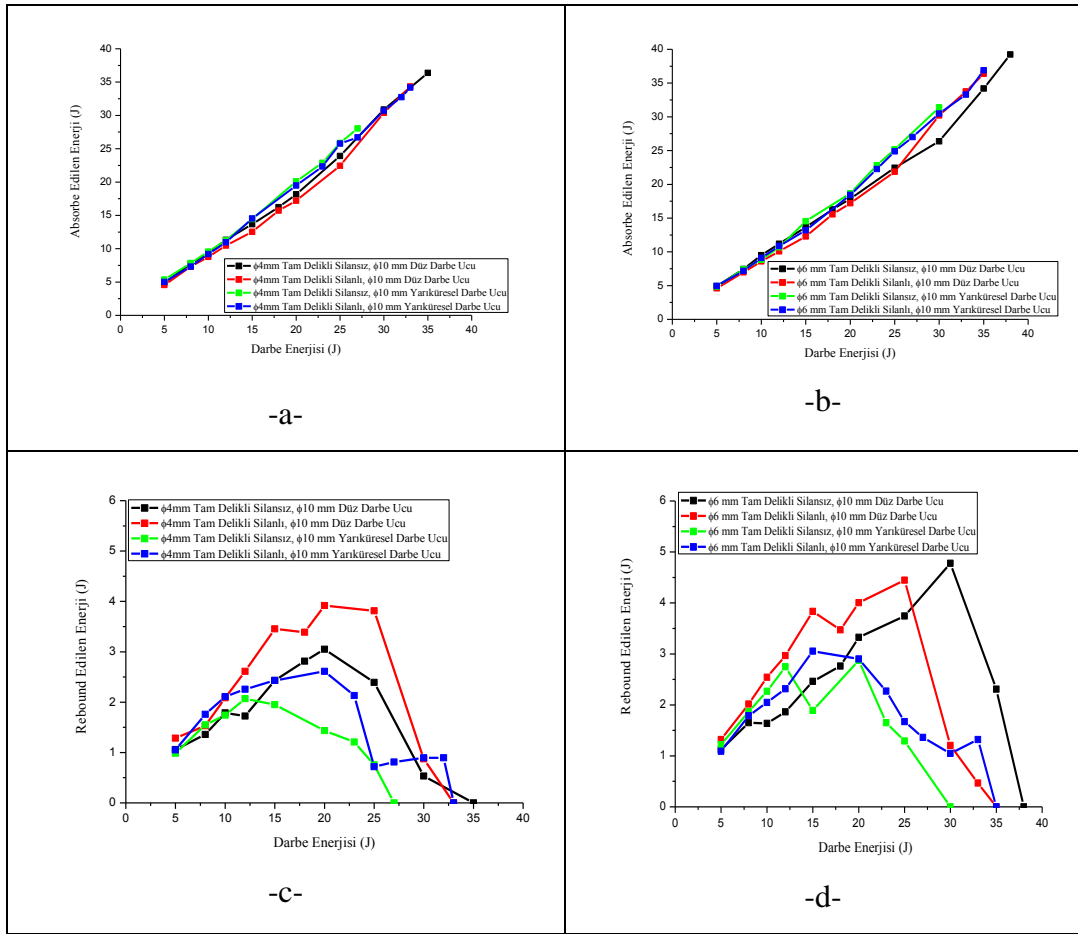


Şekil 4.16:  $\phi 10$  mm yarı küresel darbe ucu ile gerçekleştirilen düşük hızlı darbe yüklemeleri sonucu tüm yüzeyi delikli yüzeyi iyileştirilmiş ve iyileştirilmemiş FMT numunelerin kuvvet-yer değiştirme grafikleri

Şekil 4.15'te belirtilen düz darbe ucu ile darbe yüklemesine maruz bırakılmış FMT numunelere benzer olarak yüzey iyileştirme işlemleri ve alüminyum levha yüzeylerine açılan deliklerin delik çaplarının artması ile darbe ucunun yer değiştirme değerlerinde düşüş yaşandığı bununla birlikte düz darbe ucuna göre yarı küresel darbe ucunda yer değiştirme değerlerinin aynı darbe enerjisi seviyeleri için daha yüksek çıktığı belirlenmiştir. Bunun nedeni yarı küresel darbe ucu formasyonundan kaynaklandığı düşünülmektedir. yarı küresel darbe ucu formasyonunda numunede

daha fazla sehim oluşması nedeniyle darbe ucunun yer değiştirme miktarı artmaktadır.

Şekil 4.17'de  $\phi 10$  mm düz ve yarı küresel darbe ucu ile gerçekleştirilen düşük hızlı darbe yüklemeleri sonucu tüm yüzeyi delikli yüzeyi iyileştirilmiş ve iyileştirilmemiş FMT numunelerin E-t grafiklerinden elde edilen absorbe edilen enerji ve geri gelme enerjilerin uygulanan darbe enerjisine göre değişimi gösterilmiştir.



Şekil 4.17:  $\phi 10$  mm düz ve yarı küresel darbe uçları ile gerçekleştirilen düşük hızlı darbe yüklemeleri sonucu tüm yüzeyi delikli yüzeyi iyileştirilmiş ve iyileştirilmemiş FMT numunelerin absorbe edilen enerji ve geri gelme enerjilerin uygulanan darbe enerjisine göre değişimi

Şekil 4.17-a ve b'de gösterilen absorbe edilen enerji-darbe enerji değişim eğrilerinden her iki delik çapı içinde yarı küresel darbe ucu ile hasarlanmış yüzeyi iyileştirilmiş ve iyileştirilmemiş numunelerin daha fazla absorbe edilen enerji değerlerine sahip olduğu, yüzey iyileştirme işlemlerine maruz kalan numunelerin ise absorbe edilen enerji değerlerinde azda olsa azalma yaşandığı belirlenmiştir. Yarı

küresel darbe ucu formasyonu nedeniyle daha geniş bir bölgede hasarlanma yaşanması nedeniyle daha fazla cam elyaf keçe+PPS matris sütunu ve adhezif yapışmış bölge uygulanan darbe enerjisini karşılamıştır. Bu nedenle numune aynı darbe enerjisi seviyelerinde düz darbe ucuna göre daha fazla plastik deformasyona maruz kalmıştır.

Yüzey iyileştirme işleminin fiber metal tabakalı numunelere uygulanması ile yüzeyi iyileştirilmemiş numunelere göre daha fazla darbe dayanımı gösterip sadece mekanik bağlantıların darbeye direnç göstermesinin yanında adhezif yapışma sayesinde ara yüzeyde oluşan hasarlanma hızlı bir şekilde ilerleyememiştir. Düz darbe ucu formasyonu ile hasarlanan numunelerde yüzey iyileştirme işlemi ile absorbe edilen enerji değerlerinde yarı küresel darbe ucuna benzer olarak düşüş yaşanmıştır.

Şekil 4.17-c ve d’de tüm yüzeyi delikli, yüzeyi iyileştirilmiş ve iyileştirilmemiş fiber metal tabakalı kompozitlerde darbe yüklemesi esnasında geri gelme enerjinin (elastik enerji) uygulanan darbe enerjisine göre değişimi gösterilmiştir. Her iki delik çapı ( $\phi 4$  mm ve  $\phi 6$  mm) içinde düz darbe ucu ile hasarlanan numunelerin geri gelme enerji değerlerinin aynı darbe enerji seviyeleri için yarı küresel darbe uçları ile hasarlanan numunelere göre daha yüksek çıktığı belirlenmiştir. Bununla birlikte yüzey iyileştirme işlemlerinin uygulanması ile geri gelme enerji değerlerinin her iki çap ve her iki uç içinde arttığı saptanmıştır. Geri gelme enerji değerlerinde yüzey iyileştirme işlemleri ile artışın yaşanması metal/cam elyaf keçe-PPS matris ara yüzey adhezif yapışmasının iyi olduğu ve bu sayede numunenin darbe dayanımını iyileştirdiği düşünülmektedir.

Sıcak pres tekniği ile üretilen cam elyaf keçe takviyeli PPS kompozit, bölgesel delikli yüzeyi iyileştirilmemiş alüminyum levhalar içeren FMT ve tüm yüzeyi delikli yüzeyi iyileştirilmemiş ve iyileştirilmiş alüminyum levhalar içeren FMT malzemelerin  $\phi 10$  mm düz ve yarı küresel darbe uçları ile gerçekleştirilen düşük hızlı darbe yüklemeleri sonucu elde edilen toplam yer değiştirme ve absorbe edilen enerji değerlerinin uygulanan darbe enerjilerine göre değişiminin karşılaştırılması için Tablo 4.6-4.9’da elde edilen veriler gösterilmiştir.

Tablo 4.6: Cam elyaf keçe takviyeli PPS kompozitin (A), Bölgesel delikli yüzeyi iyileştirilmemiş fiber metal tabakalı kompozitin (B) , Tüm yüzeyi delikli yüzeyi iyileştirilmemiş fiber metal tabakalı kompozitin (C), Tüm yüzeyi delikli ve yüzeyi iyileştirilmiş fiber metal tabakalı kompozitin (D)  $\phi$ 10 mm çaplı yarı küresel darbe ucu ile gerçekleştirilen düşük hızlı darbe yüklemelerinden ölçülen absorbe edilen enerji değerleri

Darbe enerjisi (J)	A (J)	B		C		D	
		$\phi$ 4 mm (J)	$\phi$ 6 mm (J)	$\phi$ 4 mm (J)	$\phi$ 6 mm (J)	$\phi$ 4 mm (J)	$\phi$ 6 mm (J)
5	3,995	5,773	5,746	5,362	4,845	5,01	4,941
8	6,372	8,417	8,057	7,852	7,437	7,32	7,182
10	6,903	10,211	10,172	9,576	8,813	9,193	9,094
12	8,485	12,485	12,034	11,261	10,680	10,948	10,859
15	10,655	16,248	15,040	14,434	14,543	14,543	13,186
18	15,145	19,130	19,973				
20	18,654	21,988		20,110	18,673	19,471	18,434
23	20,146			22,896	22,816	22,337	22,257
25	25,811			25,856	25,185	25,760	24,898
27				28,049	-	26,709	26,996
30					31,384	30,713	30,490
32						32,724	-
33						34,177	33,283
34							
35							36,889

Tablo 4.7: Cam elyaf keçe takviyeli PPS kompozitin (A), Bölgesel delikli yüzeyi iyileştirilmemiş fiber metal tabakalı kompozitin (B) , Tüm yüzeyi delikli yüzeyi iyileştirilmemiş fiber metal tabakalı kompozitin (C), Tüm yüzeyi delikli ve yüzeyi iyileştirilmiş fiber metal tabakalı kompozitin (D)  $\phi$ 10 mm çaplı düz darbe ucu ile gerçekleştirilen düşük hızlı darbe yüklemelerinden ölçülen absorbe edilen enerji değerleri

Darbe enerjisi (J)	A (J)	B		C		D	
		$\phi$ 4 mm (J)	$\phi$ 6 mm (J)	$\phi$ 4 mm (J)	$\phi$ 6 mm (J)	$\phi$ 4 mm (J)	$\phi$ 6 mm (J)
5	3,866	5,455	5,584	4,849	4,915	4,555	4,587
8	5,395	8,660	7,855	7,743	7,448	7,323	6,955
10	5,882	9,616	10,97	9,343	9,493	8,772	8,589
12	7,023	12,287	10,825	11,325	11,185	10,472	10,08
15	8,455	16,04	13,760	13,680	13,649	12,541	12,276
18	10,803	19,046	17,958	16,222	16,274	15,724	15,565
20	12,828	21,735	20,977	18,158	17,883	17,206	17,201
25	17,916		26,748	23,923	22,443	22,443	21,868
30	23,764			30,876	26,376	30,399	30,206
32	32,902					-	
33						34,329	33,753
35				36,378	34,196		36,378
38				-	39,224		
40					-		

Tablo 4.8: Cam elyaf keçe takviyeli PPS kompozitin (A), Bölgesel delikli yüzeyi iyileştirilmemiş fiber metal tabakalı kompozitin (B) , Tüm yüzeyi delikli yüzeyi iyileştirilmemiş fiber metal tabakalı kompozitin (C), Tüm yüzeyi delikli ve yüzeyi iyileştirilmiş fiber metal tabakalı kompozitin (D)  $\phi$ 10 mm çaplı yarı küresel darbe ucu ile gerçekleştirilen düşük hızlı darbe yüklemelerinden ölçülen toplam yer değiştirme değerleri

Darbe Enerjisi (J)	A (mm)	B		C		D	
		$\phi$ 4 mm (mm)	$\phi$ 6 mm (mm)	$\phi$ 4 mm (mm)	$\phi$ 6 mm (mm)	$\phi$ 4 mm (mm)	$\phi$ 6 mm (mm)
5	1,9548	5,4012	4,7867	3,832	3,145	2,68	2,867
8	2,08	5,708	5,0434	4,504	3,222	3,13	3,120
10	2,2185	6,0595	5,3845	4,758	3,946	3,716	3,541
12	2,4565	6,4907	6,275	4,623	4,267	4,211	3,991
15	2,5769	8,6077	6,6468	5,883	5,322	5,186	4,896
18	3,2728	9,8949	8,3954				
20	4,6502	11,0613		7,450	5,612	6,226	5,012
23	4,2623			7,474	7,16	6,640	6,487
25	10,7279			9,948	8,565	9,230	7,738
27				10,532		7,523	7,883
30					28,002	9,431	9,344
32						10,533	
33						11,113	9,123
35							16,073

Tablo 4.9: Cam elyaf keçe takviyeli PPS kompozitin (A), Bölgesel delikli yüzeyi iyileştirilmemiş fiber metal tabakalı kompozitin (B) , Tüm yüzeyi delikli yüzeyi iyileştirilmemiş fiber metal tabakalı kompozitin (C), Tüm yüzeyi delikli ve yüzeyi iyileştirilmiş fiber metal tabakalı kompozitin (D)  $\phi$ 10 mm çaplı düz darbe ucu ile gerçekleştirilen düşük hızlı darbe yüklemelerinden ölçülen toplam yer değiştirme değerleri

Darbe Enerjisi (J)	A (mm)	B		C		D	
		$\phi$ 4 mm (mm)	$\phi$ 6 mm (mm)	$\phi$ 4 mm (mm)	$\phi$ 6 mm (mm)	$\phi$ 4 mm (mm)	$\phi$ 6 mm (mm)
5	1,5897	4,5834	4,2689	2,62	2,364	2,189	2,087
8	1,5533	5,1953	4,857	3,43	2,892	2,562	2,391
10	1,5645	5,4932	5,1311	3,818	3,583	2,798	2,898
12	1,6555	6,8236	5,2839	4,142	3,869	3,645	3,077
15	1,6966	7,0937	5,8783	4,54	4,004	3,085	3,418
18	2,0262	9,5409	8,6516	4,862	4,571	4,281	4,089
20	2,0924	10,1357	9,9628	4,893	6,836	4,017	4,585
25	2,639		14,0691	5,708	6,268	5,139	4,701
30	3,3858			9,232	5,621	7,759	7,654
32	7,7336						
33						12,910	7,751
35				26,407	7,709		10,091
38					10,282		

#### **4.4. Düşük Hızlı Düşen Ağırlık Darbe Testlerine Maruz Bırakılan Polimer Matrisli Kompozitlerin ve Yüzeyi İyileştirilmiş ve İyileştirilmemiş Tüm Yüzeyi Delinmiş Fiber Metal Tabakalı Kompozitlerin Darbe Sonrası Oluşan Hasar Mekanizmalarının Tespiti**

##### **4.4.1. Bilgisayarlı tomografi yöntemi ile polimer matrisli kompozitlerde düşük hızlı düşen ağırlık darbe testleri sonucunda oluşan hasar mekanizmalarının tespiti**

Polimer matrisli kompozitlerin servis ve üretim süreçlerinde oluşabilecek kusurların tespit edilebilmesi için tahribatsız muayene tekniklerinin yapılması gerekmektedir. Tahribatsız muayene teknikleri karmaşık malzemelerin ve yapıların uygunluğunun saptanabilmesi sağlayan yüksek güvenilirlikle enstrumante edilmiş, hassasiyeti yüksek ve yüksek çalışma hızına sahip cihazlardır. Yapılan literatür araştırmalarında düşük hızlı darbe yüklemesine maruz bırakılan polimer matrisli kompozitlerin hasar analizlerinde genellikle optik mikroskop, x-ray, ultrasonik c-tarama ve termografi gibi tahribatsız muayene tekniklerinin kullanıldığı saptanmıştır. Santulli [171] otomotiv uygulamalarında kullanılan E-cam/PP kompozitlerinde oluşan darbe hasar mekanizmalarını termografi yöntemi ile incelemiştir. Mitrevski ve diğ. [18] düşük hızlı darbe yüklemesine maruz bırakılan kompozit plakalarda oluşan hasar mekanizmasına darbe ucunun etkisini araştırmışlardır. 3 farklı darbe ucunun kompozit plakalarda oluşturduğu hasar alanı ultrasonik c-tarama yöntemi ve termografi yöntemleri ile incelenmiştir. Gerçekleştirilen optik mikroskop çalışması ile konik darbe ucu ile numunelerde fiber kırılmaları gözlenirken yarı küresel darbe ucu ile numunelerde delaminasyon hasarının ana hasar mekanizması olduğunu saptamışlardır.

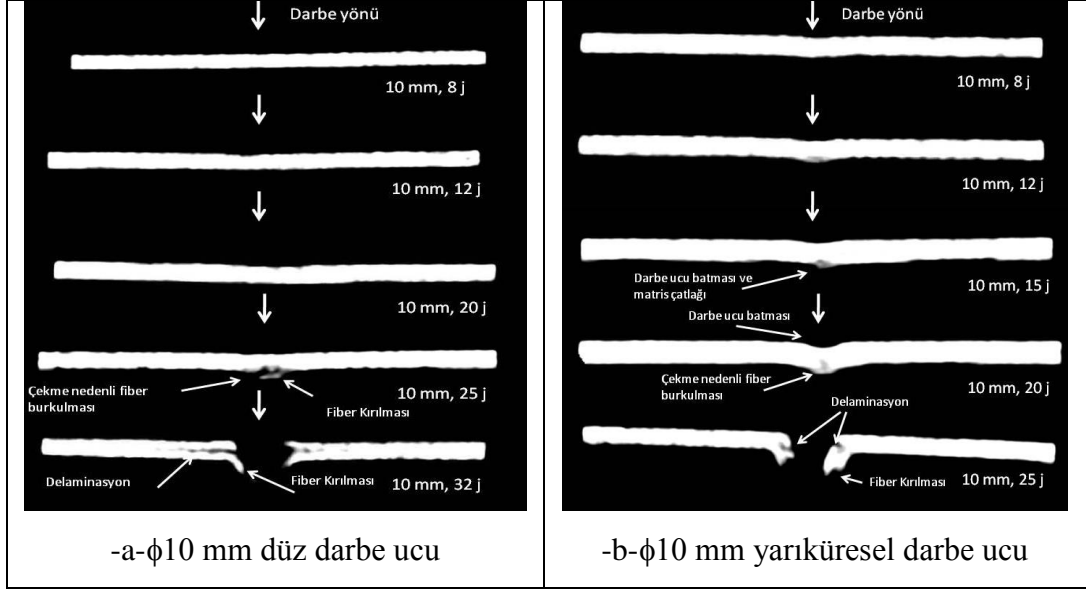
Moura ve Gonçalves [172]  $(0_4,90_4)_s$  tabakalı karbon-epoksi kompozitlerine düşük hızlı darbe yüklemesi uygulamışlardır. Düşük hızlı darbe yüklemesi sonucu numunelerde oluşan hasar karakterizasyonu X-ray yöntemi ile belirlenmiştir. Tabakalı kompozitlerde en zararlı hasar tiplerinin delaminasyon ve matris çatlaması hasarı olduğunu belirlemişlerdir. Aymerich ve Priolo [11] çapraz katlı kompozit plakalarında düşük hızlı darbe yüklemesi nedeni ile oluşan hasar mekanizmalarını

gözlemlemek için X-ray, ultrasonik ve optik mikroskop yöntemlerini kullanmışlar ve dikişli ve dikişsiz çapraz katlı plakalarda ilk hasarın en alt kattaki 0° katında çekme matris çatlaması olduğu bunun 90° yönlü katmanda kayma matris çatlamasının izlediği ve son olarak ara yüzeyde delaminasyon hasarı ile sonuçlandığını saptamışlardır.

Bilgisayarlı tomografi x-ışını (röntgen) incelenmek istenen bölgenin kesitsel görüntüsünü oluşturmaya yönelik radyolojik teşhis yöntemidir. Tıp alanında yaygın olarak kullanılan bilgisayarlı tomografi ile görüntüleme tekniğinin malzeme iç yapısını ve hasar mekanizmalarını görmek için uygun olabileceği düşünülmektedir. Yapılan literatür incelemelerinde bilgisayarlı tomografi yöntemi ile gerçekleştirilen hasar mekanizması analizine rastlanmamıştır. Bu çalışmada sıcak pres tekniği ile üretilen cam elyaf keçe takviyeli PPS kompozitlerinin düşük hızlı düşen ağırlık darbe testleri sonucunda oluşan hasar mekanizmaları bilgisayarlı tomografi yöntemi ile belirlenmiştir.

Darbe yüklemesi altında kompozit tabakaların dinamik davranışı oluşan birçok hasar mekanizması nedeni ile çok karmaşıktır. Standart kalınlıktaki bir kompozit plakada darbe yüklemesi nedeni ile tabakanın arka katında matris çatlaması, fiber yönünde çatlak ilerlemesi, bitişik katmanlarda matris çatlaklarının artması, yüzeye yakın yerlerde delaminasyonlar, iç çatlaklar ve delaminasyonlar ve fiber hasarlanmaları gibi hasar mekanizmaları oluşmaktadır [173]. Oluşan iç hasarlanmalar darbe uygulanan noktada oluşan bölgesel yüzey hasarından daha içerde oluşmaktadır. Darbe yüklemesi nedeni ile oluşan iç hasarlar genellikle çok zor görülürki buna çok zor görülebilen darbe hasarı (ZGDH) denilmektedir. Bu olay nedeniyle malzemenin yük taşıma kapasitesi ciddi şekilde azalır ve yapının dayanımı düşer [174]. Bu nedenle darbe yüklemesine maruz bırakılmış polimer matrisli kompozitlerde oluşan hasar mekanizmalarının belirlenmesi ve ona göre önlemler alınması önem arz etmektedir.

Şekil 4.18'de  $\phi 10$  mm düz ve yarı küresel darbe uçları ile farklı darbe enerjilerinde yapılan düşük hızlı darbe yüklemesi sonucu polimer kompozit malzemelerde oluşan hasar mekanizmaları gösterilmiştir.



Şekil 4.18: Tomografi yöntemi ile  $\phi 10$  mm düz ve yarı küresel darbe uçları ile gerçekleştirilen darbe yüklemesine maruz bırakılmış polimer matrisli kompozit malzemelerde oluşan hasar mekanizmaları

Şekil 4.18'den genel olarak delaminasyon hasarı, fiber burkulması, darbe ucunun batması nedeniyle fiberlerin yönlenmesi, artan darbe enerjisi ile her iki darbe ucu geometrisinde de kompozit numunelerin alt yüzeyinde çekme gerilmesi nedenli fiber kırılmaları bilgisayarlı tomografi yöntemi ile tespit edilmiştir. Şekil 4.18-a'da farklı darbe enerji seviyelerinde  $\phi 10$  mm düz darbe ucu ile hasarlanmış polimer matrisli kompozit numunelerin kesit resimleri gösterilmiştir. Artan darbe enerji seviyesi ile darbe ucunun numuneyi bölgesel olarak etkilediği ve tam penetrasyon halinde düz uç geometrisi nedeni ile darbe ucunun numuneye giriş ve çıkış çaplarının yaklaşık eşit kaldığı görülmüştür.

Şekil 4.18-a'dan ayrıca polimer matrisli kompozit numuneye uygulanan darbe enerjisinin artırılması ile bölgesel darbe ucu batma derinliğinin arttığı, bununla birlikte delaminasyon oluşum enerjisi olan 25 J değerinde delaminasyon hasarı gözlenmediği fakat numunenin arka yüzeyinde çekme nedenli fiber burkulması hasarının ana hasar mekanizması olarak göze çarptığı saptanmıştır. Artan darbe enerjisi değeri ile (32 J), fiber burkulması hasarının ve bölgesel darbe ucu batmasının artması ile tam penetrasyon gerçekleşmiştir. Bununla birlikte darbe enerjisinin 32 J'a çıkmasıyla darbe ucunun bölgesel olarak yüksek gerilme ve delme etkisi yaratmasıyla fiber kırılmalarının oluşumu Kaynakça [14,18,58]'e benzer olarak



gözlenmiştir. Delaminasyon hasarının ise ana hasar mekanizması olduğu belirlenmiştir.

Şekil 4.18-b'de bilgisayarlı tomografi yöntemi ile  $\phi 10$  mm yarı küresel darbe ucu ile gerçekleştirilen düşük hızlı darbe yüklemesine maruz bırakılmış kompozit numunelerde oluşan hasar mekanizmaları gösterilmiştir. Şekil 4.18-b'den görüldüğü gibi numuneye uygulanan darbe enerjisi seviyesinin artması ile kompozit numunede darbe ucu nedenli oluşan hasar bölgesinin daha geniş bir bölgeye yayıldığı ve hasar konisi denilen yapının oluştuğu gözlenmiştir. Hasar koni yapısına göre numunenin darbe uygulanan yüzeyi ile alt yüzeyi arasındaki hasar çapı farklıdır. Darbe ucunun yarı küresel olması nedeni ile kompozit numunenin alt yüzeyindeki hasar bölgesi çapının daha büyük olduğu tespit edilmiştir. Düz darbe ucu ile hasarlanmış kompozit numunelere göre alt yüzey bölgesindeki fiber kırılması hasarlarının daha geniş bir bölgede oluştuğu saptanmıştır. Aynı darbe enerji seviyeleri için yarı küresel darbe ucu ile gerçekleştirilen darbe yüklemelerinde darbe ucunun numuneye daha fazla battığı ve hasar bölgesinin daha yayvan bir şekilde oluştuğu görülmektedir.  $\phi 2.8$  mm,  $\phi 5$  mm ve  $\phi 7$  mm düz ve yarı küresel darbe uçları ile darbe hasarına uğratılmış polimer kompozit numunelerde Şekil 4.18'de belirtilen hasar mekanizmalarına benzer hasar mekanizmaları saptanmasından dolayı Doktora çalışması'nda sadece  $\phi 10$  mm düz ve yarı küresel darbe uçları ile darbe hasarına uğratılmış polimer kompozit numunelerin bilgisayarlı tomografi yöntemi ile elde edilen hasar resimleri konulmuştur.  $\phi 2.8$  mm,  $\phi 5$  mm ve  $\phi 7$  mm düz ve yarı küresel darbe uçları ile darbe hasarına uğratılmış polimer kompozit numunelerde de benzer sonuçlar saptanmış olup darbe uç çapının artması ile numunenin darbeyi karşılama yüzey alanının arttığı ve numunede darbe ucu nedenli bölgesel batma alanının daha geniş bir bölgeye yayılarak numunenin bel vermesinin arttığı saptanmıştır.

#### **4.4.2. Dijital kamera ile tüm yüzeyi delikli yüzeyi iyileştirilmiş ve iyileştirilmemiş fiber metal tabakalı kompozitlerin düşük hızlı düşen ağırlık darbe testleri sonucunda oluşan hasar mekanizmalarının tespiti**

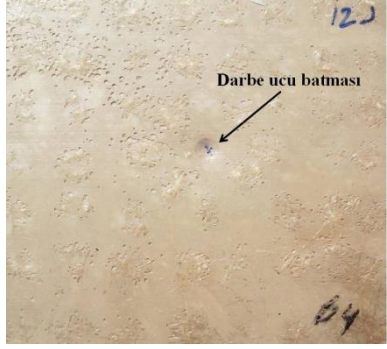
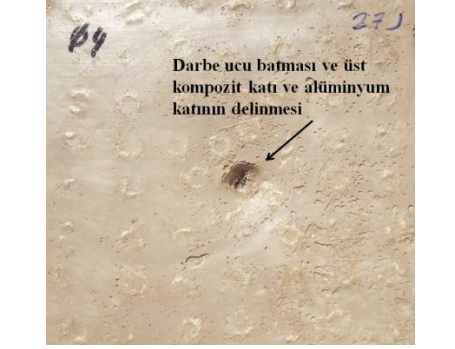


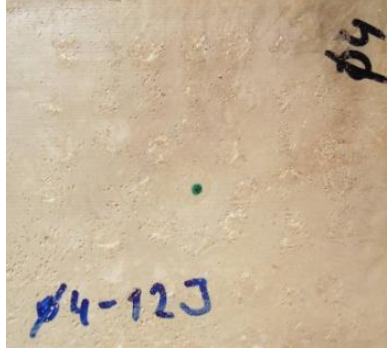

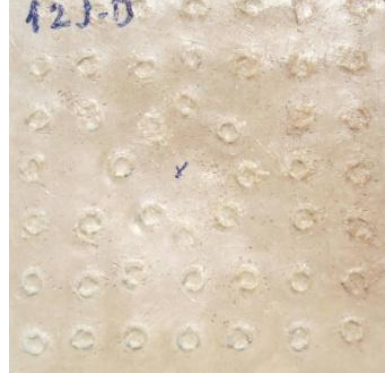

Düşük hızlı düşen ağırlık darbe deneylerinde darbe sonrası yüzeyi iyileştirilmiş ve iyileştirilmemiş tüm yüzeyi delikli FMT numunelerde oluşan hasar

mekanizmalarının tespit edilebilmesi için dijital kamera ile numunelerin darbe uygulanan yüzeylerinden ve arka yüzeylerinden fotoğraflar alınmıştır.









Şekil 4.19 ve Şekil 4.20’de sırasıyla  $\phi 10$  mm düz ve yarıküresel darbe uçları ile gerçekleştirilen deneylerden yüzeyi iyileştirilmiş ve iyileştirilmemiş  $\phi 4$  mm delikli FMT numunelerin darbe uygulanan yüzeylerinde ve arka yüzeylerinde oluşan hasar mekanizmaları gösterilmiştir. Her grup için 2 farklı darbe enerji seviyesi belirlenmiştir.  $\phi 6$  mm delikli FMT numunelerde benzer hasar mekanizmalarının gözlenmiştir.

Şekil 4.19’den genel olarak yarı küresel darbe ucu ile hasarlanan numunelerde darbe ucu batmasının düz uçla hasarlanan numunelere göre daha az ama yayvan olduğu görülmektedir. Bununla birlikte artan darbe enerjisi seviyesiyle yarı küresel darbe ucu için en üst kattaki kompozit katmanının ve alüminyum levhanın bölgesel olarak çatladığı (Şekil 4.19-a ve b), düz darbe ucunda ise kompozit ve alüminyum katlarında darbe ucu batması ile birlikte kesilme (shear-cut) hasarı olduğu belirlenmiştir (Şekil 4.19-c ve d). Son olarak, tam penetrasyon halinde yarı küresel darbe ucu için, darbe ucu batma çapının arttığı ve üst kattaki alüminyum ve kompozit katmanlarında çatlakların birleşip büyüdüğü gözlenmiştir (Şekil 4.19-a-27 J ve b-32 J). Düz darbe ucu için ise kesilme hasarının arttığı bununla birlikte darbe ucu batma çapının büyüklüğünde gözle görülür bir değişim olmadığı saptanmıştır (Şekil 4.19-c-35 J ve d-33 J).

Şekil 4.20’de  $\phi 10$  mm düz ve yarıküresel darbe uçları ile gerçekleştirilen düşük hızlı düşen ağırlık darbe deneylerine maruz kalmış yüzeyi iyileştirilmiş ve iyileştirilmemiş FMT numunelerin arka yüzeylerinde oluşan hasar mekanizmaları gösterilmiştir. Şekil 4.20’den her iki darbe ucu profili için, uygulanan darbe enerjisi seviyesindeki artış ile numunelerin arka yüzeylerinde oluşan eliptoik hasar bölgesi alanının arttığı tespit edilmiştir. Bununla birlikte numunelerde eliptoik hasar bölgesinin yarı küresel darbe ucu profilinde daha geniş bir bölgede olduğu gözlenmiştir. Numunelerin arka yüzeylerinde oluşan hasar mekanizması genellikle çekme nedenli burkulma, fiber kırılmaları, alüminyum levhanın sünmesi ve yırtılarak delinmesidir.

<p>-a- Yüzeyi iyileştirilmemiş tüm yüzeyi delikli FMT numunesi</p> <p>Yarı küresel darbe ucu</p>	 <p>12 J</p>	 <p>27 J</p>
<p>-b- Yüzeyi iyileştirilmiş tüm yüzeyi delikli FMT numunesi</p> <p>Yarı küresel darbe ucu</p>	 <p>12 J-</p>	 <p>32 J</p>
<p>-c- Yüzeyi iyileştirilmemiş tüm yüzeyi delikli FMT numunesi</p> <p>Düz darbe ucu</p>	 <p>12 J</p>	 <p>35 J</p>
<p>-d- Yüzeyi iyileştirilmiş tüm yüzeyi delikli FMT numunesi</p> <p>Düz darbe ucu</p>	 <p>12 J</p>	 <p>33 J</p>

Şekil 4.19:  $\phi 10$  mm düz ve yarıküresel darbe uçları ile gerçekleştirilen düşük hızlı düşen ağırlık darbe deneylerine maruz kalmış yüzeyi iyileştirilmiş ve iyileştirilmemiş FMT numunelerin darbe uygulanan yüzeylerinde oluşan hasar mekanizmaları

<p>-a-</p> <p>Yüzeyi iyileştirilmemiş tüm yüzeyi delikli FMT numunesi</p> <p>Yarı küresel darbe ucu</p>	<p>Darbe ucu nedeni numune arka yüzeyinde çekme nedeni burkulma</p>  <p>12 J</p>	<p>Çekme nedeni burkulma, alt kompozit kattaki fiberlerde kırılma ve alüminyum katında delinme+sünme</p>  <p>27 J</p>
<p>-b-</p> <p>Yüzeyi iyileştirilmiş tüm yüzeyi delikli FMT numunesi</p> <p>Yarı küresel darbe ucu</p>	 <p>12 J</p>	 <p>32 J</p>
<p>-c-</p> <p>Yüzeyi iyileştirilmemiş tüm yüzeyi delikli FMT numunesi</p> <p>Düz darbe ucu</p>	 <p>12 J</p>	 <p>35 J</p>
<p>-d-</p> <p>Yüzeyi iyileştirilmiş tüm yüzeyi delikli FMT numunesi</p> <p>Düz darbe ucu</p>	 <p>12 J</p>	 <p>33 J</p>

Şekil 4.20:  $\phi 10$  mm düz ve yarıküresel darbe uçları ile gerçekleştirilen düşük hızlı düşen ağırlık darbe deneylerine maruz kalmış yüzeyi iyileştirilmiş ve iyileştirilmemiş FMT numunelerin arka yüzeylerinde oluşan hasar mekanizmaları

## 4.5. Üç Nokta Eğilme, Kısa Kiriş Kayma Dayanımı ve Tabakalar arası Kayma Dayanımı (TAKD) Testleri

### 4.5.1. Cam elyaf keçe takviyeli PPS kompozitlerinin eğilme modülü ve dayanımlarının 3 nokta eğilme test yöntemi ile belirlenmesi

Sıcak pres tekniği ile üretilen cam elyaf keçe takviyeli PPS kompozitlerinin eğilme davranışları ASTM D790 standardına göre üç nokta eğilme deneyleri ile belirlenmiştir. Üç nokta eğilme testleri için eğilme dayanımı Denklem 4.1’de ifade edilmiştir [175-178];

$$\sigma = \frac{3PL}{2wb^2} \text{ (N/mm}^2\text{)} \quad (4.1)$$

Denklem 4.1’de  $\sigma$  eğilme dayanımını (N/mm<sup>2</sup>), P uygulanan kuvvet (N), L iki destek arası mesafe (mm), w numune genişliği (mm), b numune kalınlığını (mm) simgelemektedir. Tablo 4.10’da polimer matrisli kompozit malzemelerin üç nokta eğilme deneyleri sonucunda elde edilen maksimum kuvvet, eğilme dayanımı, eğilme gerinimi ve eğilme modül değerleri verilmiştir.

Tablo 4.10: Cam elyaf keçe takviyeli PPS kompozit malzemelerin üç nokta eğilme deneyleri sonucunda elde edilen maksimum kuvvet, eğilme dayanımı, eğilme gerinimi ve eğilme modüllü değerleri

Numune kodu	Maksimum kuvvet (N)	Eğilme dayanımı (N/mm <sup>2</sup> )	Eğilme gerinimi (mm)	Eğilme Modülü (N/mm <sup>2</sup> )
1	559,457	229,807	3,0701	10138,8
2	606,359	266,327	3,6250	8779,24
3	540,94	227,009	2,9870	10518,5
4	525,622	219,557	3,0352	9715,71
5	587,188	220,332	3,4729	10016,4
6	581,454	221,786	3,6492	8555,69
7	595,94	235,633	3,1572	9245
8	609,407	221,281	3,221	8431,83
9	601,381	250,419	3,168	10060
10	578,826	221,877	3,857	8092
ORT.	578,66	231,403	3,324	9355,317

Tablo 4.10'daki cam elyaf keçe takviyeli PPS kompozitin eğilme dayanımı değerlerinin ortalamasının  $231,403 \text{ N/mm}^2$  olduğu saptanmıştır. Ticona firmasının PPS polimeri için saptadığı eğilme dayanımı değerinin  $130 \text{ N/mm}^2$  olduğu hesaba katılırsa, yaklaşık %25 fiber hacim oranında cam elyaf keçe takviyesi ile PPS polimerinin eğilme dayanımının yaklaşık %78 oranında arttığı tespit edilmiştir. Tablo 4.10'dan ayrıca cam elyaf keçe takviyeli PPS kompozitin eğilme modülü değerleri incelenecek olursa, numunelerin ortalama eğilme modülleri değerinin  $9355,317 \text{ N/mm}^2$  olduğu saptanmıştır. Ticona firmasının PPS polimeri için vermiş olduğu eğilme modülü değerinin  $3900 \text{ N/mm}^2$  olduğu hesaba katılırsa yaklaşık %139'luk bir eğilme modülü artışı gözlenmiştir. Bununla birlikte cam elyaf keçe takviyeli PPS kompozit malzemenin hasara uğrayıncaya kadarki eğilme gerinimi değerinin de ortalama  $3.324$  olduğu belirlenmiştir. Tablo 4.10 incelendiğinde eğilme dayanımı değerlerinin  $266 \text{ MPa}$  ile  $219 \text{ MPa}$  arasında değiştiği gözlenmektedir. Bunun nedeninin Stokes [179,180]'un çalışmana benzer olarak cam elyaf keçe takviyeli PPS kompozit yapıdaki kırılmış cam elyaf keçe takviyesinin anizotropik olması ve homojensizlikten kaynaklandığı düşünülmektedir. Benzer dağılım eğilme modülü değerlerinde de saptanmıştır.

Sıcak pres tekniği ile üretilen cam elyaf keçe takviyeli PPS kompozitinin belirlenen eğilme dayanımı ve modül değerlerinin literatürde eğilme davranışları incelenen cam elyaf takviyeli termoplastik kompozit malzemelerle karşılaştırması yapılmıştır. Üç nokta eğilme deneyleri ile elde edilen değerlerin yeterli seviyede olup olmadığı bu sayede belirlenmiştir. Lee ve Jang [111] cam elyaf keçe takviyeli PP kompozitin değişen fiber miktarı ile mekanik özelliklerindeki değişimi incelemişlerdir. Üç nokta eğilme deneylerini ASTM D790M standardına göre gerçekleştirmişlerdir. Deney sonuçlarından cam fiber miktarı arttıkça, cam elyaf keçe/PP kompozitinin eğilme ve çekme modüllerinin arttığı, bununla birlikte yüksek cam fiber hacim oranında yüksek boşluk oluşması nedeni ile düşme yaşandığı saptanmıştır. %25 fiber hacim oranlarında eğilme modülü değerleri yaklaşık  $5 \text{ GPa}$  çıkmıştır. Kompozitin eğilme ve çekme dayanımı %15-20 fiber hacim oranına kadar artış gösterirken artan fiber hacim oranı ile kompozitin eğilme dayanımında düşüş gözlenmiştir. Bunun nedeninin zayıf fiber-matris yapışma dayanımı ve cam fiber uçlarının gerilme konsantrasyonu doğurması ile bölgesel çatlak formasyonu oluşmasından

kaynaklandığını belirtmişlerdir. Maksimum eğilme dayanımı % 18 fiber hacim oranına sahip kompozitte yaklaşık 80 MPa olduğu belirtilmiştir. Bir diğer çalışmada Jang ve Han [181] her katta cam elyaf keçe hacim oranı farklı olan cam elyaf keçe takviyeli PMMA (polimetilmetakrilat) kompozitinin mekanik özelliklerini incelemişlerdir. ASTM D790M standardına göre gerçekleştirilen üç nokta eğilme deneylerinde fiber hacim oranının artması ile eğilme modül değerlerinin arttığı, %25 fiber hacim oranı için yaklaşık olarak bu değer 7 GPa olduğu saptanmıştır. Eğilme dayanımı verileri incelendiğinde ise % 30 fiber hacim oranlarına kadar artış gözlenirken, fiber hacim oranının artırılması ile (maksimum %40) eğilme dayanımında düşüş gözlenmiştir. Maksimum eğilme dayanımı %30 fiber hacmine sahip kompozit malzemedeki yaklaşık 230 MPa olarak belirlenmiştir.

Zhao ve diğ. [182] cam elyaf keçe takviyeli termoplastik malzemelerin mikroyapısının mekanik özelliklerine etkisini incelemişlerdir. PP matrisli cam elyaf keçe takviyeli kompozitlere çekme, eğilme ve çentik darbe testleri uygulamışlardır. ASTM D790 standardına göre üç nokta eğilme deneyleri yapılmıştır. Kalınlık boyunca fiber miktarının değişimi ile eğilme özelliklerinin değişimi incelenmiştir. Eğilme dayanımı ve modülü değerlerinin kalınlık boyunca fiber miktarının dağılımı ile ciddi bir şekilde değiştiği saptanmıştır. Ağırlıkça fiber oranının artması ile eğilme dayanımı ve eğilme modülü değerlerinde artış gözlenirken, değerlerin sırasıyla yaklaşık 140 MPa ve 7300 MPa olduğu saptanmıştır.

Zhai ve diğ. [183] sürekli fiber takviyeli PPS ön emdirilmiş kumaşlerini toz emdirme tekniği ile hazırlayıp daha sonra pellet halinde kesmişlerdir. Enjeksiyon kalıplama sonrası farklı sıcaklıklarda pellet uzunluğunun, fiber miktarının ve termal ısıl işleminin kompozit malzemenin mekanik özelliklerine etkisini üç nokta eğilme, çekme ve çentik darbe testleri ile belirlemişlerdir. Üç nokta eğilme deneyleri sonucunda ağırlıkça % 40 fiber içeren 6 mm pelletle üretilen kompozit malzemenin eğilme ve çekme dayanımlarının en yüksek çıktığı saptanmıştır. Oda sıcaklığında yapılan deneylerde, 6 mm pellet ile üretilen kompozitin eğilme dayanımının yaklaşık 240 MPa, eğilme modülünün ise yaklaşık 12000 MPa olduğu belirlenmiştir. Fiber ağırlık oranının %0-50 arasında olduğu kompozit malzemelerde fiber ağırlık oranının artması ile eğilme dayanımı ve eğilme modülü değerlerinin arttığı görülmüştür. Fiber

ağırlık oranı %40 iken eğilme dayanımı ve eğilme modülü değerleri sırasıyla 230 MPa ve 12500 MPa olduğu saptanmıştır.

Gonon ve diğ. [184] cam fiberlerin yüzeylerinin iyileştirilmesi için PPS/ $\gamma$ -aminopropyltriethoxysilane karışımı kullanarak kimyasal mekanizmaların kontrolünün sağlanması ile ara yüzey modifikasyonunun geliştirilmesini açıklamışlardır. Kompozit malzemelerin mekanik özellikleri çekme, üç nokta eğilme ve çentik darbe testleri ile belirlenmiştir.  $\gamma$ -aminopropyltriethoxysilane ( $\gamma$ -APS) ile modifiye edilmiş kısa cam fiber takviyeli PPS kompozitinin eğilme dayanımı değerleri fiber hacim oranına bağlı olarak açıklanmıştır. Yapılan incelemelerde %25 fiber hacim oranına sahip kompozitlerin eğilme dayanımlarının en yüksek olduğu belirlenmiştir. Eğilme dayanımının değerin yaklaşık 240 MPa değerlerinde çıktığı, fiber hacim oranının %45'e çıkartılmasıyla bu değerin yaklaşık 235 MPa değerlerine düştüğü görülmüştür. Kısa fiberlerin ayrılma boyunca mikro çatlakların ilerlemesini azaltarak kırılma özelliklerini arttırdığı fakat bununla birlikte fiberlerin gerilme konsantrasyonuna sebep olan fiber uçlarında mikro kusurlara yol açtığı belirlenmiştir. Sonuç olarak, yüksek fiber hacim oranlarında fiber uçlarının etkisi ana olay olarak ortaya çıkmaktadır.

Jang ve Kim [185] cam fiber takviyeli PPS kompozitinin mekanik özelliklerini iyileştirmek için cam fiber yüzeylerini iki farklı silan bağlama ajanı ile kaplamışlardır. Silan bağlama ajanlarının cam fiber yüzeyindeki konsantrasyon oranına göre mekanik özelliklerdeki değişim incelenmiştir. Gerçekleştirilen üç nokta eğilme deneylerinde Her iki bağlama ajanı ile (RC-2 silan bağlama ajanı ve Styryl silan bağlama ajanı) yüzeyi iyileştirilmiş cam fiber takviyeli PPS kompozitin eğilme dayanımının fiber yüzeyindeki silan konsantrasyonunun ağırlıkça % 0.4'e kadar artması ile arttığı saptanmıştır. RC-2 silan bağlama ajanı ile modifiye edilen cam fiber takviyeli PPS kompozitin maksimum eğilme dayanımı 490 MPa çıkarken, Styryl silan bağlama ajanı ile modifiye edilen cam fiber takviyeli PPS kompozitinin maksimum eğilme dayanımı 330 MPa olarak çıkmıştır. Düşük silan bağlama ajanı konsantrasyonlarda ise eğilme dayanım değerlerinin RC-2 silan bağlama ajanı için 380 MPa, Styryl silan bağlama ajanı için ise 230 MPa olduğu belirlenmiştir. Gerçekleştirilen detaylı literatür araştırması ile sıcak pres tekniği ile üretilen cam



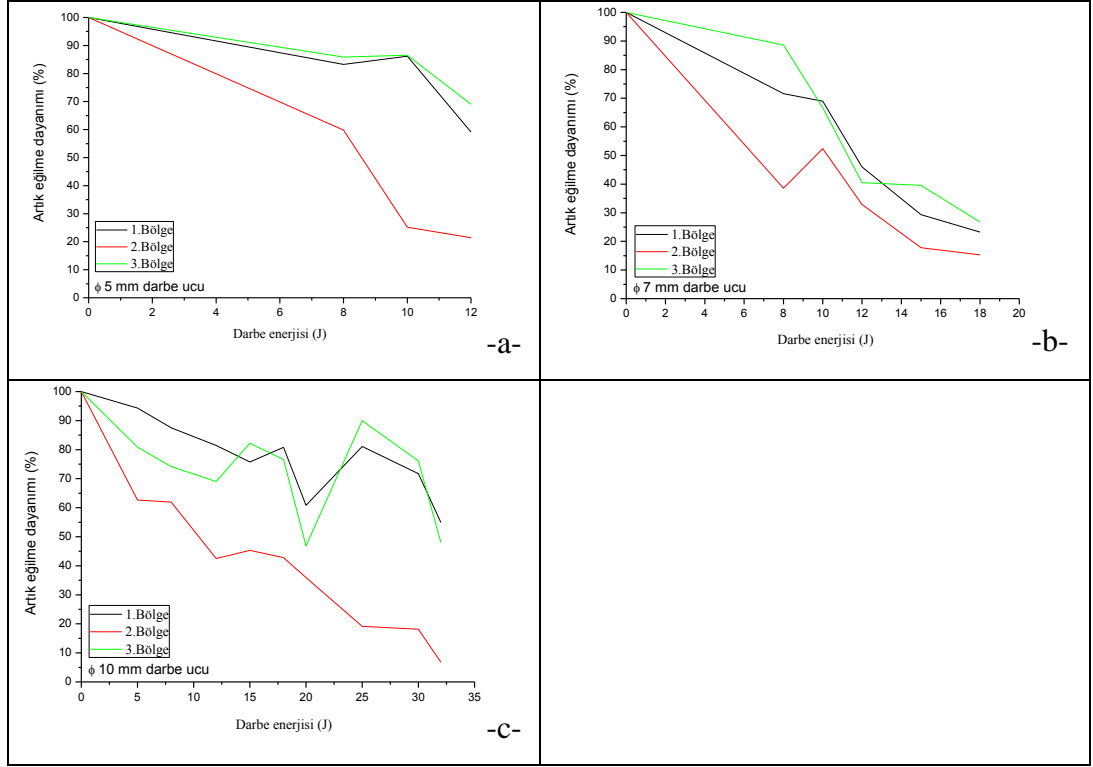
elyaf keçe takviyeli PPS kompozitinin eğilme dayanımı ve eğilme modülü değerlerinin yeterli olduğu saptanmıştır.

#### **4.5.2. Darbe yüklemesine maruz kalmış cam elyaf keçe takviyeli PPS kompozitlerin artık eğilme modülü ve dayanımlarının üç nokta eğilme test yöntemi ile belirlenmesi ve darbe yüklemesine maruz kalmamış numunelerle karşılaştırılması**

Rüzgar türbinleri, robot kolları ve transmisyon aksları gibi kompozit tabakalardan üretilen çoğu yapısal bileşen eğilme momenti ve kayma kuvvetlerine yol açan düzlem dışı yüklemelere maruz kalmaktadır ve bu bileşenler kirişler gibi analiz edilebilir. Bu yüklemeler dinamik olabilir, örneğin bu yapılar montaj ve bakım esnasında veya hizmet süresince darbe yüklemesine maruz kalabilmektedirler [186]. Kompozit malzemelerin düşük hızlı darbe yüklemesine karşı hassasiyeti havacılık uygulamalarında tasarım uygunluğuna etki eden ana etkilerden birisidir. Düşük hızlı enerji seviyelerinde gözle zorlukla görülebilen hasarların oluştuğu, kayda değer dayanım kayıplarını arttırdığı saptandığından beri, darbe parametreleri, hasar tipleri ve gelişimi, ve darbe sonrası artık dayanım değeri arasındaki ilişkilerin belirlenmesi için bir çok araştırma gerçekleştirilmiştir [61]. Kompozit yapılara uygulanan darbeler iç hasara yol açabilirki buda yapının dayanımını kayda değer bir şekilde azaltır. Bu çeşit darbelerin çalışılması yapıdaki artık dayanımın belirlenmesi, oluşan hasarın gelişiminin saptanması ve olayın dinamiklerini anlamayı gerektirmektedir [187]. Yapılan literatür incelemesinden, düşük hızlı darbe yüklemesi sonrası kompozit malzemelerdeki artık dayanımın belirlenmesinde genelde darbe sonrası basma testi [188-193] uygulandığı saptanmıştır. Bazı çalışmalarda ise [194-196] darbe sonrası eğilme testi uygulanarak kompozit malzemelerdeki artık dayanım belirlenmiştir. Doktora çalışması kapsamında düşük hızlı düşen ağırlık darbe yüklemesine maruz bırakılmış cam elyaf keçe takviyeli PPS kompozit numunelerinin artık eğilme dayanımları ve eğilme modülleri belirlenerek darbe ucu çapı ve darbe ucu şekline göre ilişkilendirilmiştir.

Bölüm 4.5.1’de darbe yüklemesine maruz bırakılmamış cam elyaf keçe takviyeli PPS kompozit numunelerin eğilme dayanımı değerinin  $231.4028 \text{ N/mm}^2$  ve eğilme

modülü değerinin ise 9355.317 N/mm<sup>2</sup> olduğu belirtilmiştir. Saptanan değerler hesaba katılarak darbe yüklemesi uygulanmış polimer matrisli kompozit numunelere üç nokta eğilme deneyi uygulanmıştır. Şekil 4.21’de farklı çaptaki düz darbe uçları ile hasarlanmış numunelerin Şekil 3.8’de belirtildiği gibi 3 farklı bölgesindeki artık eğilme dayanımı değerlerinin uygulanan darbe enerjisi ile ilişkisi gösterilmiştir.

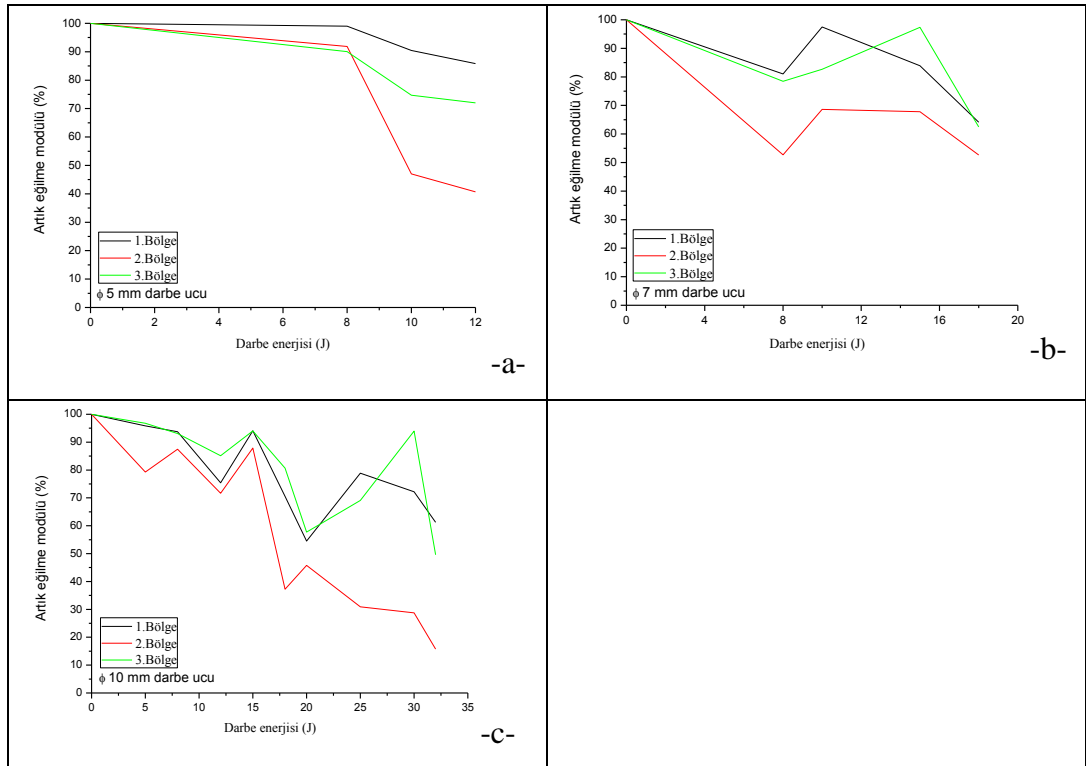


Şekil 4.21: Farklı çaptaki düz darbe uçları ile hasarlanmış numunelerin 3 farklı bölgesindeki artık eğilme dayanımı değerlerinin uygulanan darbe enerjisi ile ilişkisi

Şekil 4.21’den her darbe ucu için artan darbe enerjisi ile belirtilen her üç bölge için artık eğilme dayanımı değerlerinin Zhang ve Richardson [195]’in çalışmasına benzer olarak düştüğü, tam penetrasyon halinde ise artan darbe ucu çapı ile artık eğilme dayanımının %20’lerden (Şekil 4.21-a) %7’lere düştüğü (Şekil 4.21-c) saptanmıştır. Şekil 4.21’den ayrıca numunelerin 1. ve 3.bölgelerindeki artık eğilme dayanımı değerlerinin yaklaşık aynı olduğu, bununla birlikte numunelerin 2.bölgesinde darbe yüklemesi nedeni matris çatlaması, delaminasyon ve fiber kırılması gibi hasarlanmaların yoğunluğunun fazla olması nedeniyle artık eğilme dayanımı değerlerinin en düşük çıktığı belirlenmiştir. Her darbe ucu için numunelerin bölgesel olarak hasarlandığı ve hasar bölgesinin genellikle 2.bölgede toplandığı görülmüştür. Şekil 4.21-b’de φ7 mm çaplı darbe ucu ile hasarlanmış numunelerde ise 2.bölgedeki

artık eğilme dayanımının düşük olması ile birlikte 1. ve 3. bölgelerdeki değerlerinde yakın olduğu saptanmıştır. Bunun nedeninin üretilen numuneden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Şekil 4.22’de farklı çaptaki düz darbe uçları ile hasarlanmış numunelerin 3 farklı bölgesindeki artık eğilme modülü değerlerinin uygulanan darbe enerjisi ile ilişkisi belirtilmiştir.



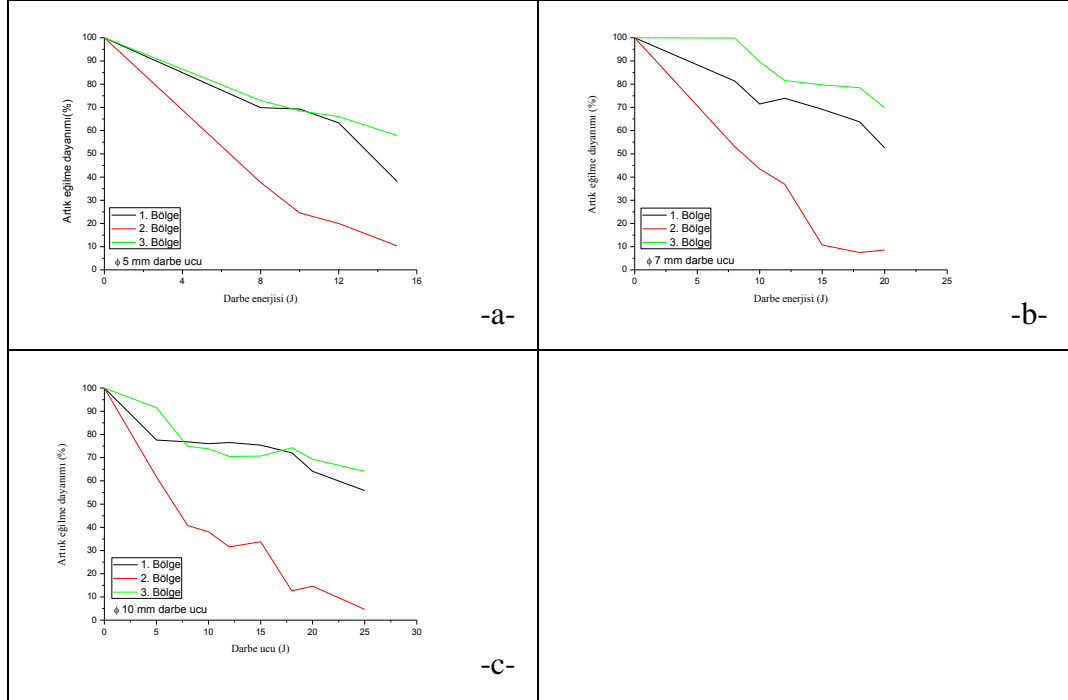
Şekil 4.22: Farklı çaptaki darbe uçları ile hasarlanmış numunelerin 3 farklı bölgesindeki artık eğilme modülü değerlerinin uygulanan darbe enerjisi ile ilişkisi

Şekil 4.22’de belirtilen artık eğilme modülü değerleri ile darbe enerjisi arasındaki ilişkinin artık eğilme dayanımı/darbe enerjisi değerleri ile benzerlik gösterdiği saptanmıştır. Şekil 4.22’den 2.bölgede artık eğilme modülü değerlerinin en düşük çıktığı bununla birlikte darbe enerji seviyesi arttıkça modül değerlerinde azalma olduğu görülmüştür. Artık eğilme dayanımı değerlerine göre eğilme modül değerlerindeki azalmanın daha az olduğu, tam penetrasyon halinde ise 2. bölgedeki artık eğilme modülü değerlerinin sırasıyla %60, %48 ve %85 oranlarında düştüğü belirlenmiştir. Darbe uç çapının artması ile eğilme modülü değerlerinin düştüğü bununla birlikte artan darbe ucu çapı ile numunelerin hasarlandığı bölgenin alanının

arttığı saptanmıştır. Artan hasarlanma bölgesi alanı nedeni ile numunelerin 1. ve 3. bölgesindeki eğilme modülü değerlerinde düştüğü gözlemlenmiştir. Darbeye maruz bırakılmış numunelerin 1. ve 3. bölgeleri incelendiğinde,  $\phi 5$  mm darbe ucu ile hasarlanan numunelerin tam penetrasyon hasarı halinde eğilme modülü değerlerinde %10-30'luk bir düşüş gözlenirken (Şekil 4.22-a),  $\phi 7$  ve  $\phi 10$  mm darbe uçları ile hasarlanan numunelerde ise eğilme modülü değerlerinin sırasıyla yaklaşık olarak %30 (Şekil 4.22-b) ve %50 oranında (Şekil 4.22-c) düştüğü belirlenmiştir.

Şekil 4.23'te farklı çaptaki yarı küresel darbe uçları ile hasarlanmış numunelerin 3 farklı bölgesindeki artık eğilme dayanımı değerlerinin uygulanan darbe enerjisi ile ilişkisi belirtilmiştir. Genel olarak artan darbe ucu ile numunenin tam penetrasyon halinde 2.bölgesindeki artık eğilme dayanımı değerlerinin  $\phi 5$  mm darbe ucu için yaklaşık %10 (Şekil 4.23-a),  $\phi 7$  mm darbe ucu için yaklaşık %7 (Şekil 4.23-b) ve  $\phi 10$  mm darbe ucu için yaklaşık %3'e (Şekil 4.23-c) kadar azaldığı saptanmıştır. Bunun nedeninin artan darbe ucu çapı ile hasarlanan bölgenin numunenin genişliğine yaklaşması nedeniyle olduğu düşünülmektedir. Farklı çaptaki düz darbe uçları ile hasarlanmış polimer matrisli kompozit numunelerin 2.bölgesindeki artık eğilme dayanımları ile karşılaştırma yapılacak olursa yarı küresel darbe uçları ile hasarlanmış numunelerin artık eğilme dayanımı değerlerinin daha düşük çıktığı belirlenmiştir. Düz darbe uçları ile hasarlanan numunelerde hasar bölgesinin yaklaşık olarak darbe ucu çapı kadar olması ve bununda artık eğilme dayanımı değerlerini yarı küresel darbe uçları ile hasarlanmış numunelerinkinden daha yüksek çıkmasına neden olduğu gözlemlenmiştir. Tabakalı kompozit yapılarda darbe hasarı çok karmaşıktır. Darbe davranışı durumunda, darbe parçalarının karakteristiklerine bağlı olarak bölgesel (temas yeri), büyük ölçekte (yapısal) yada her iki şekilde hasar oluşmaktadır. Bölgesel darbe hasarında genelde matris ve fiber ezilmelerinin olduğu temas bölgesinde gözle görülen kalıcı delinme gözlenirken global darbe hasarında görülemeyen aşırı delaminasyonlar oluşmaktadır. Bu hasar tiplerinin yanında bölgesel yada büyük ölçekteki hasarlanmalarda matris ve fiber çatlama da oluşmaktadır. Bazı durumlarda her iki hasar tipi birleşerek daha ciddi hasarlanma durumu ortaya çıkar. Ayrıca, darbe sonrası numuneye uygulanan yüklemeye tipine bağlı olarak yapısal bozunmanın farklı olacağı belirtilmiştir. Örneğin, temas bölgesindeki fiber kırılmalarının numunenin artık çekme dayanımını ciddi bir şekilde

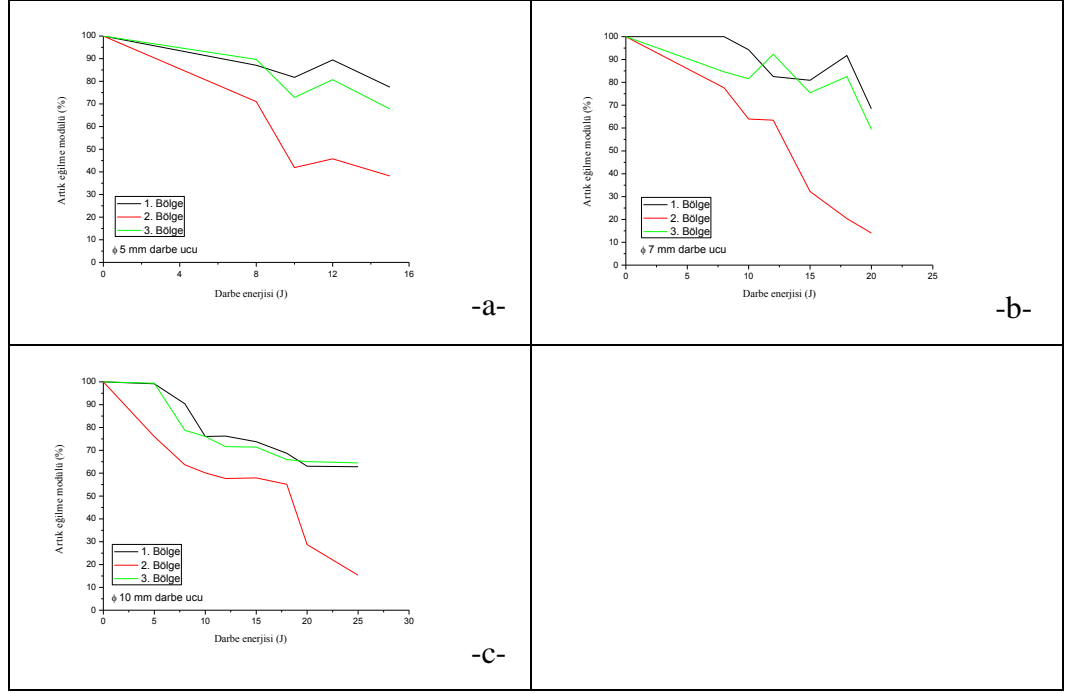
düşürdüğü, fakat artık basma dayanımını az miktarda etkilediği saptanmıştır. Bununla birlikte delaminasyon hasarının zıt etki yaptığı belirlenmiştir [197].



Şekil 4.23: Farklı çaptaki yarı küresel darbe uçları ile hasarlanmış numunelerin 3 farklı bölgesindeki artık eğilme dayanımı değerlerinin uygulanan darbe enerjisi ile ilişkisi

Şekil 4.23'den ayrıca her darbe ucu çapı için, artan darbe enerjisi ile artık eğilme dayanımı değerlerinin her üç bölge içinde azaldığı görülmektedir. Artan darbe enerjisi ile polimer matrisli kompozit numuneler daha fazla enerji absorbe ettikleri ve absorbe edilen enerjilerinde numune içinde darbe hasarlanmasına yol açarak artık eğilme dayanımının azalmasına neden olduğu belirlenmiştir. Darbe hasarlı polimer matrisli kompozit numunelerin 1. ve 3. bölgeleri incelendiğinde yaklaşık olarak aynı dayanım değerleri gösterdiği buda darbe enerjisinin numuneye yaklaşık eşit dağıldığını göstermektedir. φ5 mm darbe ucu hariç diğer darbe uçları için artan darbe ucu çapı ile numunenin tam penetrasyona uğradığı darbe enerjisinde artık eğilme dayanımı değerlerinin 1. ve 3. bölge için azaldığı gözlemlenmiştir (Şekil 4.23-b ve c).

Farklı çaptaki yarı küresel darbe uçları ile hasarlanmış numunelerin 3 farklı bölgesindeki artık eğilme modülü değerlerinin uygulanan darbe enerjisi ile ilişkisi Şekil 4.24'te gösterilmiştir.



Şekil 4.24: Farklı çaptaki yarı küresel darbe uçları ile hasarlanmış numunelerin 3 farklı bölgesindeki artık eğilme modülü değerlerinin uygulanan darbe enerjisi ile ilişkisi

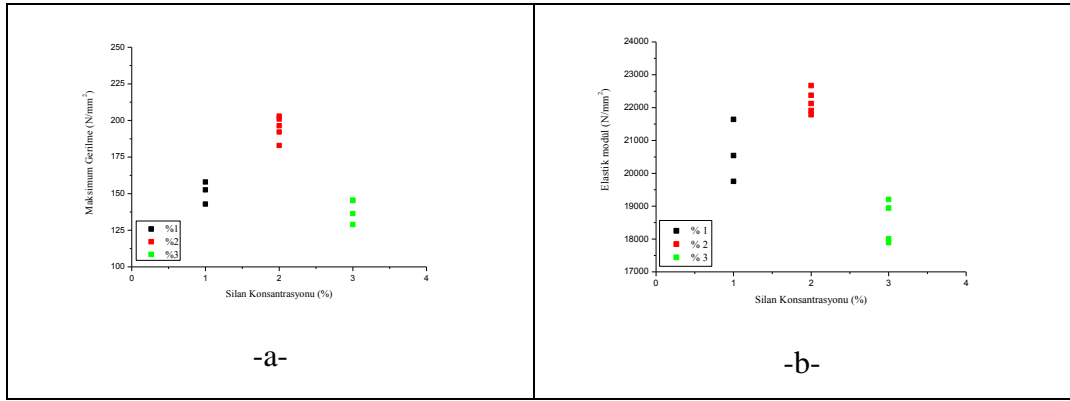
Şekil 4.24'ten her üç yarı küresel darbe ucu ile hasarlanmış numuneler için artık eğilme modülü değerlerinin artık eğilme dayanımı değerlerine göre daha az azaldığı tespit edilmiştir. Zhang ve Richardson [195]'in çalışmasında belirtildiği gibi, çoğu durumda darbe hasarının bölgesel olduğu ve bu yüzden modül değeri gibi global özelliklerin daha az etkilendiği saptanmıştır. Özellikle Şekil 4.22'de gösterilen düz uçlar ile darbe yüklemesine maruz kalmış numunelerin artık eğilme modülü değerlerinin yarı küresel uçlarla hasarlanmış numunelere göre daha yüksek çıkmasının nedeni bu şekilde açıklanmaktadır. Tam penetrasyon halinde darbe ucunun artması ile artık eğilme modülü değerlerinin Şekil 4.23'te belirtilen artık eğilme dayanımı değerleri gibi azaldığı ve saptanan azalmaların maksimum numunelerin 2. bölgesinde olduğu gözlenmiştir.

Numunelerin ikinci bölgeleri incelenecek olursa tam penetrasyon halinde  $\phi 5$  mm darbe ucu için yaklaşık %40 (Şekil 4.24-a),  $\phi 7$  mm darbe ucu için yaklaşık %15 (Şekil 4.24-b) ve  $\phi 10$  mm darbe ucu için yaklaşık %14'e (Şekil 4.24-c) kadar azaldığı saptanmıştır. 1. ve 3. bölgelerde ise artık eğilme modül değerlerinin yaklaşık eşit çıktığı belirlenmiştir.

#### **4.5.3. Ağırlıkça yüzde silan konsantrasyonun metal/cam elyaf keçe+PPS matris arayüzey dayanımına etkisini belirleyebilmek için üç nokta eğilme, kısa kiriş kayma dayanımı ve TAKD testlerinin gerçekleştirilmesi**

Fiber metal tabakaları (FMT) metal alaşımları ve fiber takviyeli polimer matrisin belli bir düzende yerleştirilmesi ile oluşturulan katmanlı sistemlerdir. Fiber metal tabakaları kompozitlerin spesifik dayanımı, rijitliği ve yorulma özellikleri ile metallerin ileri seviyedeki işlenebilirliği ve tokluğu gibi özelliklerinin birleşimini içermektedir. Geleneksel havacılık malzemelerine kıyasla fiber metal tabakaları üstün yapısal özellikler sunmaktadır [198]. Günümüzde, havacılık uygulamalarında termoset ve termoplastik bazlı ön emdirilmiş kumaşlar ile havacılık sektörüne uygun alüminyum ve titanyum gibi metaller seçilerek üretilen fiber metal tabakaları kullanılmaktadır. Fiber metal tabakaların üstün performansı deniz taşımacılığı ve kara taşımacılığı endüstrilerinde tercih sebebi olmakla birlikte, yüksek performanslı metallerin ve kompozit ön emdirilmiş kumaşların yüksek maliyetli oluşu nedeni ile çekiciliğini kaybetmektedir [199]. Mikro kavitsiyonlar, hava inklüzyonları, delaminasyonlar gibi kusurlar fiber takviyeli kompozit yapıların içerisinde var olan veya oluşan ortak hasar biçimleri olup numunelerin kalıcı hasarlanmasına yol açmaktadırlar. Malzemelerin ara yüzeylerindeki kusurların başlaması homojen olmayan malzemelerde daha yaygındır. Gerçekte, birleştirilen malzemelerin uyumluluğuna bağlı olarak, malzemenin ara yüzeyleri (mikro-ölçekte veya orta-ölçekte) genellikle yapının çalışma ömrünün başlangıç safhalarında veya bakım sürecinde hasar başlangıcı oluşumunda en zayıf bölgelerdir. Orta-ölçekli geometrik bir seviyede, hasarın yükleme tipine bağlı olarak oluşan tabakalar arası dayanımla, farklı mekanik, malzeme veya geometrik özelliklerle birlikte komşu tabakalar arasındaki tabakalar arası delaminasyonlar şeklinde oluştuğu belirtilmiştir [73]. Fiber metal tabakalı kompozit üretiminde en önemli adım metal takviye elemanı ile fiber/matris takviyesi arasındaki yapışmanın iyi bir şekilde sağlanıp dayanıklı bir ara yüzey oluşturmaktır. Üretimi gerçekleştirilen fiber metal tabakalı kompozitinin ara yüzey dayanımının belirlenebilmesi için literatürde tekil konsol kiriş metodu (TKK) [62, 72, 198, 199, 200], çift konsol kiriş metodu (ÇKK) [122], tabakalar arası kayma dayanımı testi (TAKD) [69,122], dört nokta eğilme deneyi [62], üç nokta eğilme deneyi [79], Iosipescu kayma testi [75] ve crack tip opening measurement (CTOD)

testi [201] uygulanmıştır. Çalışma kapsamında Bölüm 3.3'te belirtilen yüzey iyileştirme adımlarından ağırlıkça yüzde silan oranının (%1,%2 ve %3) üretilen FMT malzemelerin metal/cam elyaf-matris ara yüzey dayanımına etkisinin belirlenebilmesi için üç nokta eğilme, TAKD ve kısa kiriş kayma dayanımı testleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.25'te üç nokta eğilme deney sonuçlarının ağırlıkça yüzde silan oranına göre değişimi gösterilmiştir.



Şekil 4.25: Üç nokta eğilme testi sonuçlarından yüzde silan oranı/eğilme dayanımı ve yüzde silan oranı/eğilme modülü değerleri

Şekil 4.25-a ve b'den ağırlıkça % 2 silan konsantrasyonu aşıldığında FMT numunelerin dayanım ve modül değerlerinde azalma yaşandığı gözlenmiştir. Literatür çalışmaları incelendiğinde, Abel ve diğ. [202] alüminyum alaşımı ile sertleştirilmiş epoksi adhezifi arasındaki yapışmanın sağlanabilmesi için hacimce % 0.1-12 arasında  $\gamma$ -GPS silanı kullanmışlardır. ASTM D 3762-79 standardına uygun olarak Boing kama bağlantısı (Boeing wedge joint) yapılarak ara yüzey dayanımı test edilmiştir. Gerçekleştirilen çalışmalarda hacimce %1 silanlı numunelerin dayanımının en yüksek çıktığı belirlenmiştir. Chen ve diğ. [203]'nin çalışmasında maleik anhidrit ile modifiye edilmiş polipropilen ve alüminyum levhaları arasındaki kayma dayanımına  $\gamma$ -APS silan konsantrasyonunun etkisi incelenmiş ve %3  $\gamma$ -APS katkısı ile maksimum dayanım gözlenmiştir. Deflorian ve diğ. [204]. alüminyum ve bakır malzemelerinin yüzeylerinin iyileştirmesi için ağırlıkça % 1.5  $\gamma$ -GPS silanı kullanmışlardır. Doktora çalışması kapsamında gerçekleştirilen çalışmalarda FMT numuneleri için maksimum dayanım değerlerinin ağırlıkça %2  $\gamma$ -GPS silan katkısı ile sağlandığı saptanmıştır (Şekil 4.25). %2 silan konsantrasyonu ile yüzey iyileştirmesi yapılan FMT malzemelerin eğilme dayanımı değerlerinin literatürde



yapılan çalışmalarda elde edilen sonuçlar ile karşılaştırma yapılacak olursa, Carrillo ve Cantwell [62] (Al, 0°/90°)<sub>s</sub> ve (Al, ±45)<sub>s</sub> dizilimli PP fiber takviyeli metal tabakalı kompozitlerine ASTM D790-80 standardına göre dört nokta eğilme deneyleri uygulamışlardır. Gerçekleştirilen çalışmalarda elde edilen sonuçlardan her iki dizilim içinde maksimum eğilme dayanımı değerlerinin 160 MPa olduğu belirlenmiştir. Khalili ve diğ. [79] 90° oryantasyonlu cam elyaf ve alüminyum takviyeli epoksi kompozitlerine ASTM D790M-93 standardına göre üç nokta eğilme deneyi uygulamışlardır. Sonuçlardan maksimum eğilme dayanımı değerinin 336.8 MPa ve maksimum eğilme modülü değerinin 27990.2 MPa olduğu saptanmıştır. Her iki çalışma incelendiğinde Doktora çalışması kapsamında üretilen FMT numunenin takviye elemanı olarak seçilen cam elyaf keçe nedeniyle maksimum eğilme dayanımı ve modülü değerlerinin % 2 silan konsantrasyonu için sırasıyla yaklaşık 195.06 MPa ve 20929.22 MPa olduğu belirlenmiştir. Üretilen fiber metal tabakalı kompozitlerin eğilme dayanımı değerlerinin yeterli olduğu düşünülmektedir. Ağırlıkça silan konsantrasyonunun FMT numunelerin ara yüzey dayanıma etkisini belirlemek amacı ile üç nokta eğilme testleri yanında kısa kiriş kayma dayanımı ve TAKD testleri de uygulanmıştır. Deneyler sonucunda elde edilen maksimum kuvvet ve maksimum kayma gerilmesi değerlerinin ağırlıkça yüzde silan oranına göre değişimi Tablo 4.11’de TAKD deneyi için, Tablo 4.12’de ise kısa kiriş dayanımı deneyi için gösterilmiştir.

Tablo 4.11: TAKD testleri sonucunda elde edilen veriler

% Silan Konsantrasyonu.	Numune kodu	Maksimum Kuvvet (N)	Maksimum Kayma Gerilmesi (N/mm <sup>2</sup> )
% 1	1	489,256	9,173
	2	407,565	7,6418
	3	511,807	9,5963
	4	376,585	7,0609
% 2	1	1031,62	19,342
	2	1090,43	20,445
	3	952,524	17,859
	4	1023,52	19,191
% 3	1	809,747	15,182
	2	735,931	13,798
	3	734,342	13,768
	4	780,656	14,637

Tablo 4.12: Kısa kırış kayma dayanımı testleri sonucunda elde edilen veriler

% Silan Konsantrasyonu.	Numune kodu	Maksimum Kuvvet (N)	Maksimum Kayma Gerilmesi (N/mm <sup>2</sup> )
% 1	1	709,125	13,296
	2	717,506	13,453
	3	755,484	14,165
	4	733,302	13,749
	5	652,011	12,225
% 2	1	1258,231	23,591
	2	1258,883	23,604
	3	1207,106	22,633
	4	1332,87	24,99
	5	1084,615	20,336
% 3	1	722,095	13,539
	2	623,492	11,690
	3	749,65	14,055
	4	713,512	13,378
	5	782,472	14,671

Tablo 4.11 ve 4.12'den her iki test yöntemi içinde FMT numuneleri için ara yüzey dayanımının maksimum %2 silan konsantrasyonunda olduğu belirlenmiştir. Gerçekleştirilen her iki deneyde saptanan optimum dayanım değerlerinin üç nokta eğilme deney sonuçları ile örtüştüğü görülmüştür. Tablo 4.11'den, %1 silan takviyesinde maksimum kuvvet değerlerinin ortalama 446,30 N olurken, artan silan oranı ile, %2, maksimum kuvvet değerlerinin ortalama 1024,52 N'a yükseldiği gözlemlenmiştir. Silan oranının artırılması ile maksimum kuvvet değerlerinin 765,16 N'a düştüğü belirlenmiştir (Tablo 4.11). Tablo 4.11 ve 4.12'de FMT numuneler için saptanan maksimum kayma gerilmesi değerleri 4.2 nolu denkleme [205] göre hesaplanmıştır.

$$\tau = 3.P/4.b.h \quad (4.2)$$

4.2 nolu denklemde  $\tau$  tabakalar arası kayma gerilmesi, P maksimum yük, b numune genişliği ve h numune kalınlığını simgelemektedir. Tablo 4.11 ve 4.12'de gösterildiği gibi tabakalar arası kayma gerilmesi değerlerinin ve maksimum kuvvet değerlerinin maksimum % 2 silan konsantrasyonunda elde edildiği saptanmıştır. Chen ve diğ.

[203] çalışmalarına benzer olarak, düşük silan konsantrasyonlarında hidrolize olmuş  $\gamma$ -GPS moleküllerinin az miktarı alüminyum levha yüzeyi tarafından absorbe edilmiş ve moleküller arasındaki zincir ağı oluşturulamamıştır.  $\gamma$ -GPS solüsyonunun konsantrasyonu artırıldığında alüminyum yüzeyine daha fazla hidrolize olmuş  $\gamma$ -GPS molekülleri tutunarak yüzeyde moleküller arasında zincir ağı oluşturulabilmiştir. Daha yüksek konsantrasyonlarda ise (%2'den fazla), hidrolize olmuş  $\gamma$ -GPS molekülleri ile alüminyum levha yüzeylerinin doyurulmasından sonra, hidrolize olmuş  $\gamma$ -GPS molekülleri alüminyum tarafından absorbe edilen  $\gamma$ -GPS moleküllerinin yüzeyleri üzerine fiziksel olarak yerleşmektedirler. Oluşan bu fiziksel  $\gamma$ -GPS katmanı kimyasal olarak alüminyum ile bağlanmış  $\gamma$ -GPS katının etkileşimini önleyerek dayanım değerlerini düşürdüğü düşünülmektedir. Tablo 4.12'de ise maksimum kuvvet değerlerinin %1 için ortalama 713.48 N olduğu tabakalar arası kayma deneyine benzer olarak %2 silan konsantrasyonunda ortalama 1228.32 N değerine yükseldiği gözlenmiştir. Artan silan oranı ile ,% 3, ortalama maksimum kuvvet değerinin 718.24 N olduğu saptanmıştır. Tabakalar arası kayma dayanımının belirlenmesi için yapılan TAKD ve kısa kiriş kayma dayanımı testlerinden elde edilen sonuçların yeterli olup olmadığının saptanması için gerçekleştirilen literatür çalışmasında, Botelho ve diğ. [205] sürekli fiber/epoksi alüminyum kompozitlerine ASTM D2344 standardına uygun olarak TAKD testi uygulamışlardır. Elde edilen sonuçlardan maksimum kuvvet değerinin GLARE (Cam elyaf/epoksi) kompoziti için  $755 \pm 68$  N olduğu, kayma gerilmesinin ise  $40.9 \pm 4.10$  MPa olduğu belirtilmiştir. Lawcock ve diğ. [122] karbon fiber takviyeli metal tabakaların mekanik özelliklerine ara yüzeyin etkisini incelemiştirler. İki farklı yüzey iyileştirmesi uygulanan fiber metal tabakalı kompozitlerin ara yüzey dayanımı TAKD test metoduyla üç ve beş nokta eğilme testleri ile yapılmıştır. Üç nokta eğilme testleri için, iki farklı yüzey iyileştirmesi için maksimum kuvvet değerlerinin sırasıyla yaklaşık 650 N ve 950 N olduğu, tabakalar arası kayma gerilmesinin ise sırasıyla 10.52 MPa ve 11.41 MPa çıktığı saptanmıştır. Doktora çalışması kapsamında üretilen ağırlıca %2 silan ile yüzeyi iyileştirilmiş fiber metal tabakalı kompozitlerin TAKD testlerinden elde edilen kayma gerilmesi değerinin ortalama  $19.21 \text{ N/mm}^2$  , kısa kiriş kayma dayanımı deneyi için ise  $23.03 \text{ N/mm}^2$  olduğu belirlenmiştir. Maksimum kuvvet değerlerinde sırasıyla 1024.52 N ve 1228.32 N

olduğu saptanmıştır. Elde edilen veriler ışığında üretilen fiber metal tabakalı kompozitinin yeterli ara yüzey dayanımına sahip olduğu düşünülmektedir.

**4.5.4. Ağırlıkça yüzde silan konsantrasyonunun belirlenmesinden sonra ( $\phi 3$  mm,  $\phi 4$  mm ve  $\phi 5$  mm) delik çaplarında 3 farklı TDA/KA (Toplam Delik Alanı/Kapalı Alan) oranında matkapla delinmiş alüminyum levhalar içeren fiber metal tabakalı kompozitlerin mekanik birleştirme+adhezif yapışma bağlantı dayanımlarının üç nokta eğilme testleri ile belirlenmesi**

Uçağın montajı esnasında uçağı oluşturan parçaların yerleştirilmesinde, parçaların birbirine yapıştırılması, parçaların delinerek cıvatalı yada pim bağlantılarının yapılması gibi bağlantı çeşitleri kullanılmaktadır. Perçinli ve cıvatalı bağlantılar havacılık uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır ve bu yüzden GLARE bağlantısının yük taşıması davranışının anlaşılması özellikle yük taşıması hasarı için tasarıma bakış açısı vermesi için önem arz etmektedir [206]. Bir uçakta, geometrik çentikler tasarımcı tarafından yok edilemez. İdeal çentiksiz yapı birçok cam, kapı, kapak ve binlerce perçin deliği nedeni ile bozulmaktadır [29]. Tüm bu süreksizlikler çentiğin etrafında gerilme konsantrasyonuna sebep olmaktadır ve malzeme üzerinden geçen gerilme akışını bozmaktadır. Çoğu fiber takviyeli kompozit malzemelerde olduğu gibi GLARE veya ARALL malzemelerinde de tekil alüminyum alaşımlarına göre yüksek oranda çentiğe duyarlı oldukları saptanmıştır [29]. Literatürde gerçekleştirilen çalışmalarda fiber metal tabakalı kompozit üretimde sürekli cam elyaf, karbon elyaf yada aramid elyaf kullanıldığı gözlemlenmektedir. Doktora çalışması kapsamında üretilen FMT malzemelerde ise takviye elemanı olarak cam elyaf keçe seçilmiştir. Cam elyaf keçeyi oluşturan fiberlerin kısa fiber oluşu ve sıcak pres tekniği ile üretimde basınç ile istenilen boşluklara rahatlıkla dolabilmesi nedeni ile birleştirilmek istenen metal/cam elyaf-matrisin ara yüzeyinin yapışmasını mekanik olarak oluşturabileceği düşünülmüştür. Bu bağlamda üretilmesi hedeflenen uçak parçalarının montajında delik delinmesinin yarattığı çentik etkisinin negatif etkisini kısa fiber takviyesi ile avantaja dönüştürülmek istenmiştir. Açılması hedeflenen deliklere kısa fiber demetlerinin girmesi ile metal/fiber-matris ara yüzeyinin alüminyuma yapılan yüzey iyileştirmelerle kuvvetlendirilmesi yanında mekanik olarakta bağlanma sağlanması hedeflenmiştir. Bu bağlamda Bölüm 3.6'daki

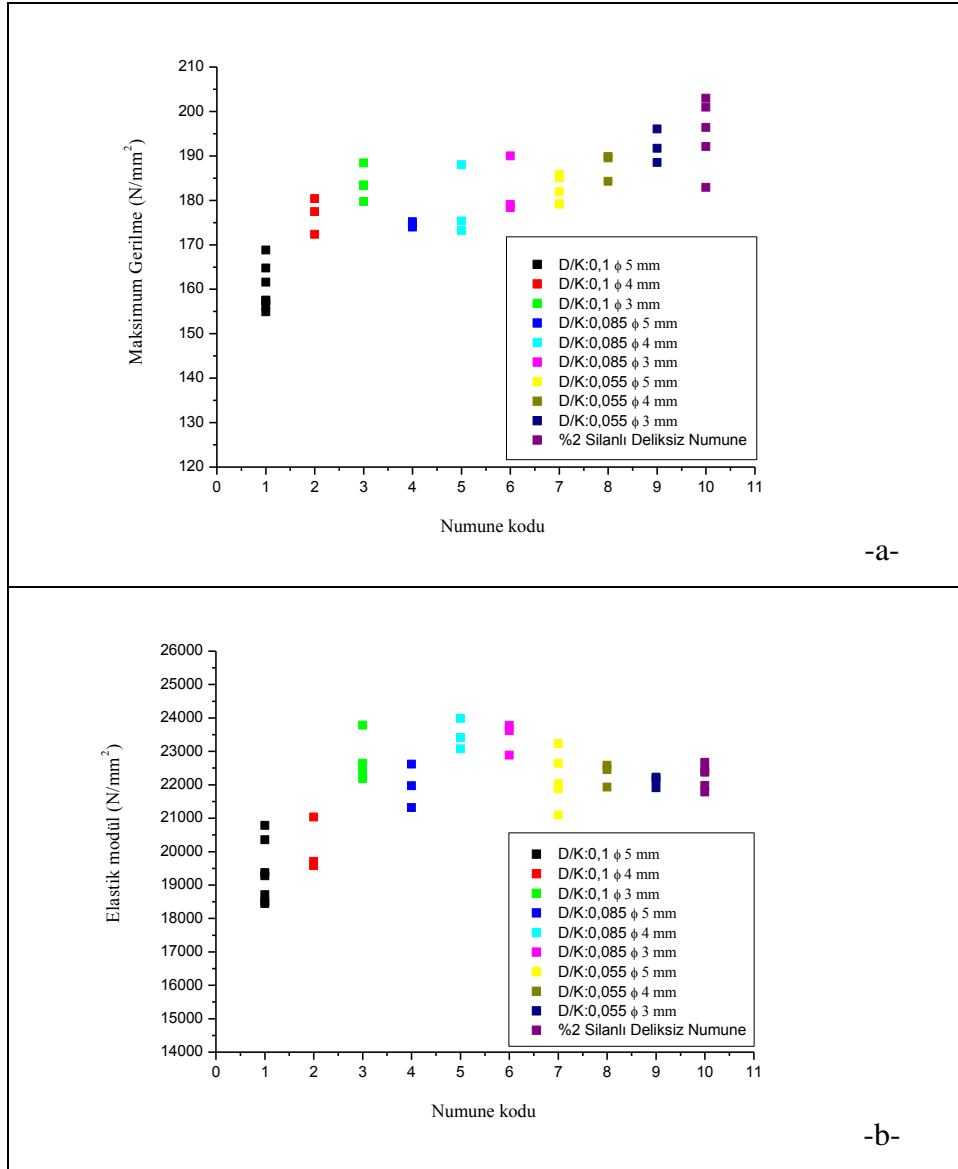
Şekil 3.9’da belirtilen yüzey iyileştirmeler uygulanmadan önce alüminyum levha yüzeylerine  $\phi 3$  mm,  $\phi 4$  mm ve  $\phi 5$  mm çaplı delikler açılmıştır. Şekil 3.9’da belirtilen şekilde deliklerin alüminyum levha yüzeylerinde açılmasından sonra Bölüm 3.3’teki Tablo 3.7’da belirtilen yüzey işlemleri uygulanmıştır. Optimum silan konsantrasyonunun üç nokta eğilme, TAKD ve kısa kiriş kayma dayanımı testleri ile ağırlıkça %2 olarak belirlenmesinden sonra delikli FMT numunelerin yüzey iyileştirmesinde de ağırlıkça %2 silan konsantrasyonu seçilmiştir. Tablo 4.13’te delikli FMT malzemelerin üç nokta eğilme test sonuçları verilmiştir. Tablo 4.13’ten tüm delik biçimleri için Bölüm 4.5.3’teki Şekil 4.25-a’da belirtilen deliksiz FMT numunelere göre maksimum gerilme değerlerinin azaldığı,  $\phi 3$  mm delikli numunelerin ise deliksiz FMT numunelerin maksimum gerilme değerlerine yaklaştığı görülmüştür. TDA/KA oranı incelendiğinde her üç oran içinde (0.1, 0.085 ve 0.055) en iyi dayanımın  $\phi 3$  mm delikli numunelerde çıktığı saptanmıştır. En düşük dayanım değerlerinin her üç TDA/KA oranında da  $\phi 5$  mm delikli numunelerde olduğu belirlenmiştir. Delik açılmış kompozit bağlantılarında, hasar tipi kenar-uzaklık (E/D) oranı ile direk olarak ilişkilidir. E/D oranı az olduğunda, delik etrafında yüksek gerilme konsantrasyonu kompozit malzemelerin düşük kayma dayanımı nedeni ile kesilme (shear-out) hasarına neden olacağı belirtilmiştir [79].  $\phi 5$  mm delikli numunelerde E/D oranının az olması nedeni ile kompozit numunelerin dayanım değerlerinin düşük çıktığı düşünülmektedir.  $\phi 4$  mm delikli numunelerin maksimum kuvvet ve maksimum gerilme değerlerinin her üç TDA/KA oranı içinde orta düzeyde çıktığı gözlemlenmiştir. TDA/KA oranının 0.055 olduğu durum incelenecek olursa deliksiz numunelere göre maksimum gerilme değerlerinin sırası ile %6.57, %3.7 ve %1.53 azaldığı görülmektedir. Bu delik oranında, 0.055,  $\phi 3$  mm,  $\phi 4$  mm ve  $\phi 5$  mm delikli numuneler için delik sayıları sırasıyla 10, 6 ve 4 adettir. 10 adet  $\phi 3$  mm delik açılan FMT numunenin maksimum gerilme değerinin deliksiz numuneye göre %1.53 kadar azaldığı göz önüne alınırsa, delik sayısının azaltılması yani TDA/KA oranının 0.055’ten 0.3 seviyelerine indirilmesi ile deliksiz numunelerden elde edilen maksimum eğilme gerilmesi değerlerinin aşılacağı düşünülmektedir. Modül değerleri göz önüne alınırsa genel itibari ile numunelere delik açılması ile modül değerlerinin arttığı yani ara yüzey yapışmasının iyileştiği

gözlemlenmektedir. Delik açılan bölgelerden sızan kısa cam elyaf demetlerinin metal yüzeyi alt ve üst taraftan sarması nedeni ile ara yüzey yapışması artmıştır.

Tablo 4.13: Delikli FMT numunelerin üç nokta eğilme test sonuçları

TDA/KA Oranı ve Delik Çapı	Numune kodu	Elastik modül (N/mm <sup>2</sup> )	Maksimum Gerilme (N/mm <sup>2</sup> )	Ortalama Modül Ve %2 Silanlı İle %Fark	Ortalama Maksimum Gerilme ve %2 Silanlı İle Fark
TDA/KA= 0,1 φ5 mm=TİP A	1	20786,9	161,581	19349,47 -%7.5 AZALMA	160,2023 -%18 AZALMA
	2	19367,4	154,921		
	3	18507,2	156,376		
	4	19273	157,558		
	5	18444,7	164,757		
	6	20354,8	168,806		
TDA/KA= 0,1 φ4 mm=TİP B	1	21035,1	172,351	20106,8 -%4 AZALMA	176,7257 -%9.4 AZALMA
	2	19577,9	177,433		
	3	19707,4	180,393		
TDA/KA= 0,1 φ3 mm=TİP C	1	22433,1	179,713	21924,75 +%4.75 ARTMA	183,71 -%6 AZALMA
	2	22188,3	188,4		
	3	19294	183,276		
	4	23783,6	183,451		
TDA/KA= 0,085 φ5 mm=TİP A	1	22615,5	174,606	21500,27 +%2.72 ARTMA	174,5973 -%10.5 AZALMA
	2	21319	175,204		
	3	20566,3	173,982		
TDA/KA= 0,085 φ4 mm=TİP B	1	23415	188,031	23490,63 +%12.23 ARTMA	178,8677 -%8.3 AZALMA
	2	23982,5	175,351		
	3	23074,4	173,221		
TDA/KA= 0,085 φ3 mm=TİP C	1	23778,9	189,975	23429,97 +%11.94 ARTMA	182,4633 -%6.46 AZALMA
	2	22888,9	179,067		
	3	23622,1	178,348		
TDA/KA= 0,055 φ5 mm=TİP A	1	19366,4	185,016	21062,9 +%0.63 ARTMA	182,2456 -%6.57 AZALMA
	2	23228,8	179,132		
	3	21094,8	179,263		
	4	22032,3	181,949		
	5	19592,2	185,868		
TDA/KA= 0,055 φ4 mm=TİP B	1	22458,9	189,530	22324,5 +%6.66 ARTMA	187,88 -%3.7 AZALMA
	2	22584,3	184,263		
	3	21930,3	189,847		
TDA/KA= 0,055 φ3 mm=TİP C	1	22152,6	196,037	22096,6 +%5.57 ARTMA	192,081 -%1.53 AZALMA
	2	21912	191,697		
	3	22225,2	188,509		

Tablo 4.13’de gösterilen veriler ışığı altında maksimum eğilme gerilmesi ve eğilme modülü değerlerinin delik çapı ve TDA/KA oranına göre değişimi Şekil 4.26’da gösterilmiştir.



Şekil 4.26: Maksimum eğilme gerilmesi ve eğilme modülü değerlerinin delik çapı ve TDA/KA oranına göre değişimi

Şekil 4.26-a’da görüldüğü gibi tüm delik biçimlerinde deliksiz fiber metal tabakalı kompozit numunenin maksimum gerilme değerine ulaşamamıştır. Azalan TDA/KA oranı ve delik çapı ile maksimum gerilme değerlerinde artış gözlenmiştir. Şekil 4.26-b’de ise elastik modül değerlerinin genel anlamda deliksiz numunenin elastik modül değerlerine yaklaştığı hatta ortalama değerlerinin daha yüksek çıktığı görülmektedir.

**4.5.5. Ağırlıkça yüzde silan konsantrasyonunun belirlenmesinden sonra ( $\phi 3$  mm ve  $\phi 5$  mm) delik çaplarında 3 farklı TDA/KA oranında matkapla delinmiş alüminyum levhalar içeren fiber metal tabakalı kompozitlerin mekanik+adheziif yapışma bağlantı dayanımlarının TAKD testleri ile belirlenmesi**

Yüzey iyileştirme işlemleri uygulanmadan önce Bölüm 3.6'daki Şekil 3.10'da belirtilen alüminyum levha yüzeylerine  $\phi 3$  mm ve  $\phi 5$  mm çaplı delikler açılmıştır. Şekil 3.10'da belirtilen şekilde deliklerin alüminyum levha yüzeylerinde açılmasından sonra Bölüm 3.3'teki Tablo 3.7'da belirtilen yüzey işlemleri uygulanmıştır. Optimum silan konsantrasyonunun üç nokta eğilme, TAKD ve kısa kiriş kayma dayanımı testleri ile ağırlıkça %2 olarak belirlenmesinden sonra delikli FMT numunelerin yüzey iyileştirmesinde de ağırlıkça %2 silan konsantrasyonu seçilmiştir. Tablo 4.14'te  $\phi 3$  mm ve  $\phi 5$  mm delikli numunelerin ara yüzey dayanımının belirlenebilmesi için yapılan TAKD testinin deney sonuçları verilmiştir.

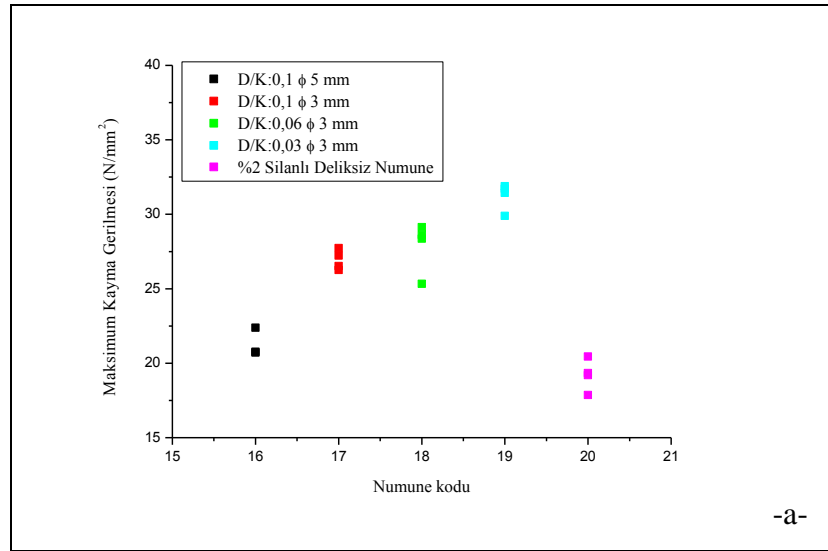
Tablo 4.14:  $\phi 3$  mm ve  $\phi 5$  mm delikli FMT numunelerin ara yüzey dayanımının belirlenebilmesi için yapılan TAKD testinin deney sonuçları

TDA/KA Oranı ve Delik Çapı	Numune kodu	Maksimum Kuvvet (N)	Maksimum Kayma Gerilmesi (N/mm <sup>2</sup> )
TDA/KA= 0,1 $\phi 5$ mm=TİP A	1	1194,06	22,388
	2	1108,002	20,775
	3	1104,558	20,710
TDA/KA= 0,1 $\phi 3$ mm=TİP C	1	1478,967	27,730
	2	1414,72	2,652
	3	1400,5	26,259
	4	1451,71	27,219
TDA/KA= 0,06 $\phi 3$ mm=TİP C	1	1526,49	28,621
	2	1351,08	25,332
	3	1553,683	29,131
	4	1512,415	28,357
TDA/KA= 0,03 $\phi 3$ mm=TİP C	1	1700,41	31,882
	2	1691,47	31,715
	3	1594,47	29,896
	4	1676,805	31,440

Tablo 4.14'ten TDA/KA oranı 0.1 olduğu durumda (Şekil 3.10), üç nokta eğilme deneylerinde elde edilen sonuçlara benzer olarak delik çapının azalması ile maksimum kuvvet ve maksimum kayma gerilme değerlerinin arttığı görülmektedir.



Delik çapının azalması ile birlikte delik sayısının 2'den 6 adede yükselmesi ile deliklere yerleşen fiber-matris miktarını arttırmıştır. Bununla birlikte baskı ucunun numuneyi eğmeye zorlaması esnasında delik bölgesindeki cam elyaf-matris bölgesinin kesilmeye çalışacağı düşünüldüğünde 6 adet cam elyaf-matris bölgesinin daha fazla baskı ucuna karşı dayanım göstereceği düşünülmektedir. Bununla birlikte TDA/KA oranının azalması ile, 0.06 ve 0.03, maksimum kuvvet ve maksimum kayma gerilmesi değerlerinin arttığı gözlenmiştir. Bunun nedeninin ise kesitteki delik sayısının fazla olmasının mekanik yapıyı artırması beklenirken tam tersi az da olsa çentik etkisi nedeni ile dayanımı düşürmesidir. Delik sayısının yani toplam TDA/KA oranının azalması ile maksimum dayanım elde edilmiştir. Maksimum kayma gerilmesi değerlerinin TDA/KA oranına ve delik çapına göre değişimi Şekil 4.27'de gösterilmiştir.



Şekil 4.27: Deliksiz ve  $\phi 3$  mm ve  $\phi 5$  mm delikli FMT numunelerin TAKD testi sonucunda elde edilen maksimum kayma gerilmesi değerleri

FMT metal tabakalı kompozit numunelerin maksimum kayma gerilmesi değerlerini aştığı görülmektedir. Tablo 4.14'de TDA/KA oranı ve delik çapına göre sınıflandırılan numunelere göre, TDA/KA= 0,1 ve  $\phi 5$  mm=TİP A numunesi için, deliksiz FMT numunenin maksimum kayma gerilmesini %10.83, bunun yanında TDA/KA= 0,1 ve  $\phi 3$  mm=TİP C, TDA/KA= 0,06 ve  $\phi 3$  mm=TİP C, TDA/KA= 0,03 ve  $\phi 3$  mm=TİP C numunelerin ise sırasıyla %40.2, %45.03 ve %62.59 aştığı saptanmıştır. TDA/KA oranının 0.1 ve 0.06 olduğu durumda  $\phi 3$  mm delikli numunenin dayanım değerlerindeki artışın fazla olmaması bunun yanında oranın

0.03 değerine düşmesi ile yaklaşık %17'lik bir artışın yaşanması metal/cam elyaf-matris ara yüzeyi için optimum delik sayısının  $\phi 3$  mm delik için 2 olduğunu göstermektedir.

#### **4.6. Çekme Testleri**

##### **4.6.1. Ağırlıkça yüzde silan konsantrasyonun metal/cam elyaf keçe+PPS matris arayüzey dayanımına etkisini belirleyebilmek için çekme testlerinin gerçekleştirilmesi**

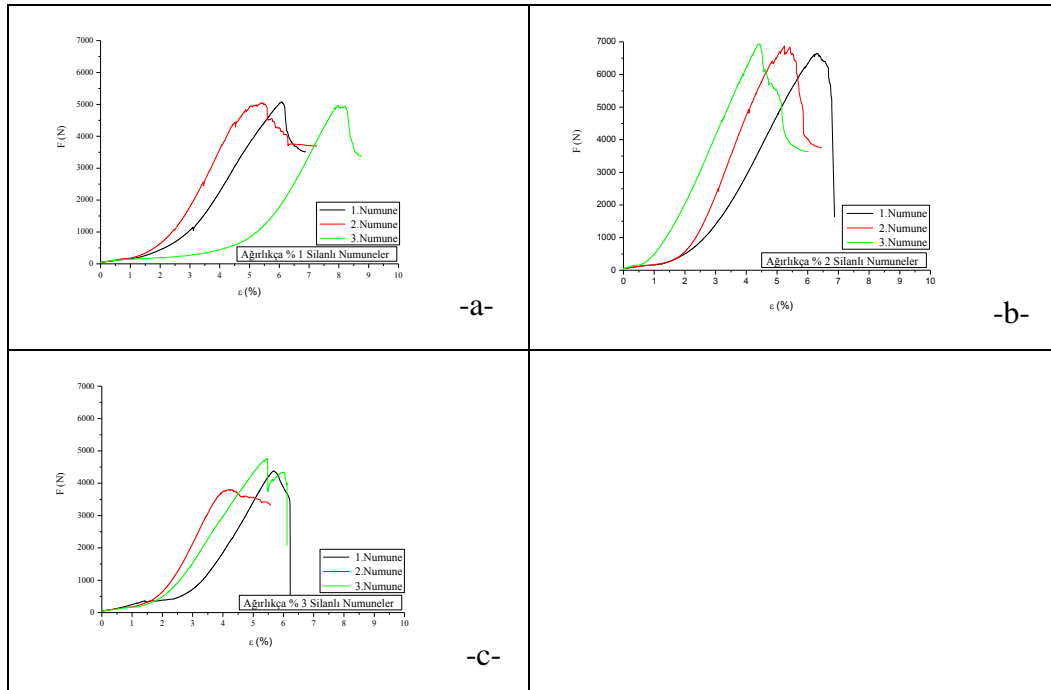
Adhezif yapışma yöntemi 30-40 yıldır havacılık yapılarının ve bileşenlerinin üretiminde kullanılmaktadır [30]. Yapıştırma teknikleri otomotiv endüstrisinde, uzay ve havacılık endüstrisinde (F-18 uçağının kanatlarında), elektronik sahalarda (çok katlı kartlarda, yapıştırılmış bileşenlerde) ve daha birçok uygulama alanında kullanılmaktadır. Yapıştırılmış bileşenler geleneksel mekanik bağlantılara göre birçok avantaj sunmaktadır: düşük ağırlık, düşük üretim maliyeti ve geliştirilmiş hasar toleransı [31]. Modern uçaklar büyük oranda düşük ağırlıklı sandviç yapılar ve yapıştırılmış bağlantılardan oluşmaktadır [32].

Kaynakça [30]'da belirtildiği gibi, bu teknik şu anda yüksek güvenlik seviyeli parçaların birleştirilmesinde en ilginç yollardan biri olup yapısal uygulamalarda ikinci seçenektir birinci seçenek olarak tercih edilmeye başlanmıştır. Örneğin, yapısal adhezif yapışma genellikle burkulmalara karşı yapıları dayanıklı kılabilmek için kanat ve yakıt tankına boyuna kirişlerin ve/veya destek ekleme parçalarının montajında kullanılmaktadır. Yapıştırılmış yapılar eğer doğru tasarlanırsa eşdeğer bir mekanik olarak birleştirilmiş bağlantıdan daha yüksek yüklemeleri karşılayabilmektedir ve daha iyi yorulma direnci gösterebilmektedir [32]. Üç nokta eğilme, TAKD ve kısa kiriş kayma dayanımı testleri ile metal/cam elyaf keçe+PPS matris arayüzeyinde oluşturulan adhezif yapışmaya ağırlıkça silan konsantrasyonunun belirlenmesinin yanında ağırlıkça silan konsantrasyonunun çekme yüklemesine tabi tutulacak fiber metal tabakalı kompozitlerin ara yüzey dayanımına etkisinde saptanması gerekmektedir. Bu nedenle delik formasyonlarının ara yüzey dayanımına etkisinin belirlenmesinden önce optimum

silan konsantrasyonunun saptanabilmesi için deliksiz FMT numuneler çekme testlerine tabi tutulmuştur.

Organosilanlar, örneğin metalik bileşenlerin yüzeyine organik kaplama veya adhezif yapışma dayanıklılığı gibi bitmiş ürünün ömrünü arttırmaya yarayan ara yüzey etkileşimlerinin geliştirilmesi istenen çeşitli uygulamalarla birlikte alüminyum malzemesinin krom (VI) bazlı yüzey iyileştirilmesi yerine kullanılan iyi bir malzemedir [207]. Organosilanlar ve okside metal yüzeyler arasındaki kovalent bağın formasyonu aslında hidrolitik kararlılık ve bağlantının dayanımının geliştirilmesi ile kanıtlanmış olup uzun zamandır kabul edilmektedir [208]. Bu çalışmada alüminyum levhalar ile PPS matris-cam elyaf arasında adhezif yapışma oluşturabilmek için bir organosilan olan  $\gamma$ -glycidoxypropyltrimethoxysilan ( $\gamma$ -GPS) seçilmiştir.

Şekil 4.28’de üç farklı ağırlıkça silan konsantrasyonu (%1, %2 ve %3) ile üretilmiş FMT numunelerin kuvvet-% genleme eğrileri gösterilmiştir.



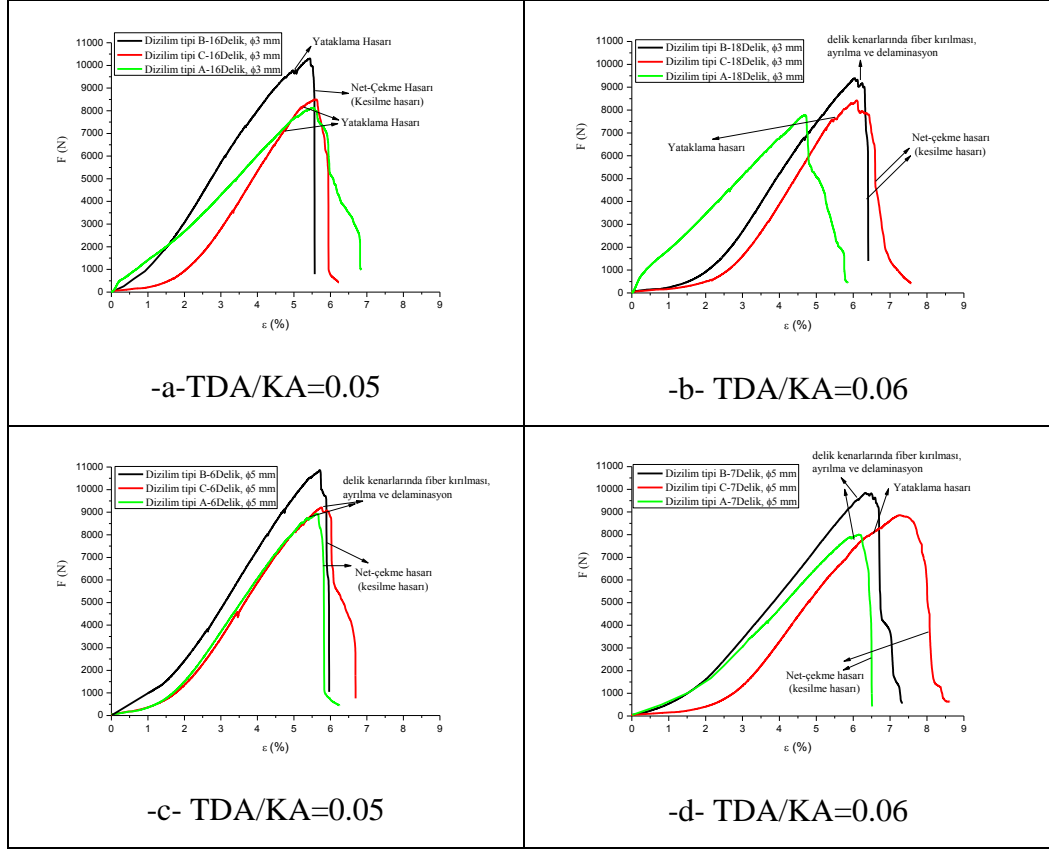
Şekil 4.28: Üç farklı ağırlıkça silan konsantrasyonu (%1, %2 ve %3) ile üretilmiş FMT numunelerin kuvvet-% genleme eğrileri

Şekil 4.28'den ağırlıkça %2  $\gamma$  -GPS solüsyonu konsantrasyonu ile yüzeyi iyileştirilmiş alüminyum levhaların metal ile PPS matris-cam elyaf tabakası arasındaki adhezif yapışmayı iyileştirdiği saptanmıştır. Daha düşük konsantrasyonlarda, örneğin ağırlıkça %1  $\gamma$  -GPS solüsyonu konsantrasyonunda (Şekil 4.28 -a), az miktarda hidrolize olmuş  $\gamma$  -GPS molekülleri alüminyum levhaların yüzeylerinden absorbe edilmiş ve moleküller arasındaki zincir ağı oluşturulamamıştır.  $\gamma$  -GPS solüsyon konsantrasyonu %2 seviyesine çıkartıldığında daha fazla hidrolize olmuş  $\gamma$ -GPS molekülleri alüminyum yüzeylerinden absorbe edildiği tespit edilmiştir (Şekil 4.28-b). Daha yüksek  $\gamma$  -GPS solüsyon konsantrasyonlarında (%2'den daha fazla), Şekil 4.28-c, hidrolize olmuş  $\gamma$  -GPS molekülleri tarafından alüminyum levhaların doyurulmasından sonra hidrolize olmuş  $\gamma$  -GPS molekülleri fiziksel olarak  $\gamma$  -GPS moleküllerinin absorbe olduğu alüminyum levha yüzeyleri üzerine yeniden absorbe olmaya çalışmaktadırlar. Fiziksel olarak absorbe olan  $\gamma$  -GPS katı kimyasal olarak absorbe olmuş  $\gamma$  -GPS katı ile PPS matris-cam elyaf keçe katmanı arasındaki etkileşimi önlemektedir. Kaynakça [203]'da belirtilen çalışmaya benzer olarak yüksek orandaki  $\gamma$  -GPS solüsyon konsantrasyonlarında çekme kuvvetinde keskin bir düşüşe yol açmaktadır. Kaynakça [204]'da belirtildiği üzere, ağırlıkça %2  $\gamma$  -GPS konsantrasyonunda silan yüzey iyileştirmesinin hidroliz olayı ile silan-metal ara yüzey direncine bağlı olarak FMT malzemelerin delaminasyon direncinin ve yapışma özelliklerinin arttırıldığı tespit edilmiştir.

#### **4.6.2. Ağırlıkça yüzde silan konsantrasyonunun belirlenmesinden sonra ( $\phi$ 3 mm ve $\phi$ 5 mm) delik çaplarında, 3 farklı delik diziliminde ve iki farklı TDA/KA oranında matkapla delinmiş yüzeyi iyileştirilmiş ve iyileştirilmemiş alüminyum levhalar içeren fiber metal tabakalı kompozitlerin mekanik birleştirme+adhezif yapışma bağlantı dayanımlarının çekme testleri ile belirlenmesi**

Ağırlıkça %2  $\gamma$  -GPS solüsyonunun üretilen deliksiz FMT numunelerin çekme dayanımlarını iyileştirdiğinin belirlenmesinden sonra aynı silan konsantrasyonlarında Şekil 3.14 ve Şekil 3.15'de belirtilen farklı delik formasyonlarına sahip FMT

numuneleri sıcak pres tekniğinde üretilmiştir. Üretilen delikli ve yüzeyi iyileştirilmiş FMT numunelerin kuvvet-% genleme eğrileri Şekil 4.29’da gösterilmiştir.



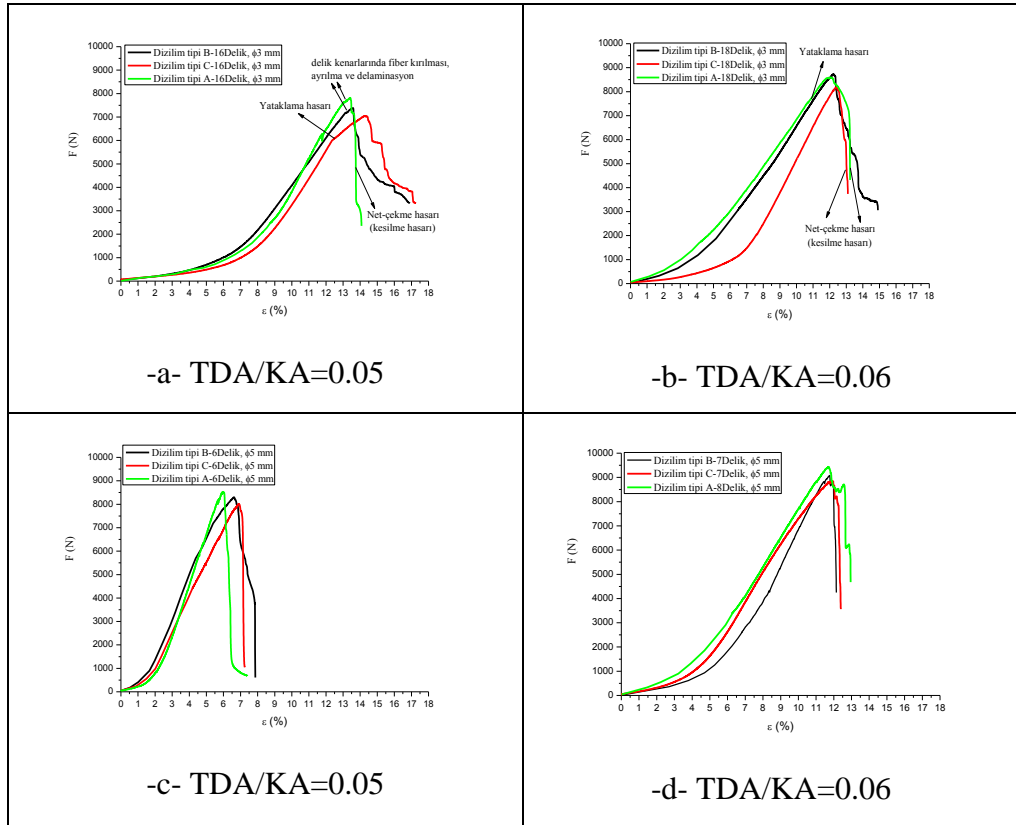
Şekil 4.29: TDA/KA oranı 0.05 ve 0.06 olduğu durumda üç farklı delik formasyonunda delikli ve yüzeyi iyileştirilmiş FMT numunelerin kuvvet-% genleme eğrileri

Şekil 4.29’dan genel olarak Şekil 4.28-b’de belirtilen deliksiz ve yüzeyi iyileştirilmiş FMT numunelerin ara yüzey dayanımlarının tüm delik formasyonları ile geliştirildiği kuvvet değerlerinin artması ile gözlenmektedir. Delikli FMT numuneleri deforme edebilmek için daha fazla kesme enerjisi gerektiği saptanmıştır. Bununla birlikte artan delik sayısı ile FMT numunelerinin % genleme değerlerinin arttığı tespit edilmiştir (Şekil 4.29-b ve d). Kuvvet-% uzama eğrilerinden dairesel delik formasyonlarının FMT malzemelerinin sünekliğini ve bununla birlikte dayanımını geliştirdiği gözlenmiştir. Her üç delik dizilimi karşılaştırılacak olursa, A, B ve C, her iki delik çapı içinde B delik dizilimine sahip FMT numunelerin tabakalar arası dayanımının en yüksek olduğu, en düşük tabakalar arası dayanım değerlerinin ise A delik dizilimine sahip FMT numunelerde olduğu saptanmıştır (Şekil 4.29). % genleme değerleri karşılaştırılacak olursa C delik dizilimine sahip FMT numunelerin en fazla uzama gösterdiği, bunu B ve A delik dizimine sahip FMT numunelerinin

izlediği gözlenmiştir. Bunun nedeninin C delik diziliminde daralan bir delik formasyonu olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir ayrıca genel olarak numunelerin orta bölgesinde C ve B delik dizilimine sahip FMT numunelerinde benzer delik sayısı nedeniyle % genleme değerlerinin yakın çıktığı tespit edilmiştir. A delik diziliminde ise numunelerin her bölgesinde delik sayısının aynı olması ve kesitin deliksiz kısmının diğer dizilimlere göre daha az olması nedeniyle en düşük % genleme değerlerinin gözlemlendiği belirlenmiştir.

Delik çapının etkisi incelenecek olursa, delik çapının  $\phi 3$  mm'den  $\phi 5$  mm'ye çıkartılması ile her üç delik formasyonu içinde kuvvet değerlerinin arttığı bunun nedeninin ise belli ölçüde silanlı deliksiz yüzeyin azalmasına rağmen metal levha ile cam elyaf keçe-PPS matris ara yüzeyinde oluşan cam elyaf keçe+PPS matris sütünlarnının kesilmeye zorlanması ile ortaya çıkan ek dayanım kuvvetleridir (Şekil 4.29-a-b ve c-d). Bununla birlikte, kuvvet-% genleme eğrileri çekme testleri esnasında FMT malzemelerinde oluşan hasar mekanizmaları hakkında da bilgi vermektedir. Şekil 4.29-b ve d'den, B delik tipi için, son kırılma hasarından önce yaklaşık %95 kritik hasar kuvvetinde kuvvet-% genleme eğrilerinde bir plato gözlemlenmektedir. Bunun nedeni Kaynakça [29]'da belirtildiği gibi delik kenarlarında fiber kırılması, ayrılma ve delaminasyon gibi hasar başlangıcının varlığına işaret etmesidir. Kuvvet-% genleme eğrilerinden gözlenen diğer bir hasar mekanizması işse yük taşıması hasarıdır. Tüm delik formasyonlarında gözlenen bir hasar mekanizması olup, kuvvet-% genleme eğrilerindeki lineerliğin kaybolduğu ve ilk ani kuvvet düşüşünün gözlemlendiği bölgeyi temsil etmektedir. Örneğin Şekil 4.29-a'daki B delik dizilimine sahip numunedeki kuvvet-% genleme eğrisinin lineerliğin bozulduğu kuvvet değerinin 9500 N'a kadar yaklaşık lineer olduğu bu noktada FMT numunenin rijitliğinin bozularak belli bir miktar düştüğü bununla birlikte daha sonra numune toparlanarak maksimum kuvvet değerlerinin Kaynakça [209]'da benzer olarak yaklaşık olarak 10200 N değerlerine kadar yükseldiği tespit edilmiştir. Bu rijitlikteki azalma, hasarın numune içerisinde başladığını ve geliştiğini göstermektedir. Genel bir bakış açısı olarak yük taşıması hasarı yıkıcı olmayan bir hasar tipidir. Son olarak, kuvvet- % genleme eğrilerinden tespit edilen diğer bir hasar mekanizması da net-çekme (net-kesilme) hasarıdır (Şekil 4.29-a, b, c ve d). FMT numunelerin delik kenarlarında oluşan çatlağın ilerlemesi ile kuvvet değerlerinde ani

düşüş gözlenmiştir. FMT numuneleri gerçekleşen bu tip hasarlanma sonrası daha fazla çekme yüklemesini karşılayamaz hale gelmektedir. Net-çekme hasarının bağlantıdaki yük-taşıma kapasitesini yıkıcı bir şekilde etkilediği tespit edilmiştir. Ağırılıkça %2  $\gamma$  -GPS solüsyonunun üretilen deliksiz FMT numunelerin çekme dayanımlarını iyileştirdiğinin ve bu iyileştirmenin farklı delik formasyonları ile daha da geliştirildiği açıklanmıştır. Alüminyum levhaları ile cam elyaf keçe-PPS matris ara yüzeyinde oluşturulan cam elyaf keçe+PPS matris sütunlarının oluşturduğu mekanik bağlantının, üretilen FMT numunelerin ara yüzey dayanımlarına etkisinin belirlenebilmesi için yüzeyi iyileştirilmemiş sadece Şekil 3.14 ve Şekil 3.15'te belirtilen farklı delik formasyonlarına sahip FMT numunelere çekme yüklemesi uygulanmıştır. Üretilen delikli ve yüzeyi iyileştirilmemiş FMT numunelerin kuvvet-% genleme eğrileri Şekil 4.30'da gösterilmiştir.



Şekil 4.30: TDA/KA oranı 0.05 ve 0.06 olduğu durumda üç farklı delik formasyonunda delikli ve yüzeyi iyileştirilmemiş FMT numunelerin kuvvet-% genleme eğrileri

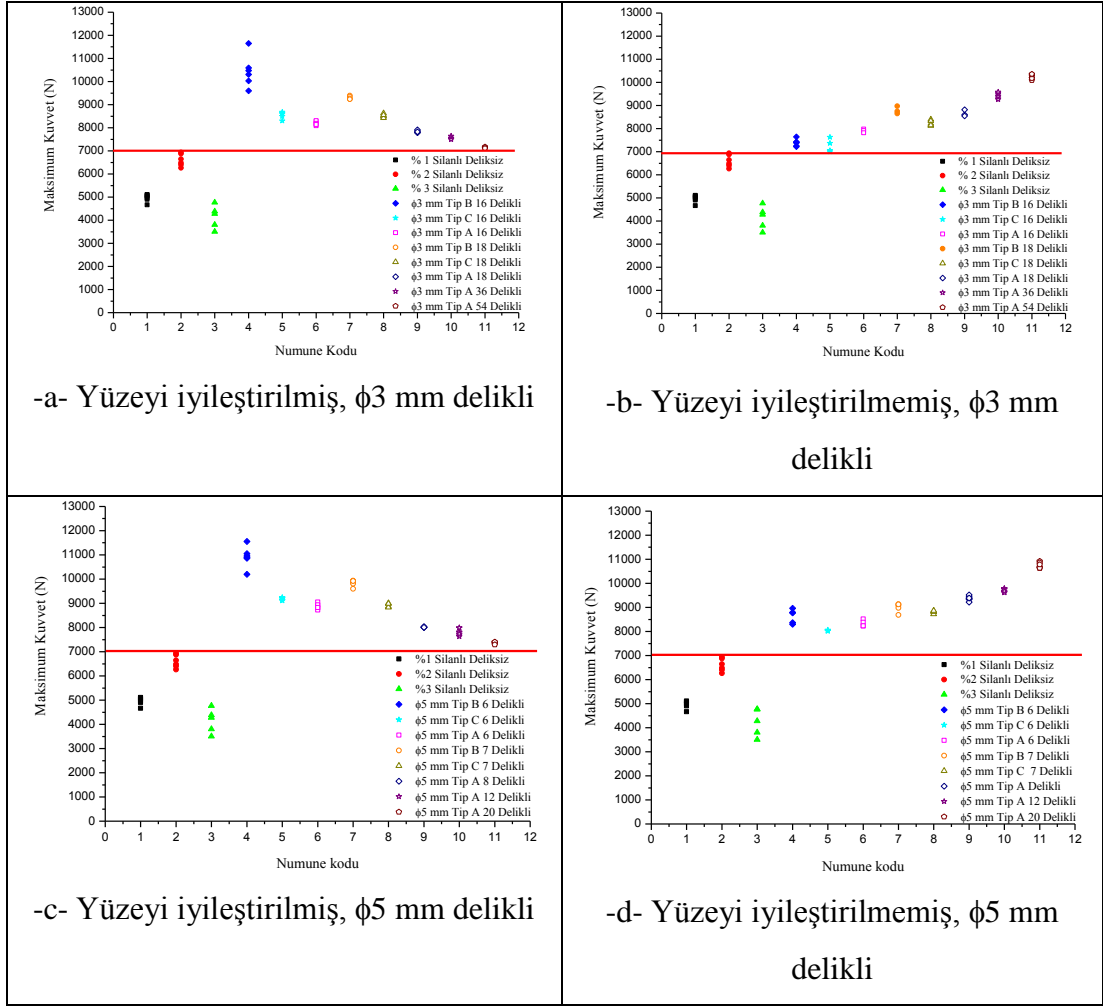
Şekil 4.30'da gösterildiği gibi delikli ve yüzeyi iyileştirmemiş FMT numunelerin kuvvet-% genleme eğrilerinden numunelerin ara yüzey dayanımlarının Şekil 4.28-b'de belirtilen deliksiz ve yüzeyi iyileştirilmiş FMT numunelerin ara yüzey

dayanımlarına göre tüm delik formasyonları için daha yüksek çıktığı tespit edilmiştir. Bununla birlikte delikli ve yüzeyi iyileştirilmiş FMT numunelerinin ara yüzey dayanımlarına göre her iki delik çapı içinde A delik tipli TDA/KA=0.06 haricindeki tüm delik formasyonlarında ara yüzey dayanımlarının azaldığı saptanmıştır (Şekil 4.29 ve Şekil 4.30). Maksimum kuvvet değerlerinde yaşanan bu düşüşün cam elyaf keçe+PPS matris sütunları ile oluşturulan mekanik bağlantı ile iyileştirilmesinin yanında metal yüzeye uygulanmayan yüzey iyileştirme işlemleri nedeniyle ara yüzeyde deliksiz bölgede yapışma olmamasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

% genleme değerleri incelenecek olursa, delikli ve yüzeyi iyileştirilmiş FMT numunelere kıyasla hasara uğramanın gözlemlendiği kuvvet değerlerindeki uzama değerlerinin arttığı bununla birlikte C delik dizilimine sahip numunelerin yüzeyi iyileştirilmiş C delik dizilimine sahip FMT numunelerdeki gibi en fazla uzamaya sahip olduğu belirlenmiştir (Şekil 4.30). Üç delik dizilimine sahip FMT numunelerdeki uzama değerlerindeki artışın nedeninin ara yüzeyde herhangi bir yüzey iyileştirme yapılmaması nedeniyle adhezif yapışma olmaması ve adhezif yapışmanın olmaması nedeniyle de sünek alüminyumun kendine özgü çekme davranışını daha rahat gösterebilmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Hasar mekanizmaları incelenecek olursa, delikli ve yüzeyi iyileştirilmiş FMT numunelerde çekme yüklemesi nedenli ortaya çıkan hasar mekanizmalarına benzer sonuçlar elde edilmesi rağmen, net-çekme hasarının ana hasar mekanizması olarak ortaya çıktığı saptanmıştır (Şekil 4.30-a,b, c ve d). Net-çekme hasarının her üç delik formasyonu için ana hasar mekanizması olarak ortaya çıkmasının nedeni cam elyaf keçe+PPS matris sütunları ile sadece mekanik ara yüzey bağlantısı oluşturulması ile açıklanmaktadır. Metal ile cam elyaf keçe-PPS matris ara yüzeyinde adhezif yapışmanın olmaması ve uygulanan çekme yüklemesinde oluşan kuvvet çizgilerinin delikler etrafında yoğunlaşmasına bağlı olarak delikler ve deliklerde oluşan sütunlar kesilmeye zorlanmışlardır. Buda delikli ve yüzeyi iyileştirilmemiş FMT numunelerde net-çekme hasarının oluşmasına neden olmuştur. Üç farklı delik formasyonuna sahip yüzeyi iyileştirilmiş ve iyileştirilmemiş FMT numunelerin maksimum kuvvet değerlerinin deliksiz yüzeyi iyileştirilmiş FMT numunelere göre değişimi Şekil 4.31'de gösterilmiştir.





Şekil 4.31: Üç farklı delik formasyonuna sahip yüzeyi iyileştirilmiş ve iyileştirilmemiş FMT numunelerin maksimum kuvvet değerlerinin değişimi

Şekil 4.31'den genel olarak, delik çapının artması ile metal ile cam elyaf keçe-PPS matris arayüzey dayanımının arttığı görülmektedir. Delik çapının  $\phi 5$  mm olması halinde cam elyaf keçe-PPS matris sütunlarının oluşturduğu mekanik bağlantının daha geniş bir bölgede olması nedeniyle üç delik dizilimi için  $\phi 3$  mm deliklere sahip FMT numunelerin maksimum kuvvet değerlerinin yaklaşık % 5 daha az çıktığı tespit edilmiştir (Şekil 4.31-a ve b, Şekil 4.31-c ve d). Yüzeyi iyileştirilmiş ve iyileştirilmemiş delikli FMT numunelerin maksimum kuvvet değerlerinin deliksiz yüzeyi iyileştirilmiş FMT numunelere göre daha yüksek çıktığı bunda oluşturulması hedeflenen metal/cam elyaf keçe+PPS matris arayüzeyinin sağlandığı belirlenmiştir. Saptanan diğer bir sonuç ise, yüzeyi iyileştirilmiş delikli numunelerde plakadaki delik sayısının artması ile maksimum kuvvet değerlerinde düşüş gözlenirken (Şekil 4.31-a ve c), yüzeyi iyileştirilmemiş delikli numunelerde ise delik sayısının artması ile maksimum kuvvet değerlerinde artış meydana geldiği

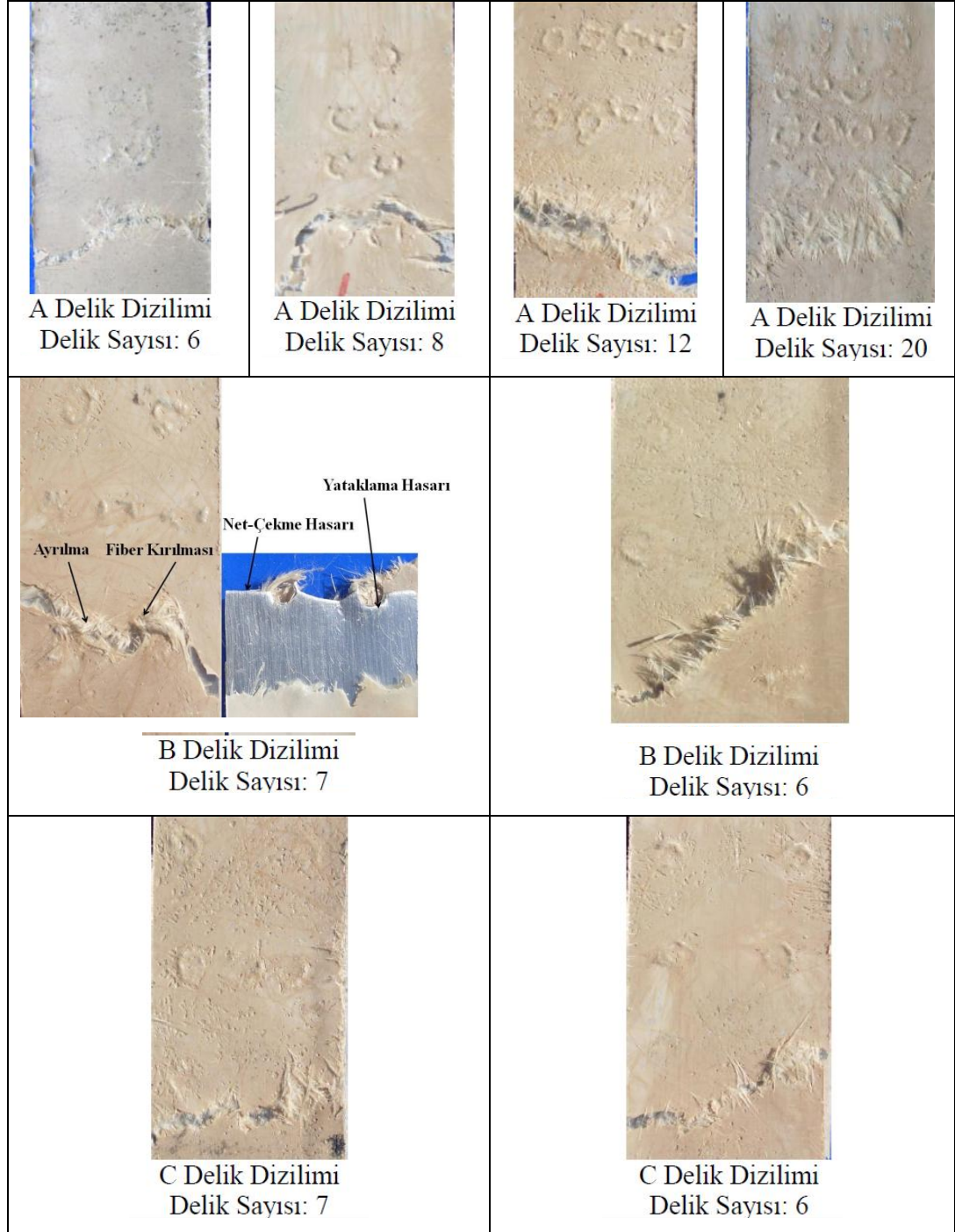
saptanmıştır (Şekil 4.31-b ve d). Bunun nedeninin, yüzey iyileştirme işleminin alüminyum levha yüzeylerine uygulanması ile mekanik bağlantının yanında adhezif yapışmanında oluşturulması ve delik sayısının artması ile adhezif yapışma bölgesinin azalması nedeniyle açıklanmaktadır. Yüzeyi iyileştirilmemiş delikli numunelerde ise delik sayısının artması ile oluşturulan cam elyaf keçe+PPS matris sütunlarının sayısı artmaktadır. Artan sütun sayısı ile iyileştirilmemiş alüminyum levha yüzey alanının azalmasına yol açmaktadır ki buda çekme yüklemesi esnasında her bir sütunun kesilmesi için gerekli kuvvet değerlerinde artışa sebep olduğu düşünülmektedir.

Şekil 4.31'den ayrıca TDA/KA oranının 0.05 ve 0.06 olduğu durumlarda B delik dizilimine sahip yüzeyi iyileştirilmiş FMT numunelerin ara yüzey dayanımının en yüksek olduğu, A delik diziliminde ise en düşük ara yüzey dayanımının olduğu belirlenmiştir. TDA/KA oranı B ve C delik formasyonları nedeniyle sadece A delik dizilimde 0.11 ve 0.19 değerlerine çıkartılmıştır. TDA/KA oranının arttırılması ile numune genişliği/delik çapı oranının (W/D) ve delikler arası mesafenin azalması nedeniyle net-çekme hasarının olduğu bununda yüzeyi iyileştirilmiş FMT numunelerde ara yüzey dayanımını azalttığı belirlenmiştir (Şekil 4.31-a ve c). Yüzeyi iyileştirilmemiş delikli FMT numunelerde ise TDA/KA oranının 0.05 ve 0.06 olduğu durumlarda A ve B delik dizilimine sahip yüzeyi iyileştirilmiş FMT numunelerin ara yüzey dayanımının C delik dizilimine sahip numunelere göre daha yüksek çıktığı belirlenmiştir. Yüzeyi iyileştirilmiş A delik dizilimine ait numunelerden farklı olarak TDA/KA oranının 0.11 ve 0.19 olması halinde ara yüzey dayanımının iyileştiği gözlenmiştir. Bunun nedeninin cam elyaf keçe+PPS matris sütunları sayesinde oluşturulan mekanik bağlantının numunelerin ara yüzey dayanımını arttırmasıdır.

#### **4.6.3. $\phi 3$ mm ve $\phi 5$ mm delik çaplarında, 3 farklı delik diziliminde ve iki farklı TDA/KA oranında matkapla delinmiş yüzeyi iyileştirilmiş ve iyileştirilmemiş alüminyum levhalar içeren fiber metal tabakalı kompozitlerde çekme testleri sonrası oluşan hasar mekanizmalarının tespiti**

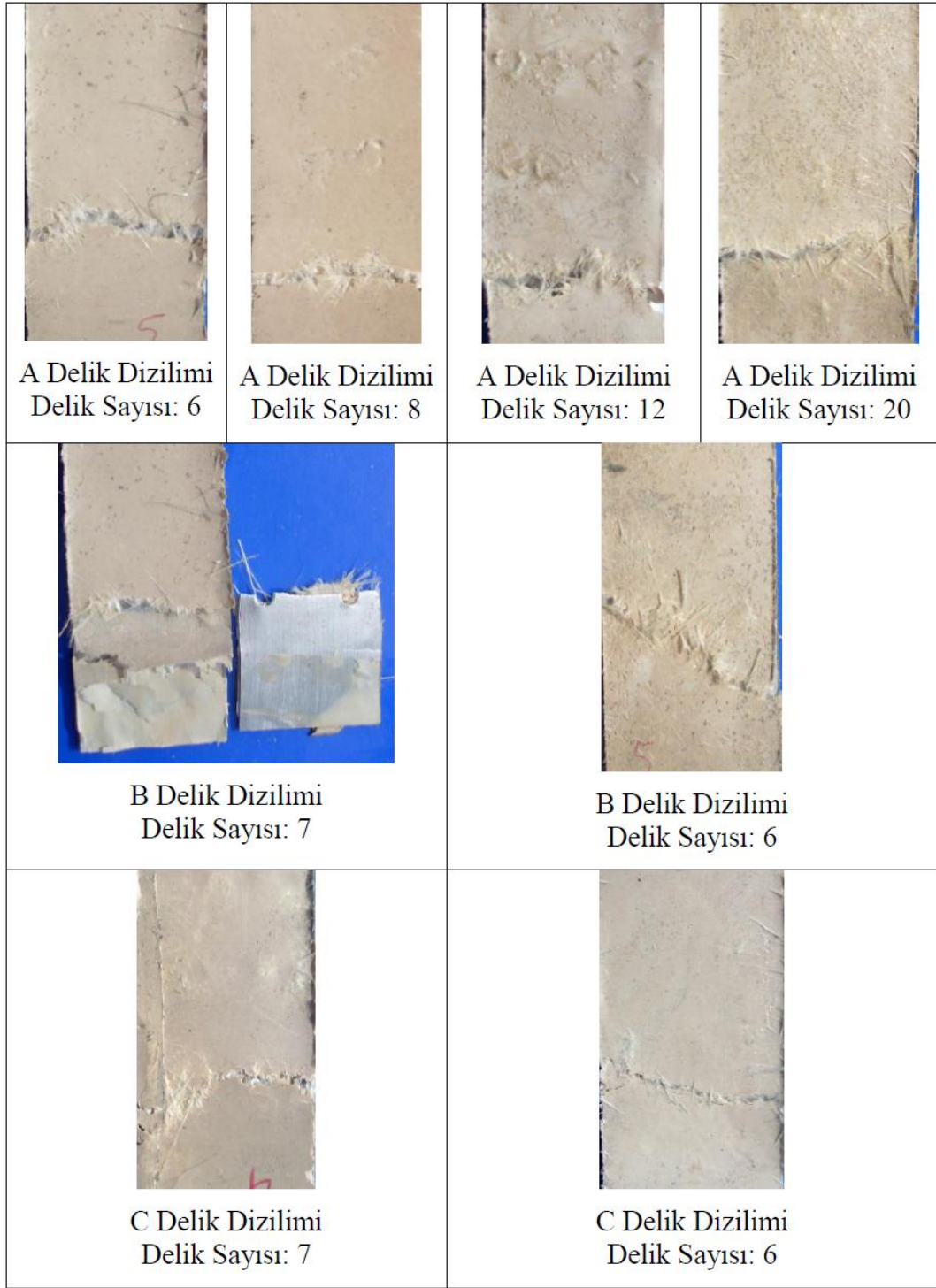
Kuvvet-% genleme eğrilerinin karakteristiğinden tespit edilen hasar mekanizmalarının tespit edilebilmesi için dijital kamera ve optik mikroskop kullanılmıştır. Şekil 4.32 ve Şekil 4.33'te delikli yüzeyi iyileştirilmiş ve

iyileştirilmemiş FMT numunelerin dijital kamera ile çekilen hasar bölgesi fotoğrafları sırasıyla gösterilmiştir. Şekil 4.32 ve Şekil 4.33'te sadece delik çapının  $\phi$  5 mm olduğu farklı delik formasyonlarına sahip FMT numunelerin hasar bölgelerinin resimleri gösterilmiştir. Delik çapının  $\phi$  3 mm olduğu FMT numunelerde benzer hasar bölgeleri gözlenmiştir.



Şekil 4.32:  $\phi$  5 mm delikli yüzeyi iyileştirilmiş FMT numunelerin dijital kamera ile çekilen hasar bölgesi resimleri

Şekil 4.32'den ana hasar mekanizmalarının alüminyum levhalar ile kompozit katmanın delaminasyonu, fiber kırılmaları, kompozit katmanın ayrılma hasarı ve alüminyum levhanın delikler boyunca kesilme hasarı olarak ortaya çıktığı gözlenmektedir. Şekil 4.32'de ayrıca saptanan önemli bir husus ise, delik diziliminin değişmesi ile alüminyum levha ile mekanik ve adhezif olarak bağlanmış kompozit katmanın çekme yüklemesi doğrultusuna bağlı olarak değişen ayrılma hasarıdır. A delik diziliminde çekme doğrultusuna göre kompozit katmanın ayrılma hasarının açısı yaklaşık  $0-15^{\circ}$  arasında oluşurken, B delik dizilimine sahip FMT numunesinde ise ayrılma hasar açısı yaklaşık  $45^{\circ}$ 'de oluşmuştur. C delik diziliminde ise ayrılma hasar açısı yaklaşık  $15-30^{\circ}$  olduğu saptanmıştır. Ek olarak TDA/KA oranının azalması ile ayrılma hasar açısının arttığı gözlemlenmiştir. Alüminyum alaşımlarının tümünde uygulanan yükleme yönüne bağlı olarak oluşan hasarın yaklaşık  $65^{\circ}$ 'de ortaya çıktığı tespit edilmiştir [210]. Ayrıca kompozit katmanlardaki fiber kırılmalarının miktarına bağlı olarak ortaya çıkan kırılma yüzeyi fiberlerin hasar sürecinin oluşmasında önemli bir rol oynadığını göstermektedir. Kompozit tabakalarda yaygın olarak tipik açısız hasarlanmanın ve bölgesel deformasyonun olduğu belirlenmiştir. Bu olay Kaynakça [80]'da belirtilen çalışmaya benzer olarak, tek eksenli yükleme durumuna maruz bırakılmış cam fiber takviyeli kompozitin alüminyum katlardaki bölgesel germe ve plastik deformasyonu nedeniyle davranışının değişmesinden kaynaklandığı tespit edilmiştir. Delik sayısının plakalarda azalması ile kompozit katmanda oluşan hasar açısının artmasının alüminyum malzemesinin yüzeyindeki deliklerin azalması ile çekme yüklemesi esnasında tipik kırılma özelliğini göstermesinden kaynaklanmaktadır. Alüminyum levha yüzeylerindeki delik sayılarının üç delik formasyonu içinde artırılması ile alüminyum levhanın yaklaşık  $90^{\circ}$ 'de hasara uğradığı bununda kompozit katmanın ayrılma hasar açısını düşürdüğü belirlenmiştir. Alüminyum levha yüzeylerindeki delik formasyonlarının ve delik sayılarının kompozit katman ve alüminyum levhanın hasar karakteristiğini ciddi bir şekilde etkilediği saptanmıştır. Son olarak, alüminyum levha yüzeylerinde oluşan hasar mekanizmalarının ise örneğin Şekil 4.32'de B delik dizilimi için gösterildiği gibi, delik bölgelerinde yük taşınması hasarı, delikler arasında ise net-çekme hasarının olduğu belirlenmiştir. Şekil 4.33'te delikli yüzeyi iyileştirilmemiş  $\phi$  5 mm delikli FMT numunelerinin dijital kamera ile hasar bölgelerinden alınan fotoğraflar gösterilmiştir.

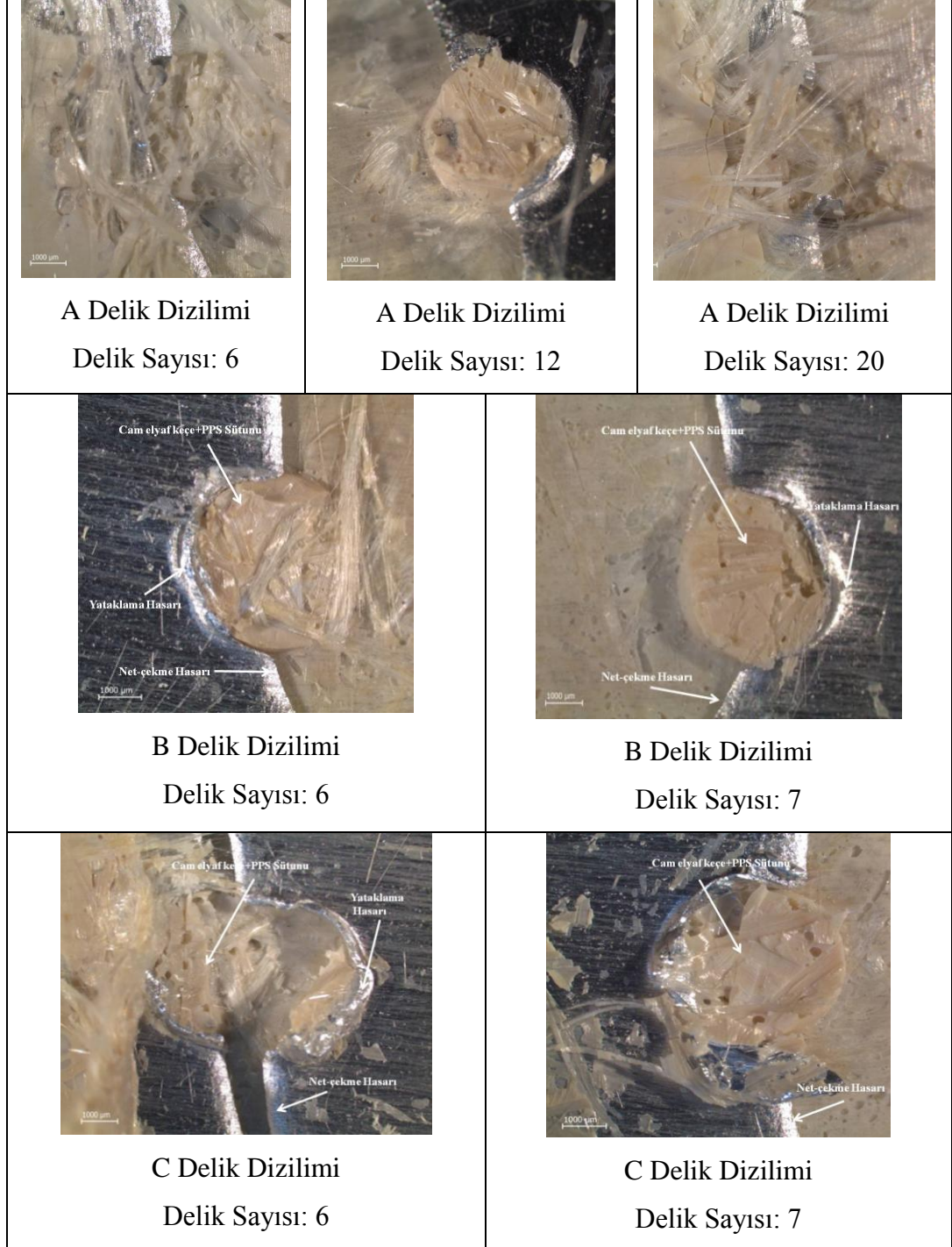


Şekil 4.33:  $\phi$  5 mm delikli yüzeyi iyileştirilmemiş FMT numunelerin dijital kamera ile çekilen hasar bölgesi resimleri

Şekil 4.33'den ana hasar mekanizmalarının Şekil 4.32'de gösterilen delikli yüzeyi iyileştirilmiş FMT numunelerde gözlenen alüminyum levhalar ile kompozit katmanın delaminasyonu, fiber kırılmaları, kompozit katmanın ayrılma hasarı ve alüminyum levhanın delikler boyunca kesilme hasarı olarak ortaya çıktığı tespit edilmiştir.



Kompozit katman ve alüminyum levhada oluşan hasar mekanizmalarında benzer sonuçlar gösterdiği, örneğin kompozit katmanlarda ayrılma hasar açısı, alüminyum levhanın yük taşıması ve net-çekme hasarlanması gibi hasar tiplerinin ortaya çıktığı belirlenmiştir.



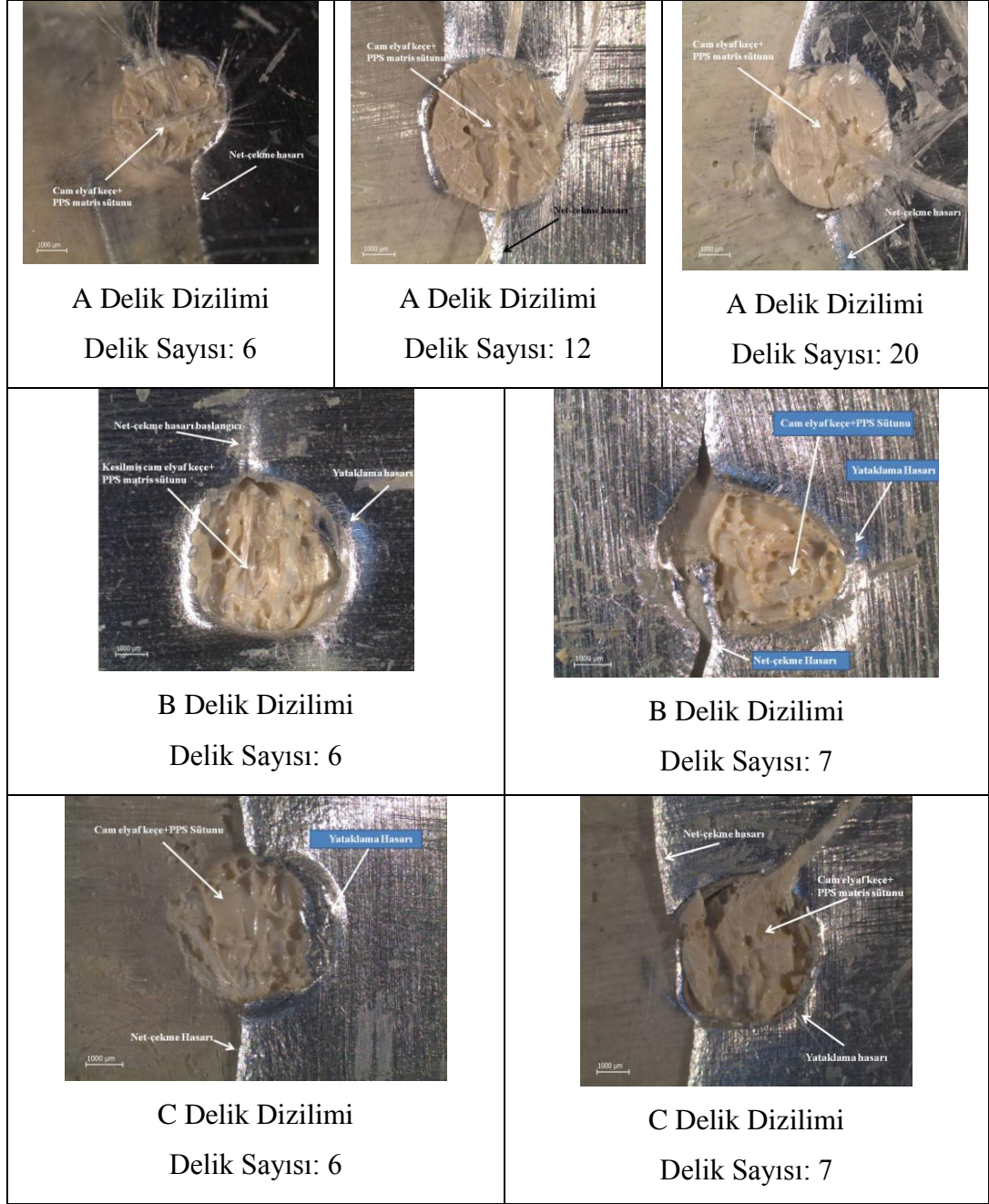
Şekil 4.34:  $\phi$  5 mm delikli yüzeyi iyileştirilmiş FMT numunelerin optik mikroskop ile çekilen hasar bölgesi resimleri

Şekil 4.34 ve Şekil 4.35’de sadece delik çapının  $\phi$  5 mm olduğu farklı delik formasyonlarına sahip FMT numunelerin hasar bölgelerinin optik mikroskopla çekilen resimleri gösterilmiştir. Delik çapının  $\phi$  3 mm olduğu FMT numunelerde benzer hasar bölgeleri gözlenmiştir.

Şekil 4.34’te  $\phi$  5 mm delikli yüzeyi iyileştirilmiş FMT numunelerin optik mikroskop ile çekilen hasar bölgesi resimleri verilmiştir. Alüminyum levha ile cam elyaf keçe-PPS matris ara yüzeyinde oluşturulması hedeflenen cam elyaf keçe+PPS matris sütunlarının olduğu saptanmıştır (Şekil 4.34).

Metal levhalar ile kompozit katmanlar arasındaki adhezif yapışmanın yanı sıra, cam elyaf keçe+PPS matris sütunları ile oluşturulan mekanik bağlantı yardımıyla FMT numunelerin tabakalar arası kayma dayanımının arttığı tespit edilmiştir. Çekme testleri esnasında, metal levha ile kompozit katman arasında oluşturulan her bir cam elyaf keçe+PPS matris sütununun kesilme hasarının oluşması için daha fazla kayma yüklemesi gerekmektedir. Bu nedenle, FMT malzemesinin kayma hasarının oluşması için gerekli olan kesilme enerjisinin büyük bir bölümü cam elyaf keçe+PPS matris sütunları tarafından absorbe edilmiştir. Bu davranış delikli yüzeyi iyileştirilmiş ve iyileştirilmemiş FMT numunelerin çekme testlerinden elde edilen kuvvet-% genleme eğrileri ile örtüşmektedir.

Delik bölgesinde oluşan ana hasar mekanizmasının yük taşıması tipi hasar olduğu gözlenmiştir (Şekil 4.34). Yük taşıması hasarı deliğe bitişik bölgedeki malzemenin bölgesel olarak hasara uğraması olarak tanımlanır ve normal olarak kenar uzaklığı/delik çapı (E/D) ve numune genişliği/delik çapı (W/D) oranlarının fazla olduğu durumlarda ortaya çıkmaktadır [147]. Yük taşıması hasarı genellikle B delik dizilimine sahip numunelerde ortaya çıkmıştır. E/D ve W/D oranının B delik diziliminde diğer iki dizilime göre daha büyük olması nedeniyle yük taşıması hasar tipi delik bölgesinde oluşmuştur. Bununla birlikte A ve C delik dizilimlerine sahip numunelerde de az da olsa yük taşıması tipi hasar saptanmıştır. Saptanan bir diğer hasar mekanizması net-çekme hasarıdır. Net-çekme hasarı dairesel deliklerde gerilme konsantrasyonuna bağlı olarak alüminyum levhalar ve kompozit katmanların çekme hasarı ile ilişkilendirilmiştir.



Şekil 4.35:  $\phi$  5 mm delikli yüzeyi iyileştirilmemiş FMT numunelerin optik mikroskop ile çekilen hasar bölgesi resimleri

Şekil 4.35'den ana hasar mekanizmalarının Şekil 4.34'te gösterilen delikli yüzeyi iyileştirilmiş FMT numunelerde gözlenen yük taşıması hasarı ve net-çekme hasarı olarak ortaya çıktığı tespit edilmiştir. B ve C delik dizilimine sahip numunelerde genel olarak yataklanma hasarlanmasının ana hasar mekanizması olarak ortaya çıktığı, A delik dizilimlerinde ise ana hasar mekanizmasının net-çekme hasar mekanizması olduğu tespit edilmiştir. Cam elyaf keçe+PPS matris sütunu aslında alüminyum levhaya bitişik iki kompozit katman boyunca oluşmaktadır. Her üç



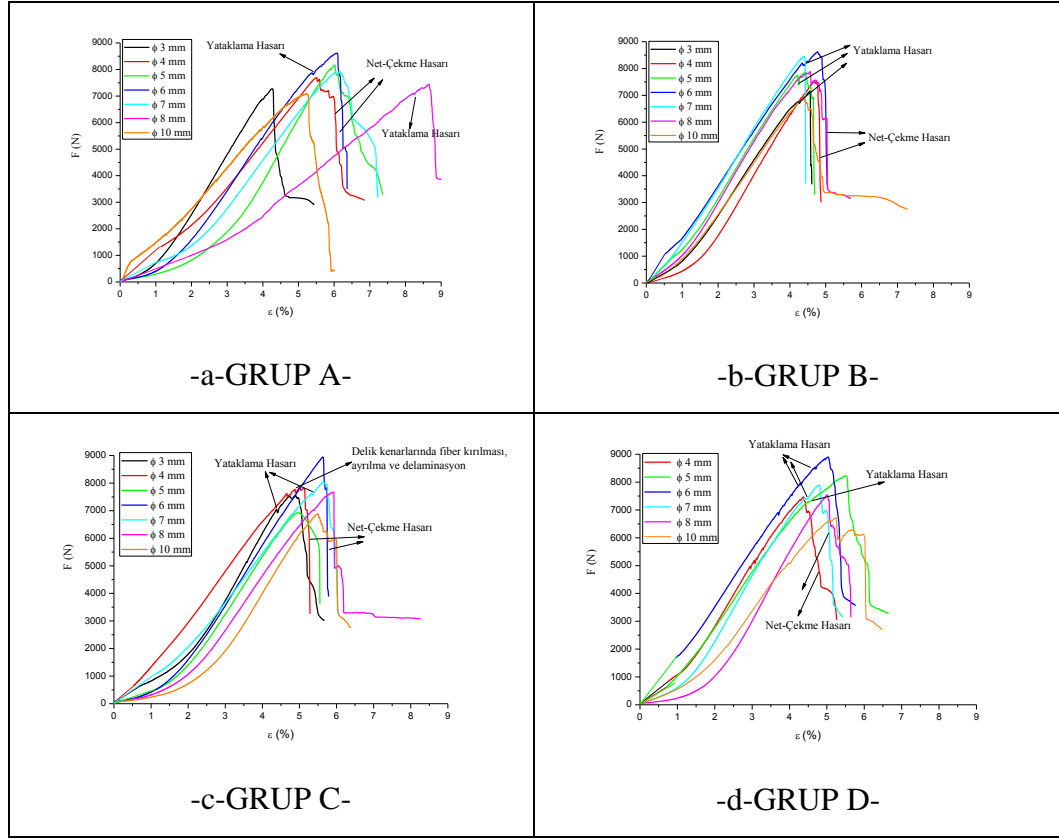
dizilim içinde cam elyaf keçe+PPS matris sütunlarının oluştuğu ve oluşan sütunların kesilmeye zorlandığı gözlemlenmiştir

#### **4.6.4. $\phi 3$ mm, $\phi 4$ mm, $\phi 5$ mm, $\phi 6$ mm, $\phi 7$ mm, $\phi 8$ mm ve $\phi 10$ mm delik çaplarında, 4 farklı delik diziliminde matkapla delinmiş yüzeyi iyileştirilmiş alüminyum levhalar içeren fiber metal tabakalı kompozitlerin mekanik+adhezif yapışma bağlantı dayanımlarının çekme testleri ile belirlenmesi**

4/3 konfigürasyonunda iki farklı delik çapında ( $\phi 3$  mm ve  $\phi 5$  mm) ve üç farklı delik dizilimine sahip yüzeyi iyileştirilmiş ve iyileştirilmemiş FMT numunelerin çekme yüklemesi sonucunda elde edilen alüminyum levha ile cam elyaf keçe-PPS matris ara yüzey dayanımının ve oluşan hasar mekanizmalarının açıklanmasından sonra metal/cam elyaf keçe-PPS matris ara yüzeyine delik çapının ve delik diziliminin etkisinin belirlenebilmesi için Bölüm 3.1.8'de Şekil 3.18'de belirtilen 7 farklı çapta ( $\phi 3$  mm,  $\phi 4$  mm,  $\phi 5$  mm,  $\phi 6$  mm,  $\phi 7$  mm,  $\phi 8$  mm,  $\phi 10$  mm) ve 4 farklı delik formasyonunda (A, B, C ve D) delik açılmış yüzeyi iyileştirilmiş FMT numuneleri çekme testlerine tabi tutulmuştur. Test edilecek ikinci çekme test numunelerinin boyutları ilk FMT test numuneleri ile aynı olmakla beraber bu tip numunelerde daha çok çapın ara yüzey dayanımına etkisinin belirlenebilmesi için çekme testleri gerçekleştirilmiştir. Bununla birlikte ikinci tip çekme test numunelerinde sadece yüzeyi iyileştirilmiş alüminyum levhalar içeren FMT numunelerine çekme testleri uygulanmıştır.

Şekil 4.36'da 7 farklı çapta ( $\phi 3$  mm,  $\phi 4$  mm,  $\phi 5$  mm,  $\phi 6$  mm,  $\phi 7$  mm,  $\phi 8$  mm,  $\phi 10$  mm) ve 4 farklı delik formasyonunda (A, B, C ve D) delik açılmış yüzeyi iyileştirilmiş FMT numunelerinin Kuvvet-% genleme eğrileri verilmiştir. 4 farklı delik formasyonu içinde maksimum kuvvet değerlerinin  $\phi 6$  mm delikli FMT numunelerde olduğu tespit edilmiştir.  $\phi 6$  mm delik çapına kadar ara yüzey dayanım değerlerinde gözle görülür bir artış yaşanırken, delik çapının  $\phi 6$  mm'den fazla olması durumunda delikler arası mesafe çok azaldığı için net-çekme hasarının ortaya çıkarak metal katı ile cam elyaf keçe+PPS matris ara yüzey dayanımının ciddi bir şekilde düştüğü belirlenmiştir (Şekil 4.36). Bir önceki çekme testlerinden delik çapının

$\phi 3\text{mm}$ 'den  $\phi 5\text{ mm}$ 'ye çıkması ile ara yüzey dayanım değerlerinin yükseldiği belirlenmişti burada elde edilen deneysel sonuçlarda delik çapının  $\phi 6\text{ mm}$  delik çapına kadar arttırılması ile maksimum ara yüzey dayanımı elde edileceğini göstermiştir. Her iki genel çekme FMT numuneleri birbiri ile örtüştüğü saptanmıştır.



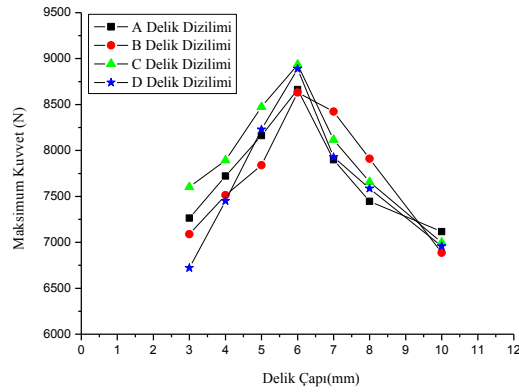
Şekil 4.36: 7 farklı çapta ( $\phi 3\text{ mm}$ ,  $\phi 4\text{ mm}$ ,  $\phi 5\text{ mm}$ ,  $\phi 6\text{ mm}$ ,  $\phi 7\text{ mm}$ ,  $\phi 8\text{ mm}$ ,  $\phi 10\text{ mm}$ ) ve 4 farklı delik formasyonunda (A, B, C ve D) delik açılmış yüzeyi iyileştirilmiş FMT numunelerinin kuvvet-% genleme eğrileri

Delik formasyonları karşılaştırılacak olursa, deliklerin çekme eksenine dik konumda daha fazla olması hallerinde (A ve C) FMT numunelerin daha fazla uzama gösterdiği bununla birlikte D delik diziliminin B delik dizilimine göre çekme eksenine dik konumda deliklerinin bulunması nedeniyle uzama değerlerinde yine artışa sebebiyet verdiği tespit edilmiştir. A ve B delik dizilimlerine sahip numunelerin uzama değerleri karşılaştırılacak olursa A delik diziliminde numunenin enine kesitinde daha fazla delik bulunması nedeniyle uzama değerlerinde bir artış gözlenirken, delik sayısının iki katına çıktığı delik dizilimde (C) ise uzama değerlerinde bir azalmanın olduğu belirlenmiştir. Bunun nedeninin ara yüzeyde bulunan çekme eksenine paralel yöndeki (boyuna delikler) deliklerin varlığıdır. Plakadaki enine deliklerin numunenin

uzama değerlerini arttırdığı bununla birlikte boyuna deliklerin ise uzama değerlerini düşürdüğü gözlenmiştir (Şekil 4.36-a, b ve c). Delik diziliminin D şeklinde olduğu FMT numunelerde ise eşkenar dörtgen formasyonunun etkisi ile B delik dizilimine göre uzama değerlerinde artış yaşanırken, C delik dizilimine sahip numunelere göre bir azalma yaşandığı saptanmıştır (Şekil 4.36-b, c ve d).

Şekil 4.36'dan ayrıca FMT numunelerde oluşan hasar mekanizmaları saptanacak olursa, üç tip genel hasar mekanizması göze çarpmaktadır. Bunlar; yük taşıması hasarı, net-çekme hasarı ve azda olsa delik kenarlarında fiber kırılması, ayrılma ve delaminasyon tipi hasarlardır. Genel anlamda diğer çekme numunelerinde saptanan hasar mekanizmaları ile örtüşsede yük taşıması hasarının oluşumunda artışın yaşandığı tespit edilmiştir.

Şekil 4.36'da belirtilen kuvvet-% genleme eğrileri temel alınarak Şekil 4.37'de 4 farklı delik dizilimi için delik çapına bağlı olarak maksimum kuvvet değerlerindeki değişim gösterilmiştir.



Şekil 4.37: 4 farklı delik dizilimi için delik çapına bağlı olarak maksimum kuvvet değerlerindeki değişim

Maksimum kuvvet değerleri Şekil 4.37'den incelenecek olursa, C delik dizilime sahip numunelerin ara yüzey dayanımının en yüksek çıktığı görülmektedir. Delik dizilimlerinde enine delik sayısının fazla olduğu hallerde (D delik dizilimi hariç) kuvvet değerlerinde artışın gözleendiği bunun nedeninin ise çekme doğrultusuna dik deliklerin kesilmeye çalışılması nedeniyle ortaya çıkan kesilme enerjisidir.

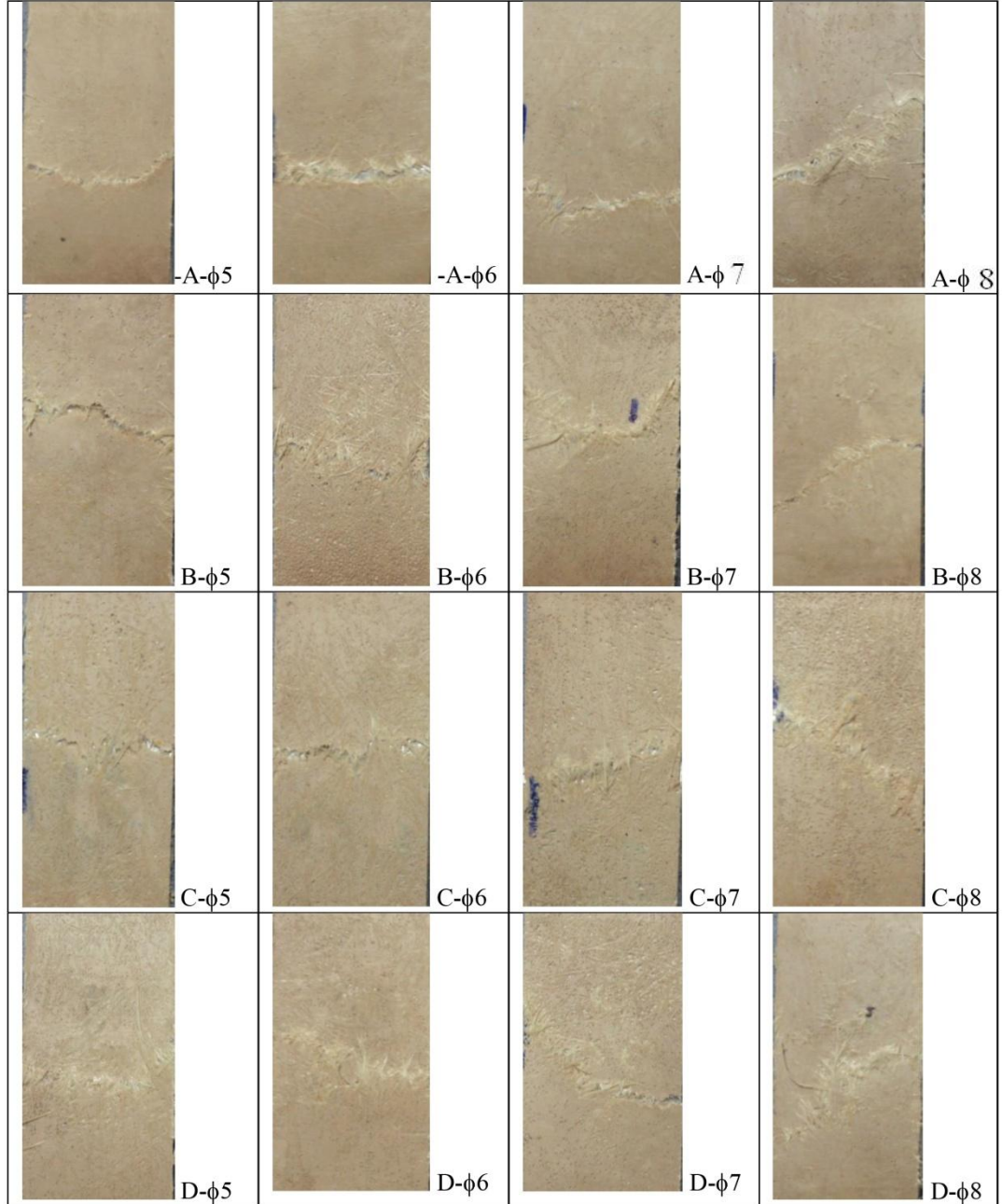
Numuneyi hasara uğratmaya çalışan çekme kuvvetinin belli bir kısmının enine deliklerde karşılanması ile kuvvet değerlerinde artış meydana geldiği düşünülmektedir. D delik diziliminde kuvvet değerlerindeki azalmanın nedeni ise yine eşkenar dörtgen delik dizilimi nedeniyle özellikle  $\phi 7$  mm,  $\phi 8$  mm ve  $\phi 10$  mm delikli FMT numunelerde delikler arası mesafenin ve W/D oranının azalmasından kaynaklanmaktadır.  $\phi 5$  mm ve  $\phi 6$  mm delikli D delik dizilimlerinde ise kuvvet değerlerinde diğer dizilimlere göre ciddi bir artış gözlenmiştir (Şekil 4.37). Bunun sebebinin ise delik formasyonu nedeniyle delikler bölgesindeki kuvvet çizgilerinin daha düzgün dağılması nedeniyle ortaya çıktığı düşünülmektedir.

Saptanan bir diğer sonuç ise Şekil 4.28-b’de belirtilen ağırlıkça % 2  $\gamma$ -GPS ile yüzeyi iyileştirilmiş deliksiz FMT numunelerin maksimum kuvvet değerlerine göre her dört dizilime sahip FMT numunelerin her delik çapı için daha yüksek çıktığı gözlenmiştir. Bu da alüminyum levha ile cam elyaf keçe-PPS matris katmanları arasında oluşturulan cam elyaf keçe+PPS matris sütunlarının ara yüzey dayanımına pozitif yönde katkı sağladığının bir diğer göstergesidir.

#### **4.6.5. $\phi 3$ mm, $\phi 4$ mm, $\phi 5$ mm, $\phi 6$ mm, $\phi 7$ mm, $\phi 8$ mm ve $\phi 10$ mm delik çaplarında, 4 farklı delik diziliminde matkapla delinmiş yüzeyi iyileştirilmiş alüminyum levhalar içeren fiber metal tabakalı kompozitlerde çekme testleri sonrası oluşan hasar mekanizmalarının tespiti**

Şekil 4.38’de 4 farklı çapta ( $\phi 5$  mm,  $\phi 6$  mm,  $\phi 7$  mm,  $\phi 8$  mm) ve 4 farklı delik formasyonunda (A, B, C ve D) delik açılmış yüzeyi iyileştirilmiş FMT numunelerinin dijital kamera ile hasar bölgelerin çekilmiş resimleri gösterilmiştir. Şekil 4.38’den genel olarak, 4 farklı delik diziliminde de  $\phi 5$  mm ve  $\phi 6$  mm deliklere sahip FMT numunelerin kompozit katmanlarında oluşan tabaka ayrılması hasarının hasar açısının yükleme doğrultusuna yaklaşık dik olduğu belirlenmiştir. Ayrıca delik çapının  $\phi 7$  mm olması ile birlikte ayrılma hasar açısının yükleme eksenine göre dikliğini kaybettiği ve yaklaşık  $15^{\circ}$ - $30^{\circ}$  olduğu, artan delik çapı ile ( $\phi 8$  mm) açının maksimum değere ulaştığı yaklaşık  $45^{\circ}$ - $60^{\circ}$  saptanmıştır. Numune yüzeylerinden alınan fotoğraflama işleminden sonra hasarlanan kompozit katman kaldırılıp

alüminyum levhada oluşan hasar mekanizmaları tespit edilmek istendiğinde alüminyum levhaların A, B ve C delik dizilimlerinde enine delikler boyunca kesildiği, D delik dizilimine sahip numunelerin ise eş kenar dörtgen profili nedeniyle ilk önce enine kesitteki delik boyunca kesilme hasarının olduğu daha sonra hasarın ilerleyerek boyuna kesitteki deliği etkilediği saptanmıştır.



Şekil 4.38: 4 farklı çapta ( $\phi 5$  mm,  $\phi 6$  mm,  $\phi 7$  mm,  $\phi 8$  mm) ve 4 farklı delik formasyonunda (A, B, C ve D) delik açılmış yüzeyi iyileştirilmiş FMT numunelerinin dijital kamera ile hasar bölgelerin çekilmiş resimleri

## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

### 5.1. Sonuçlar

#### 5.1.1. DTK analizlerinden elde edilen sonuçlar

Sıcak pres tekniği ile üretilen cam elyaf keçe takviyeli PPS kompozitin ve fiber metal tabakalı kompozitin matris malzemesi olan işleme maruz bırakılmamış toz halindeki PPS polimerinin kristalinite, camsı geçiş sıcaklığı ve erime sıcaklığı değerlerinin saptanabilmesi için TA Instruments marka Q200 DTK test cihazı ile incelemeler yapılmıştır. Yapılan incelemelerden toz halindeki PPS polimerinin camsı geçiş sıcaklığının 87.01 °C olduğu saptanmıştır. Polimer malzemenin erime sıcaklığının ise 286.58 °C olduğu saptanmıştır. Polimer malzemenin kristallerinin tamamen erimesi için harcanan enerji miktarının 1 gr polimer malzeme için 55.20 J olduğu saptanmıştır. 5 farklı sıcaklıkta yapılan DTK analizlerinden polimer malzemenin kristallerinin tamamen erimesi için harcanan enerji değerinin en yüksek 340°C’ de ,50.75 J/gr, olduğu tespit edilmiştir. Sonuçlar göstermektedir ki saf PPS’nin özelliklerine en yakın özelliklere sahip malzeme 340 °C’de pişirilmiş PPS’dir. Bu bağlamda cam keçe takviyeli PPS ve fiber metal tabakalı kompozitlerinin üretim sıcaklığı olarak 340°C’nin kullanılmasına karar verilmiştir.

75 °C’de 24 saat etüvde kurutulmuş toz halindeki PPS polimerinin camsı geçiş sıcaklığı, erime sıcaklığı ve polimer malzeme için kristallerinin tamamen erimesi için harcanan enerji miktarının arttığı tespit edilmiştir. Etüvde bekletilen toz halindeki PPS malzemesinin camsı geçiş sıcaklığı, erime sıcaklığı ve kristallerinin tamamen erimesi için harcanan enerji miktarının polimer malzeme için değerleri sırasıyla 92.54 °C, 287.70 °C ve 57.36 J/g olduğu görülmüştür. Sıcak pres üretim prosesine göre etüvde kurutulmuş toz halindeki PPS polimerine DTK analizi yapılmış elde edilen sonuçlardan PPS polimerinin kristallerinin tamamen

erimesi için harcanan enerji miktarı değerlerinde hızlı bir düşüş yaşandığı ve malzemenin kristallenme derecesinin düştüğü gözlenmiştir.

### **5.1.2. Polimer matrisli kompozitlere uygulanan düşük hızlı düşen ağırlık darbe testlerinden elde edilen sonuçlar**

Sıcak pres tekniği ile üretilmiş olan cam elyaf keçe takviyeli PPS kompozitlerinin darbe dayanımlarını, penetrasyon derinliklerini, hasara uğrayacakları düşme enerjisini ve enerji absorbe mekanizmalarını belirlemek için düşük hızlı düşen ağırlık darbe testleri uygulanmıştır. Düşük hızlı düşen ağırlık darbe deneylerinde, farklı çaptaki ve farklı biçimdeki her darbe ucu için cam elyaf keçe takviyeli PPS kompozit numunelerin matris çatlama hasarı eşik değerinden tam penetrasyon eşik değerine kadarki enerji seviyeleri tespit edilmiştir.

Kuvvet-zaman grafiklerinden genel olarak düz uçlarla gerçekleştirilen darbe deneylerinde kompozit numunelerin daha yüksek kuvvet değerlerine ulaştığı gözlenmiştir. Düz darbe uçları ile yapılan deneylerde daha yüksek pik kuvveti değerleri elde edilirken, uç keskinleştikçe (konik uç) daha uzun süre temas sağlandığı saptanmıştır. Yapılan çalışmada yarı küresel ucun düz uca göre az da olsa oval olması pik kuvvetin daha düşük çıkmasına sebep olmuştur.  $\phi 5$  mm,  $\phi 7$  mm ve  $\phi 10$  mm her iki darbe uç biçimi ile yapılan deneylerde artan darbe enerjisi ile ana hasar mekanizmasının matris çatlağından delaminasyon hasarına dönüştüğü saptanmıştır. Düz ve yarıküresel uç için artan uç çapı ile kompozit numuneyi tam penetrasyon hasarına uğratabilmek için gerekli darbe enerjisinin arttığı saptanmıştır.

Farklı çaplardaki düz ve yarı küresel uçlarla yapılan darbe deneylerinin sonucunda elde edilen geri gelme ve absorbe enerjileri kıyaslanacak olursa, aynı darbe enerji seviyelerinde her farklı çaptaki darbe ucu için geri gelme enerji değerlerinin düz darbe uç ile deformasyona uğratan kompozit malzemelerde daha yüksek çıktığı gözlenmiştir. Absorbe enerji değerleri kıyaslandığında ise yarı küresel uç ile deformasyona uğrayan kompozit malzemelerin absorbe enerjilerinin daha yüksek çıktığı görülmüştür. Kuvvet-yer değiştirme eğrilerinden ise her iki darbe ucu geometrisi için artan darbe ucu çapı ile numuneyi hasara uğratabilecek darbe enerjisinin

arttığı ve artan darbe enerjisi ile darbe ucunun yer değiştirmesinin arttığı görülmüştür.

Sıcak pres tekniği ile üretilen cam elyaf keçe takviyeli PPS kompozitlerinin düşük hızlı düşen ağırlık darbe testleri sonucunda oluşan hasar mekanizmaları bilgisayarlı tomografi yöntemi ile belirlenmiştir. Genel olarak delaminasyon hasarı, fiber burkulması, darbe ucunun batması nedeniyle fiberlerin yönlenmesi, artan darbe enerjisi ile her iki darbe ucu geometrisinde de kompozit numunelerin alt yüzeyinde çekme gerilmesi nedeni fiber kırılmaları hasarlanmaları tespit edilmiştir. Darbe ucunun yarı küresel olması nedeni ile kompozit numunenin alt yüzeyindeki hasar bölgesi çapının daha büyük olduğu tespit edilmiştir. Düz darbe ucu ile hasarlanmış kompozit numunelere göre alt yüzey bölgesindeki fiber kırılması hasarlarının daha geniş bir bölgede olduğu saptanmıştır. Aynı darbe enerji seviyeleri için yarı küresel darbe ucu ile gerçekleştirilen darbe yüklemelerinde darbe ucunun numuneye daha fazla battığı ve hasar bölgesinin daha yayvan bir şekilde olduğu tespit edilmiştir.

### **5.1.3. Fiber metal tabakalı kompozitlere uygulanan düşük hızlı düşen ağırlık darbe testlerinden elde edilen sonuçlar**

Sıcak pres tekniği ile üretilen yüzeyi iyileştirilmiş ve iyileştirilmemiş tüm yüzeyi delikli ve yüzeyi iyileştirilmemiş bölgesel delikli alüminyum levhalar içeren fiber metal tabakalı kompozitlerin darbe dayanımları  $\phi 10$  mm yarı küresel ve düz darbe uçları ile düşük hızlı düşen ağırlık darbe testleri ile belirlenmiştir.

#### **5.1.3.1. Yüzeyi iyileştirilmemiş bölgesel delikli alüminyum levha takviyeli fiber metal tabakalı kompozitlerin darbe davranışları**

Alüminyum levhalara sıcak pres üretiminden önce açılan bölgesel deliklerin delik çaplarının büyümesi ile maksimum kuvvet değerlerinde her iki darbe ucu içinde artış meydana geldiği saptanmıştır. Alüminyum levha yüzeylerindeki bölgesel deliklerin delik çapının artması ile numune metal/cam elyaf keçe+PPS matris ara yüzeyinde oluşturulmak istenen mekanik bağlantının daha geniş bir bölgede olduğu bununda maksimum kuvvet değerlerini arttırdığı belirlenmiştir. Bununla birlikte tam



penetrasyon hasarının oluştuğu darbe enerji değerlerinin ise döz darbe ucu ile hasara uğratılan numuneler için delik çapının büyümesiyle arttığı, yarı küresel darbe ucu ile hasarlanan numunelerde ise azaldığı belirlenmiştir.

φ 10 mm döz ve yarı küresel darbe uçları ile hasarlanan polimer matrisli kompozit numunelerin tam penetrasyon için gerekli darbe enerjileri ile kıyaslanacak olursa, bölgesel delikli fiber metal tabakalı kompozitlerin tam penetrasyon hasarı için gerekli darbe enerji seviyelerinin gözle görülür bir şekilde azaldığı görölmektedir. Benzer durum maksimum kuvvet değerleri için de geçerlidir. Buda bölgesel delikli fiber metal tabakalı kompozit numunelerde darbe ucunun etkidiği bölgedeki metal/cam elyaf keçe-PPS matris arayüzeyinde oluşturulan mekanik bağlantının numunenin darbe dayanımına olumlu katkıda bulunmasına rağmen yeterli olmadığının göstergesidir. Deliksiz bölgedeki yüzeyi iyileştirilmemiş alüminyum yüzeyinde cam elyaf keçe ve toz halindeki PPS polimeri üretim esnasında tutunamayıp yapışma sağlayamadığı için darbe yüklemesi sonrası numune ara yüzeyinde oluşan bölgesel hasarlar yapışmayan metal/cam elyaf keçe+PPS matris ara yüzeyinden ilerleyerek daha düşük darbe enerji seviyelerinde numunenin hasarlanmasına neden olduğu tespit edilmiştir. Bölgesel delikli fiber metal tabakaların absorbe enerji değerlerindeki değişim incelenecek olursa, her iki darbe ucu içinde alüminyum levha yüzeylerindeki deliklerin delik çaplarının artması ile genel olarak aynı darbe enerjisi seviyeleri için absorbe enerji değerlerinin azaldığı saptanmıştır. Mekanik bağlantı bölgesinin yarı küresel darbe ucunda daha hızlı bir şekilde aşılması nedeniyle zayıf metal/cam elyaf keçe+PPS matris ara yüzeyi boyunca darbe hasarının ilerlediği bununda numunenin absorbe enerji değerlerini aynı darbe enerji seviyeleri için daha yüksek çıkmasına neden olduğu belirlenmiştir.

Polimer matrisli kompozitlerdeki darbe ucunun toplam yer değiştirme miktarının darbe enerjisine göre değişiminden farklı olarak, fiber metal tabakalı kompozitlerde yapı içerisindeki alüminyumun sünek davranışı nedeniyle tam penetrasyon için gerekli toplam yer değiştirme miktarının arttığı gözlenmiştir. Gerçekleştirilen darbe deneylerinde her darbe ucu için artan darbe enerji seviyesi ile alüminyum levhalarda uzama ve yırtılma miktarının arttığı saptanmıştır. Alüminyum levha yüzeylerine açılan deliklerin delik çapları kıyaslanacak olursa, her iki darbe ucu içinde delik

çapının artması ile darbe ucunun toplam yer değiştirme miktarının azaldığı, oluşturulan mekanik bağlantının metal/cam elyaf keçe+PPS matris ara yüzeyinde daha iyi tutunma sağlayarak darbe ucunun daha az batmasına yol açtığı saptanmıştır.

### **5.1.3.2. Yüzeyi iyileştirilmiş ve iyileştirilmemiş alüminyum levha takviyeli fiber metal tabakalı kompozitlerin darbe davranışları**

Her iki delik çapı içinde ( $\phi$  4mm ve  $\phi$  6mm tüm yüzeyi delikli) yüzey iyileştirme işlemlerinin alüminyum levhalara uygulanması ile maksimum kuvvet değerlerinde artış yaşandığı gözlenmiştir. Bununla birlikte alüminyum levha yüzeylerindeki deliklerin delik çapının artması ile maksimum kuvvet değerlerinin arttığı saptanmıştır. Alüminyum levha yüzeylerine delik delme işleminden sonra yapılan yüzey iyileştirme işlemlerinin ve alüminyum levha yüzeylerine açılan deliklerin delik çaplarının artmasının fiber metal tabakalı kompozitlerin metal/cam elyaf keçe+PPS matris ara yüzey dayanımını iyileştirdiği fakat ara yüzey bölgesinde oluşturulan mekanik bağlantının daha etkin rol oynadığı gözlemlenmiştir.

Polimer matrisli ve bölgesel delikli fiber metal tabakalı kompozitlere benzer hasar mekanizmalarının ortaya çıktığı belirlenmiştir. Düşük darbe enerjilerinde matris çatlaması hasarının etkin olduğu, darbe enerji seviyelerinin artması ile matris çatlaması hasarlarının birleşerek delaminasyon hasarına yol açtığı gözlenmiştir. Burada belirtilmesi gereken diğer bir hususta metal/cam elyaf keçe+PPS ara yüzeyinde oluşturulan cam elyaf keçe+PPS matris sütunlarının darbe esnasında kesilme hasarıdır. Cam elyaf keçe+PPS matris sütunlarının darbe esnasında kesilme hasarı tüm sütunlarda gözlenmemesine rağmen uygulanan darbe enerjisinin bir kısmının sütunların kesilmesine harcadığı için bölgesel delikli fiber metal tabakalı kompozitlere göre daha yüksek darbe enerji seviyelerine numunelerin dayanmasını sağladığı belirlenmiştir.

Düz darbe ucu ile hasarlanan numunelere benzer olarak  $\phi$  10 mm yarı küresel darbe ucu ile düşük hızlı darbe yüklemelerine maruz bırakılan tüm yüzeyi delikli yüzeyi iyileştirilmiş ve iyileştirilmemiş fiber metal tabakalı kompozit numunelerdeki deliklerin delik çapının artması ve yüzey iyileştirme işlemlerinin alüminyum levha

yüzeylerine uygulanması ile maksimum kuvvet değerlerinin arttığı bununla birlikte yarı küresel darbe ucu formasyonu nedeniyle maksimum kuvvet değerlerinin düz darbe ucu ile hasarlanmış numunelere göre aynı darbe enerji seviyelerinde daha düşük çıktığı belirlenmiştir. Düz darbe ucu ile hasarlanan numunelerden farklı olarak  $\phi$  10 mm yarı küresel darbe ucu ile hasarlanan fiber metal tabakalı numunelerde tam penetrasyon hasarının olduğu darbe enerji seviyesinin yüzey iyileştirme işlemleri ile arttığı gözlenmiştir.

$\phi$  10 mm düz ve yarıküresel darbe uçları ile gerçekleştirilen düşük hızlı darbe yüklemeleri sonucu tüm yüzeyi delikli fiber metal tabakalı kompozit numunelerde oluşan hasar mekanizmaları belirtilecek olursa, ana hasar mekanizmalarının matris çatlama, delaminasyon hasarı, darbe ucu bölgesinde batma ve tabakaların kesilmesi, cam elyaf keçe+PPS matris sütunlarının kesilmesi, kompozit tabakanın arka yüzeyinde şişme ve çekme nedenli fiber kırılmaları ve alüminyum levhaların sünenek yırtılması olarak ortaya çıktığı gözlenmiştir.

$\phi$  10 mm düz darbe ucu ile gerçekleştirilen düşük hızlı darbe yüklemeleri sonucu tüm yüzeyi delikli yüzeyi iyileştirilmiş ve iyileştirilmemiş fiber metal tabakalı kompozit numunelerin Kuvvet-Yer değiştirme grafiklerinden alüminyum levhalara uygulanan yüzey iyileştirme işlemleri sayesinde metal/cam elyaf keçe+PPS matris ara yüzeyinde oluşturulan adeziv yapışma ve delik formasyonu ile sağlanan mekanik bağlantı ile darbe ucunun yer değiştirme miktarının düştüğü, yer değiştirme miktarının düşmesi ile numunenin aynı darbe enerjisi seviyesi için daha yüksek darbe dayanımı gösterdiği saptanmıştır. Bu sayede tüm yüzeyi delikli yüzeyi iyileştirilmiş ve iyileştirilmemiş fiber metal tabakalı kompozitlerin tam penetrasyona uğrama darbe enerji seviyelerinin arttığı belirlenmiştir.

$\phi$  10 mm yarı küresel darbe ucu ile gerçekleştirilen düşük hızlı darbe yüklemeleri sonucu tüm yüzeyi delikli yüzeyi iyileştirilmiş ve iyileştirilmemiş fiber metal tabakalı kompozit numunelerin Kuvvet-Yer değiştirme grafiklerinden yüzey iyileştirme işlemleri ve alüminyum levha yüzeylerine açılan deliklerin delik çaplarının artması ile darbe ucunun yer değiştirme değerlerinde düşüş yaşandığı

bununla birlikte düz darbe ucuna göre yarı küresel darbe ucunda yer değiştirme değerlerinin aynı darbe enerjisi seviyeleri için daha yüksek çıktığı belirlenmiştir.

Absorbe enerji-darbe enerji değişim eğrilerinden her iki delik çapı içinde yarı küresel darbe ucu ile hasarlanmış yüzeyi iyileştirilmiş ve iyileştirilmemiş numunelerin daha fazla absorbe enerji değerlerine sahip olduğu, yüzey iyileştirme işlemlerine maruz kalan numunelerin ise absorbe enerji değerlerinde azda olsa azalma yaşandığı belirlenmiştir. Yüzey iyileştirme işleminin fiber metal tabakalı numunelere uygulanması ile yüzeyi iyileştirilmemiş numunelere göre daha fazla darbe dayanımı gösterip sadece mekanik bağlantıların darbeye direnç göstermesinin yanında adeziv yapışma sayesinde ara yüzeyde oluşan hasarlanma hızlı bir şekilde ilerleyemediği belirlenmiştir. Düz darbe ucu formasyonu ile hasarlanan numunelerde ise yüzey iyileştirme işlemi ile absorbe enerji değerlerinde yarı küresel darbe ucuna benzer olarak düşüş yaşanmıştır.

Her iki delik çapı içinde düz darbe ucu ile hasarlanan numunelerin geri gelme enerji değerlerinin aynı darbe enerji seviyeleri için yarı küresel darbe uçları ile hasarlanan numunelere göre daha yüksek çıktığı belirlenmiştir. Bununla birlikte yüzey iyileştirme işlemlerinin uygulanması ile geri gelme enerji değerlerinin her iki çap ve her iki uç içinde arttığı saptanmıştır.

Düşük hızlı düşen ağırlık darbe deneylerinde darbe sonrası yüzeyi iyileştirilmiş ve iyileştirilmemiş tüm yüzeyi delikli fiber metal tabakalı kompozit numunelerde oluşan hasar mekanizmalarının tespit edilebilmesi için dijital kamera ile numunelerin darbe uygulanan yüzeylerinden ve arka yüzeylerinden fotoğraflar alınmıştır. Genel olarak yarı küresel darbe ucu ile hasarlanan numunelerde darbe ucu batmasının düz ucla hasarlanan numunelere göre daha az ama yayvan olduğu görülmektedir. Bununla birlikte artan darbe enerjisi seviyesiyle yarı küresel darbe ucu için en üst kattaki kompozit katmanının ve alüminyum levhanın bölgesel olarak çatladığı, düz darbe ucunda ise kompozit ve alüminyum katlarında darbe ucu batması ile birlikte kesilme hasarı oluştuğu belirlenmiştir. Son olarak, tam penetrasyon halinde yarı küresel darbe ucu için, darbe ucu batma çapının arttığı ve üst kattaki alüminyum ve kompozit katmanlarında çatlakların birleşip büyüdüğü gözlenmiştir. Her iki darbe ucu profili

için, uygulanan darbe enerjisi seviyesindeki artış ile numunelerin arka yüzeylerinde oluşan eliptik hasar bölgesi alanının arttığı tespit edilmiştir. Bununla birlikte numunelerde eliptik hasar bölgesinin yarı küresel darbe ucu profilinde daha geniş bir bölgede olduğu gözlenmiştir. Numunelerin arka yüzeylerinde oluşan hasar mekanizması genellikle çekme nedenli burkulma, fiber kırılmaları, alüminyum levhanın sünmesi ve yırtılarak delinmesidir.

#### **5.1.4. Üç nokta eğilme, kısa kiriş kayma dayanımı ve tabakalar arası kayma dayanımı (TAKD) testlerinden elde edilen sonuçlar**

##### **5.1.4.1. Cam elyaf keçe takviyeli PPS kompozitlerinin eğilme modülü ve dayanımlarının üç nokta eğilme test yöntemi ile belirlenmesi**

Sıcak pres tekniği ile üretilen cam elyaf keçe takviyeli PPS kompozitlerinin eğilme davranışları ASTM D790 standardına göre üç nokta eğilme deneyleri ile belirlenmiştir. Cam elyaf keçe takviyeli PPS kompozitin eğilme dayanımı değerlerinin ortalamasının  $231,4028 \text{ N/mm}^2$  olduğu saptanmıştır. Ticona firmasının PPS polimeri için saptadığı eğilme dayanımı değerinin  $130 \text{ N/mm}^2$  olduğu hesaba katılırsa, yaklaşık %25 fiber hacim oranında cam elyaf keçe takviyesi ile PPS polimerinin eğilme dayanımının yaklaşık %78 oranında arttığı tespit edilmiştir. Ayrıca cam elyaf keçe takviyeli PPS kompozit numunelerin ortalama eğilme modülleri değerinin  $9355,317 \text{ N/mm}^2$  olduğu saptanmıştır. Ticona firmasının PPS polimeri için vermiş olduğu eğilme modülü değerinin  $3900 \text{ N/mm}^2$  olduğu hesaba katılırsa yaklaşık %139'luk bir eğilme modülü artışı gözlenmiştir.

Düşük hızlı düşen ağırlık darbe yüklemesine maruz bırakılmış cam elyaf keçe takviyeli PPS kompozit numunelerinin artık eğilme dayanımları ve eğilme modülleri belirlenerek darbe ucu çapı ve darbe ucu şekline göre ilişkilendirilmiştir. Farklı çaptaki düz darbe uçları ile hasarlanmış polimer matrisli kompozit numunelerin 2.bölgesindeki artık eğilme dayanımları ile karşılaştırma yapılacak olursa yarı küresel darbe uçları ile hasarlanmış numunelerin artık eğilme dayanımı değerlerinin daha düşük çıktığı belirlenmiştir. Düz darbe uçları ile hasarlanan numunelerde hasar bölgesinin yaklaşık olarak darbe ucu çapı kadar olması ve bununda artık eğilme

dayanımı değerlerini yarı küresel darbe uçları ile hasarlanmış numunelerinkinden daha yüksek çıkmasına neden olduğu gözlemlenmiştir. Her darbe ucu çapı için, artan darbe enerjisi ile artık eğilme dayanımı değerlerinin her üç bölge içinde azaldığı görülmektedir. Artan darbe enerjisi ile polimer matrisli kompozit numuneler daha fazla enerji absorbe ettikleri ve absorbe edilen enerjilerinde numune içinde darbe hasarlanmasına yol açarak artık eğilme dayanımının azalmasına neden olduğu belirlenmiştir. Düz uçlar ile darbe yüklemesine maruz kalmış numunelerin artık eğilme modülü değerlerinin yarı küresel uçlarla hasarlanmış numunelere göre daha yüksek çıktığı tespit edilmiştir.

#### **5.1.4.2. Ağırlıkça yüzde silan konsantrasyonun fiber metal tabakalı kompozitlerin arayüzey dayanımına etkisinin üç nokta eğilme, kısa kiriş kayma dayanımı ve TAKD testleri ile belirlenmesi**

Gerçekleştirilen üç nokta eğilme testlerinden ağırlıkça % 2 silan konsantrasyonu aşıldığında fiber metal tabakalı kompozit numunelerin dayanım ve modül değerlerinde azalma yaşandığı gözlenmiştir. Fiber metal tabakalı kompozit numunenin maksimum eğilme dayanımı ve modülü değerlerinin % 2 silan konsantrasyonu için sırasıyla yaklaşık 195.06 MPa ve 20929.22 MPa olduğu belirlenmiştir.

Ağırlıkça silan konsantrasyonunun fiber metal tabakalı kompozit numunelerin ara yüzey dayanıma etkisini belirlemek amacı ile üç nokta eğilme testleri yanında kısa kiriş kayma dayanımı ve TAKD testleri de uygulanmıştır. Her iki test yöntemi içinde fiber metal tabakalı kompozit numuneleri için ara yüzey dayanımının maksimum %2 silan konsantrasyonunda olduğu belirlenmiştir. Gerçekleştirilen her iki deneyde saptanan optimum dayanım değerlerinin üç nokta eğilme deney sonuçları ile örtüştüğü grlmştir. ağırlıkça %2 silan ile yüzeyi iyileştirilmiş fiber metal tabakalı kompozitlerin tabakalar arası kayma dayanımı testlerinden elde edilen kayma gerilmesi değerinin ortalama  $19.21 \text{ N/mm}^2$  , kısa kiriş kayma dayanımı deneyi için ise  $23.03 \text{ N/mm}^2$  olduğu belirlenmiştir. Maksimum kuvvet değerlerinin de sırasıyla 1024.52 N ve 1228.32 N olduğu saptanmıştır.

### **5.1.4.3. Farklı toplam delik alanı/kapalı alan (TDA/KA) oranında ve farklı delik çaplarında matkapla delinmiş ve yüzeyi iyileştirilmiş alüminyum levhalar içeren fiber metal tabakalı kompozitlerin mekanik+adhezif yapışma bağlantı dayanımlarının üç nokta eğilme ve TAKD testleri ile belirlenmesi**

Delikli fiber metal tabakalı kompozitlerin üç nokta eğilme test sonuçlarından tüm delik biçimleri için deliksiz fiber metal tabakalı kompozit numunelere göre maksimum gerilme değerlerinin azaldığı,  $\phi$  3 mm delikli numunelerin ise deliksiz fiber metal tabakalı kompozit numunelerin maksimum gerilme değerlerine yaklaştığı görülmüştür. TDA/KA oranı incelendiğinde her üç oran içinde (0.1, 0.085 ve 0.055) en iyi dayanımın  $\phi$  3 mm delikli numunelerde çıktığı saptanmıştır. En düşük dayanım değerlerinin her üç TDA/KA oranında da  $\phi$  5 mm delikli numunelerde olduğu belirlenmiştir.

$\phi$  5 mm delikli numunelerde E/D oranının az olması nedeni ile kompozit numunelerin dayanım değerlerinin düşük çıktığı,  $\phi$  4 mm delikli numunelerin maksimum kuvvet ve maksimum gerilme değerlerinin her üç TDA/KA oranı içinde orta düzeyde çıktığı gözlemlenmiştir. Toplam delik alanı/kapalı alan oranının 0.055 olduğu durum incelenecek olursa deliksiz numunelere göre maksimum gerilme değerlerinin sırası ile %6.57, %3.7 ve %1.53 azaldığı belirlenmiştir.

Delikli fiber metal tabakalı kompozitlerin TAKD test sonuçlarından TDA/KA oranı 0.1 olduğu durumda üç nokta eğilme deneylerinde elde edilen sonuçlara benzer olarak delik çapının azalması ile maksimum kuvvet, maksimum kayma gerilme ve maksimum yüzde uzama değerlerinin arttığı saptanmıştır. Bununla birlikte TDA/KA oranının azalması ile, 0.06 ve 0.03, maksimum kuvvet ve maksimum kayma gerilmesi değerlerinin arttığı gözlenmiştir. Bunun nedeninin ise kesitteki delik sayısının fazla olmasının mekanik yapışmayı artırması beklenirken çentik etkisi nedeni ile dayanımı düşürmesidir. Delik sayısının yani toplam TDA/KA oranının azalması ile maksimum dayanım elde edilmiştir.

Tüm delikli numunelerin deliksiz fiber metal tabakalı kompozit numunelerin maksimum kayma gerilmesi değerlerini aştığı gözlemlenmiştir. 1 numaralı

numunenin deliksiz fiber metal tabakalı kompozit numunenin maksimum kayma gerilmesini %10.83, bunun yanında 2, 3 ve 4 nolu numunelerin ise sırasıyla %40.2, %45.03 ve %62.59 aştığı saptanmıştır.

### **5.1.5. Çekme testleri sonuçları**

#### **5.1.5.1. Ağırlıkça yüzde silan konsantrasyonun metal/cam elyaf keçe+PPS matris ara yüzey dayanımına etkisinin çekme testleri ile belirlenmesi**

Optimum silan konsantrasyonunun saptanabilmesi için deliksiz fiber metal tabakalı kompozit numuneler çekme testlerine tabi tutulmuştur. Gerçekleştirilen testlerden, ağırlıkça %2  $\gamma$ -GPS solüsyonu konsantrasyonu ile yüzeyi iyileştirilmiş alüminyum levhaların metal ile PPS matris-cam elyaf tabakası arasındaki adeziv yapışmayı iyileştirdiği saptanmıştır. Ağırlıkça %2  $\gamma$ -GPS konsantrasyonunda silan yüzey iyileştirmesinin hidroliz olayı ile silan-metal ara yüzey direncine bağlı olarak fiber metal tabakaların delaminasyon direncinin ve yapışma özelliklerinin arttırıldığı tespit edilmiştir.

#### **5.1.5.2. ( $\phi$ 3 mm ve $\phi$ 5 mm) delik çaplarında, 3 farklı delik diziliminde ve iki farklı TDA/KA oranında delinmiş yüzeyi iyileştirilmiş ve iyileştirilmemiş alüminyum levhalar içeren fiber metal tabakalı kompozitlerin mekanik birleştirme+adhezif yapışma bağlantı dayanımlarının belirlenmesi**

Çekme testlerinden genel olarak deliksiz ve yüzeyi iyileştirilmiş FMT numunelerin ara yüzey dayanımlarının tüm delik formasyonları ile geliştirildiği kuvvet değerlerinin artması ile gözlenmiştir. Delikli FMT numuneleri deforme edebilmek için daha fazla kesme enerjisi gerektiği saptanmıştır. Bununla birlikte artan delik sayısı ile FMT numunelerinin % genleme değerlerinin arttığı tespit edilmiştir. Kuvvet-% uzama eğrilerinden dairesel delik formasyonlarının FMT malzemelerinin sünekliğini ve bununla birlikte dayanımını geliştirdiği gözlenmiştir.

Her üç delik dizilimi karşılaştırılacak olursa, A, B ve C, her iki delik çapı içinde B delik dizilimine sahip FMT numunelerin tabakalar arası dayanımının en yüksek



olduđu, en dűşűk tabakalar arası dayanım deęerlerinin ise A delik dizilimine sahip FMT numunelerde olduđu saptanmıřtır. % genleme deęerleri karřılařtırılacak olursa C delik dizilimine sahip FMT numunelerin en fazla uzama gűsterdięi, bunu B ve A delik dizimine sahip FMT numunelerinin izledięi gűzlenmiřtir. A delik diziliminde ise numunelerin her bűlgesinde delik sayısının aynı olması ve kesitin deliksiz kısmının dięer dizilimlere gűre daha az olması nedeniyle en dűşűk % genleme deęerlerinin gűzlendięi belirlenmiřtir. Delik çapının etkisi incelenecek olursa, delik çapının  $\phi$  3 mm'den  $\phi$  5 mm'ye çıkartılması ile her ű delik formasyonu içinde kuvvet deęerlerinin arttıęı tespit edilmiřtir.

B delik tipi için, son kırılma hasarından űnce yaklaşık %95 kritik hasar kuvvetinde kuvvet-% genleme eęrilerinde bir plato gűzlenmiřtir. Delik kenarlarında fiber kırılması, ayrılma ve delaminasyon gibi hasar bařlangıcının varlıęına iřaret etmesidir. Kuvvet-% genleme eęrilerinden gűzlenen dięer bir hasar mekanizması iřse yataklama hasarıdır. Tűm delik formasyonlarında gűzlenen bir hasar mekanizması olup, kuvvet-% genleme eęrilerindeki lineerlięin kaybolduđu ve ilk ani kuvvet dűřűřűnűn gűzlendięi bűlgeyi temsil etmektedir. Son olarak, kuvvet- % genleme eęrilerinden tespit edilen dięer bir hasar mekanizmasıda net-çekme hasarıdır. FMT numunelerin delik kenarlarında oluřan çatlaęın ilerlemesi ile kuvvet deęerlerinde ani dűřűř gűzlenmiřtir. FMT numuneleri gerçekleřen bu tip hasarlanma sonrası daha fazla çekme yűklemesini karřılayamaz hale gelmektedir. Net-ekme hasarının baęlantıdaki yűk-tařıma kapasitesini yıkıcı bir řekilde etkiledięi tespit edilmiřtir. Aęırlıkça %2  $\gamma$  -GPS solűsyonunun űretilen deliksiz FMT numunelerin çekme dayanımlarını iyileřtirdięinin ve bu iyileřtirmenin farklı delik formasyonları ile daha da geliřtirildięi açıklanmıřtır.

Alűminyum levhaları ile cam elyaf keçe-PPS matris ara yűzeyinde oluřturulan cam elyaf keçe+PPS matris sűtűnlarının oluřturduđu mekanik baęlantının, űretilen FMT numunelerin ara yűzey dayanımlarına etkisinin belirlenebilmesi için yűzeyi iyileřtirilmemiř farklı delik formasyonlarına sahip FMT numunelere çekme yűkleme uygulananmıřtır.

Delikli ve yüzeyi iyileştirmemiş FMT numunelerin kuvvet-% genleme eğrilerinden numunelerin ara yüzey dayanımlarının deliksiz ve yüzeyi iyileştirilmiş FMT numunelerin ara yüzey dayanımlarına göre tüm delik formasyonları için daha yüksek çıktığı tespit edilmiştir. Bununla birlikte delikli ve yüzeyi iyileştirilmiş FMT numunelerinin ara yüzey dayanımlarına göre her iki delik çapı içinde A delik tipli TDA/KA=0.06 haricindeki tüm delik formasyonlarında ara yüzey dayanımlarının azaldığı saptanmıştır. % genleme değerleri incelenecek olursa, delikli ve yüzeyi iyileştirilmiş FMT numunelere kıyasla hasara uğramanın gözlemlendiği kuvvet değerlerindeki uzama değerlerinin arttığı bununla birlikte C delik dizilimine sahip numunelerin yüzeyi iyileştirilmiş C delik dizilimine sahip FMT numunelerdeki gibi en fazla uzamaya sahip olduğu belirlenmiştir. Hasar mekanizmaları incelenecek olursa, delikli ve yüzeyi iyileştirilmiş FMT numunelerde çekme yüklemesi nedenli ortaya çıkan hasar mekanizmalarına benzer sonuçlar elde edilmesi rağmen, net-çekme hasarının ana hasar mekanizması olarak ortaya çıktığı saptanmıştır.

Delik çapının artması ile metal ile cam elyaf keçe-PPS matris arayüzey dayanımının arttığı gözlenmiştir. Delik çapının  $\phi$  5 mm olması halinde cam elyaf keçe-PPS matris sütunlarının oluşturduğu mekanik bağlantının daha geniş bir bölgede olması nedeniyle üç delik dizilimi için  $\phi$  3 mm deliklere sahip FMT numunelerin maksimum kuvvet değerlerinin yaklaşık % 5 daha az çıktığı tespit edilmiştir Saptanan diğer bir sonuç ise, yüzeyi iyileştirilmiş delikli numunelerde plakadaki delik sayısının artması ile maksimum kuvvet değerlerinde düşüş gözlenirken, yüzeyi iyileştirilmemiş delikli numunelerde ise delik sayısının artması ile maksimum kuvvet değerlerinde artış meydana geldiği saptanmıştır.

Kuvvet-% genleme eğrilerinin karakteristiğinden tespit edilen hasar mekanizmalarının tespit edilebilmesi için dijital kamera ve optik mikroskop kullanılmıştır. Delikli yüzeyi iyileştirilmiş ve iyileştirilmemiş FMT numunelerin dijital kamera ile çekilen hasar bölgesi fotoğraflarından elde edilen hasar mekanizmaları belirtilmiştir. Ana hasar mekanizmalarının alüminyum levhalar ile kompozit katmanın delaminasyonu, fiber kırılmaları, kompozit katmanın ayrılma hasarı ve alüminyum levhanın delikler boyunca kesilme hasarı olarak ortaya çıktığı gözlenmiştir.

Optik mikroskop incelemelerinden alüminyum levha ile cam elyaf keçe-PPS matris ara yüzeyinde oluşturulması hedeflenen cam elyaf keçe+PPS matris sütunlarının oluştuğu saptanmıştır. Metal levhalar ile kompozit katmanlar arasındaki adhezif yapışmanın yanı sıra, cam elyaf keçe+PPS matris sütunları ile oluşturulan mekanik bağlantı yardımıyla FMT numunelerin tabakalar arası kayma dayanımının arttığı tespit edilmiştir.

#### **5.1.5.3. 7 farklı delik çapında, 4 farklı delik diziliminde matkapla delinmiş ve yüzeyi iyileştirilmiş alüminyum levhalar içeren fiber metal tabakalı kompozitlerin mekanik birleştirme+adhezif yapışma bağlantı dayanımlarının çekme testleri ile belirlenmesi**

Metal/cam elyaf keçe-PPS matris ara yüzeyine delik çapının ve delik diziliminin etkisinin belirlenebilmesi için 7 farklı çapta ( $\phi$  3 mm,  $\phi$  4 mm,  $\phi$  5 mm,  $\phi$  6 mm,  $\phi$  7 mm,  $\phi$  8 mm,  $\phi$  10 mm) ve 4 farklı delik formasyonunda (A, B, C ve D) delik açılmış yüzeyi iyileştirilmiş FMT numuneleri çekme testlerine tabi tutulmuştur.

Kuvvet-% genleme eğrilerinden 4 farklı delik formasyonu içinde maksimum kuvvet değerlerinin  $\phi$  6 mm delikli FMT numunelerde oluştuğu tespit edilmiştir.  $\phi$  6 mm delik çapına kadar ara yüzey dayanım değerlerinde gözle görülür bir artış yaşanırken, delik çapının  $\phi$  6 mm'den fazla olması durumunda delikler arası mesafe çok azaldığı için net-çekme hasarının ortaya çıkarak metal katı ile cam elyaf keçe+PPS matris ara yüzey dayanımının ciddi bir şekilde düştüğü belirlenmiştir.

Delik formasyonları karşılaştırılacak olursa, deliklerin çekme eksenine dik konumda daha fazla olması hallerinde (A ve C) FMT numunelerin daha fazla uzama gösterdiği bununla birlikte D delik diziliminin B delik dizilimine göre çekme eksenine dik konumda deliklerinin bulunması nedeniyle uzama değerlerinde yine artışa sebebiyet verdiği tespit edilmiştir. A ve B delik dizilimlerine sahip numunelerin uzama değerleri karşılaştırılacak olursa A delik diziliminde numunenin enine kesitinde daha fazla delik bulunması nedeniyle uzama değerlerinde bir artış gözlenirken, delik sayısının iki katına çıktığı delik dizilimde (C) ise uzama değerlerinde bir azalmanın olduğu belirlenmiştir. Plakadaki enine deliklerin numunenin uzama değerlerini

arttırdığı bununla birlikte boyuna deliklerin ise uzama değerlerini düşürdüğü gözlenmiştir. Delik diziliminin D şeklinde olduğu FMT numunelerde ise eşkenar dörtgen formasyonunun etkisi ile B delik dizilimine göre uzama değerlerinde artış yaşanırken, C delik dizilimine sahip numunelere göre bir azalma yaşandığı saptanmıştır.

4 farklı çapta ( $\phi$  5 mm,  $\phi$  6 mm,  $\phi$  7 mm,  $\phi$  8 mm) ve 4 farklı delik formasyonunda (A, B, C ve D) delik açılmış yüzeyi iyileştirilmiş FMT numunelerinin dijital kamera ile hasar bölgeleri tespit edilmiştir. Genel olarak, 4 farklı delik diziliminde de  $\phi$  5 mm ve  $\phi$  6 mm deliklere sahip FMT numunelerin kompozit katmanlarında oluşan tabaka ayrılması hasarının hasar açısının yüklemeye doğrultusuna yaklaşık dik olduğu belirlenmiştir. Ayrıca delik çapının  $\phi$  7 mm olması ile birlikte ayrılma hasar açısının yüklemeye eksenine göre dikliğini kaybettiği ve yaklaşık  $15^{\circ}$ - $30^{\circ}$  olduğu, artan delik çapı ile ( $\phi$  8 mm) açının maksimum değere ulaştığı yaklaşık  $45^{\circ}$ - $60^{\circ}$  saptanmıştır.

## 5.2. Öneriler

Gerçekleştirilen çalışmada alüminyum levha yüzeylerine uygulanan yüzey iyileştirme adımlarından sadece silanlamanın optimizasyonu yapılmıştır. Silanlama işleminden önce elektrokimyasal yüzey iyileştirme işlemi metal yüzeylerine uygulanmamıştır. Bundan sonra yapılacak çalışmalarda kimyasal yüzey iyileştirme adımından sonra elektrokimyasal yüzey iyileştirme adımı metal yüzeylerine uygulanıp tüm yüzeyde yaklaşık aynı koruyucu oksit tabakası geliştirilebilir.

Alüminyum levha yüzeylerine açılan delikler matkap tezgahında insan faktörü göz önüne alınarak gerçekleştirilmiştir. Bundan sonraki çalışmalarda matkap tezgahında açılan deliklerin bilgisayar kontrollü cihazlarla insan faktörü olmadan açılması metal yüzeylerinde oluşan çapakların azaltılması ve deliklerin istenilen delik noktasından tam olarak delinmesine yardımcı olacağı düşünülmektedir. Bu sayede FMT malzemesinin ara yüzey dayanımı geliştirilebilir.

## KAYNAKLAR

- [1] <http://www.ito.org.tr/Dokuman/Sektor/1-57.pdf> (Ziyaret Tarihi: 22 Ağustos 2011).
- [2] Sevkat, E., Liaw, B., Delale, F., Raju, B.B., “Drop-Weight Impact of Plain-Woven Hybrid Glass–Graphite/Toughened Epoxy Composites”, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol:40, no: 8, 1090-1110, (2009).
- [3] Yılmaz, T., “Polimer Matrisli Kompozitlerin Pim ile Yük Taşıma Özelliklerinin İncelenmesi”, Doktora Tezi, *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kocaeli, 1-52, (2006).
- [4] Ates, B.H., “Çevresel Etkilerin PPS (Polifenilen sulfid) Kompozitlerin Mekanik Özelliklerine Etkileri”, Yüksek Lisans Tezi, *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kocaeli, 17-51, (2002).
- [5] Bora, M.Ö., “Polimer Kompozitlerin Tekrarlı Darbe Yüklemeleri Altındaki Davranışı”, Yüksek Lisans Tezi, *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kocaeli, 7-9, (2007).
- [6] Mazumdar, S.K., “Composites Manufacturing Materials, Product, and Process Engineering”, *CRC Press LLC*, Dallas-USA, ISBN 0-8493-0585-3, (2002).
- [7] <http://tr.wikipedia.org/wiki/Termoplastikler> (Ziyaret Tarihi: 18 Haziran 2011).
- [8] Vural, C., Mesut, T., “Tabakalı Kompozit Malzemelerin Darbe Davranışı”, *Mühendis ve Makina* 516, (2003).
- [9] Naik, N.K., Sekher, Y.C., Meduri, S., “Damage in Woven-Fabric Composites Subjected to Low-Velocity Impact”, *Composites Science and Technology*, vol:60, no:5, 731-744, (2000).
- [10] Voegesang, L.B., Vlot, A., “Development of Fibre Metal Laminates for Advanced Aerospace Structures”, *Journal of Materials Processing Technology*, vol:103, no:1, 1-5, (2000).
- [11] Aymerich, F., Priolo, P., “Characterization of Fracture Modes in Stitched and Unstitched Cross-Ply Laminates Subjected to Low-Velocity Impact and Compression After Impact Loading”, *International Journal of Impact Engineering*, vol: 35, no: 7, 591-608, (2008).
- [12] Xiao, J.R., Gama, B.A., Gillespie Jr., J.W., “Progressive Damage and Delamination in Plain Weave S-2 Glass/SC-15 Composites Under Quasi-Static Punch-Shear Loading”, *Composite Structures*, vol:78, no: 2, 182-196, (2007).

- [13] Kim, J.K., Sham, M.L., “Impact and Delamination Failure of Woven-Fabric Composites”, *Composites Science and Technology*, vol: 60, no: 5, 745-761, (2000).
- [14] Shyr, T.W., Pan, Y.H., “Impact Resistance and Damage Characteristics of Composite Laminates”, *Composite Structures*, vol: 62, no:2, 193-203, (2003).
- [15] Baucom, J.N., Zikry, M.A., Rajendran, A.M., “Low-Velocity Impact Damage Accumulation in Woven S2-Glass Composite Systems”, *Composites Science and Technology*, vol:66, no:10, 1229-1238, (2006).
- [16] Dear, J.P., Lee, H., Brown, S.A., “Impact Damage Processes in Composite Sheet and Sandwich Honeycomb Materials”, *International Journal of Impact Engineering*, vol:32, no:1-4, 130-154, (2005).
- [17] Hosseinzadeh, R., Shokrieh, M.M., Lessard L., “Damage Behavior of Fiber Reinforced Composite Plates Subjected to Drop Weight Impacts”, *Composites Science and Technology*, vol: 66, no: 1, 61-68, (2006).
- [18] Mitrevski, T., Marshall, I.H., Thomson, R., “The Influence of Impactor Shape on the Damage to Composite Laminates”, *Composite Structures*, vol: 76, no: 1-2, 116-122, (2006).
- [19] Moura, M.F.S.F., Gonçalves, J.P.M., “Modelling the Interaction Between Matrix Cracking and Delamination In Carbon–Epoxy Laminates Under Low Velocity Impact”, *Composites Science and Technology*, vol:64, no: 7-8, 1021-1027, (2004).
- [20] Vogelesang, L.B., Schijve, J., “Fibre Metal Laminates: Damage Tolerant Aerospace Materials”, in: *Case Studies in Manufacturing with Advanced Materials*, Vol. 2, Elsevier, ISBN: 0-444-88934-5, 259-260, (1995).
- [21] Alderliesten, R.C., Benedictus, R., “Fiber/Metal Composite Technology for Future Primary Aircraft Structures”, *48th Aiaa/Asme/Asce/Ahs/Asc Structures, Structural Dynamics and Materials Conference 15<sup>th</sup>*; Honolulu, Hawaii, 1-12, (2007).
- [22] Chang, P.Y., Yeh, P.C., Yang, J.M., “Fatigue Crack Initiation in Hybrid Boron/Glass/Aluminum Fiber Metal Laminates”, *Materials Science and Engineering A* 496, 273–280, (2008).
- [23] Alderliesten, R., “On the Development of Hybrid Material Concepts for Aircraft Structures”, *Recent Patents on Engineering* 3, 25-38, (2009).
- [24] Laliberte´, J.F., Poon, C., Straznicky, P.V., Fahr, A., “Post-Impact Fatigue Damage Growth in Fiber–Metal Laminates”, *International Journal of Fatigue* 24, 249–256, (2002).
- [25] Botelho, E.C., Silva, R.A., Pardini, L.C., Rezende, M.C., “A Review on the Development and Properties of Continuous Fiber/Epoxy/Aluminum Hybrid

Composites for Aircraft Structures”, *Materials Research Bulletin*, vol: 9, no: 3, 247–56, (2006).

[26] <http://www.cyttec.com/engineered-materials/fiber-metal-laminates.htm>, (**Ziyaret Tarihi: 14 Mayıs 2011**).

[27] Wu, G., Yang, J.-M., “The Mechanical Behavior of GLARE Laminates for Aircraft Structures”, *JOM*, 72-79, (2005).

[28] Carrilero, M.S., Alvarez, M., Ares, J.E., Astorga, J.R., Cano, M.J., Marcos, M., “Dry Drilling of Fiber Metal Laminates CF/AA2024”, A preliminary study, *Materials Science Forum* 526, 73-78, (2006).

[29] Wu, G., Tan, Y., Yang, J.M., “Evaluation of Residual Strength of Notched Fiber Metal Laminates”, *Materials Science and Engineering A* 457, 338–349, (2007).

[30] Park, S.Y., Choi, W.J., Choi, H.S., Kwon, H., Kim, S.H., “Recent Trends in Surface Treatment Technologies for Airframe Adhesive Bonding Processing: A Review (1995–2008)”, *The Journal of Adhesion* 86, 192–221, (2010).

[31] Guo, Y.J., Wu, X.R., Zhang, Z.L., “Characterization of Delamination Growth Behaviour of Hybrid Bonded Laminates”, *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, vol: 20, no: 12, 1699-1708, (1997).

[32] Davis, M., Bond, D., “Principles and Practices of Adhesive Bonded Structural Joints and Repairs”, *International Journal of Adhesion & Adhesives* 19, 91-105, (1999).

[33] Kolesnikov, B., Herbeck, L., Fink, A., “CFRP/Titanium Hybrid Material for Improving Composite Bolted Joints”, *Composite Structures* 83, 368–380, (2008).

[34] Niu, M.C.Y., “Composite Airframe Structures”, Second published, Hong Kong: *Conmilit Press Ltd.*; 1996.

[35] Kupke, M., Kolax, M., “CFRP-Fuselage – Ensuring Future Competitiveness. In: Material & Process Technology – The Driver for Tomorrow’s Improved Performance”, *Proceeding of the 25th jubilee international SAMPE Europe conference 2004 of the Society for the Advancement of Materials and Process Engineering Paris EXPO*, Porte de Versailles, Paris, 432–437, (2004).

[36] Jackson, P., “Airbus A380, Fixed-Wing Civil. In: Jane’s All the World’s Aircraft 2005-2006”; Ninety Sixth Edition, *Coulsdon, Surrey CRS 2YH, UK*, 241–246, (2005).

[37] Hundley, J.M., Yang, J.M., Hahn, H.T., “Bearing Strength Analysis of Hybrid Titanium Composite Laminates”, *American Institute of Aeronautics and Astronautics*, vol: 46, no: 8, 2074-2085, (2008).

- [38] Slagter, W.J., “On the Bearing Strength of Fiber Metal Laminates”, *Journal of Composite Materials*, vol: 26, no: 17, 2543–2566, (1992).
- [39] Caprino, G., Squillace, A., Giorleo, L., Nele, L., Rossi, L., “Pin and Bolt Bearing Strength of Fiberglass/Aluminum Laminates”, *Composites: Part A* 36, 1307–1315, (2005).
- [40] Meola, C., Squillace, A., Giorleo, G., Nele, L., “Experimental Characterization of an Innovative Glare\_ Fiber Reinforced Metal Laminate in Pin Bearing”, *Journal of Composite Materials*, vol: 37, no: 17, 1543–1552, (2003).
- [41] Van Rooijen, R.G.J., Sinke, J., De Vries, T.J., Van Der Zwaag, S., “The Bearing Strength of Fiber Metal Laminates”, *Journal of Composite Materials*, vol: 40, no: 1, 5–19, (2006).
- [42] Hollmann, K., “Failure Analysis of Bolted Composite Joints Exhibiting In-Plane Failure Modes”, *Journal of Composite Materials*, vol: 30, no: 3, 358–383, (1996).
- [43] Hung, C.L., Chang, F.K., “Strength Envelope of Bolted Composite Joints Under Bypass Loads”, *Journal of Composite Materials*, vol: 30 no: 13, 1402–1435, (1996).
- [44] Oh, J.H., Kim, Y.G., Lee, D.G., “Optimum Bolted Joints for Hybrid Composite Materials”, *Composite Structures*, vol: 38, no: 1–4, 329–341, (1997).
- [45] Camanho, P.P., Matthews, F.L., “Delamination Onset Prediction in Mechanically Fastened Joints in Composite Laminates”, *Journal of Composite Materials*, vol: 33, no: 10, 906–927, (1999).
- [46] Dano, M.L., Gendron, G., Picard, A., “Stress and Failure Analysis of Mechanically Fastened Joints in Composite Laminates”, *Composite Structures* 50, 287–296, (2000).
- [47] Starikov, R., Schön, J., “Quasi-Static Behaviour of Composite Joints with Protruding-Head Bolts”, *Composite Structures* 51, 411–425, (2001).
- [48] Lawlor, V.P., McCarthy, M.A., Stanley, W.F., “An Experimental Study of Bolt-Hole Clearance Effects in Double-Lap, Multi-Bolt Composite Joints”, *Composite Structures* 71, 176–190, (2005).
- [49] Gunjaev, G.M., Shelesina, G.F., Iltshenko, S.I., “Metal Laminates with Aluminium and Titanium Alloys”, *Aviation Materials and Technologies. Moscow: VIAM, Russia*, 50–58, (2002).
- [50] Kolesnikov, B., Herbeck, L., Fink, A., “Fortschrittliche Verbindungstechniken von Faserverbunden”, *In: DGLR-Kongress, Dresden, Band II*, 1419–1428, (2004).



- [51] Hwang, W.J., Park, Y.T., Hwang, W., “Strength of Fiber Reinforced Metal Laminates with a Circular Hole”, *Metals and Materials International*, vol: 11, no: 3, 197-204, (2005).
- [52] Jones, F.R., “Handbook of Polymer-Fiber Composites”, *Longman Scientific and Technical, Polymer Science and Technology Series*, England, ISBN: 0-582-06554-2, (1994).
- [53] Rakow, J.F., Pettinger, A.M., “Failure Analysis of Composite Structures in Aircraft Accidents”, *ISASI 2006 Annual Air Safety Seminar, Cancun, Mexico*, 1-27, (2006).
- [54] Zhao, G.P., Cho, C.D., “Damage Initiation and Propagation in Composite Shells Subjected to Impact”, *Composite Structures* 78, 91–100, (2007).
- [55] Gama, B.A., Gillespie, Jr. J.W., “Punch Shear Based Penetration Model of Ballistic Impact of Thick-Section Composites”, *Composite Structures* 86, 356-369, (2008).
- [56] Azouaoui, K., Rechak, S., Azari, Z., Benmedakhene, S., Laksimi, A., Pluvinage, G., “Modelling of Damage and Failure of Glass/Epoxy Composite Plates Subject to Impact Fatigue”, *International Journal of Fatigue* 23, 877–885, (2001).
- [57] Sınmazçelik, T., Arııcı, A.A., Günay, V., “Impact-Fatigue Behaviour of Unidirectional Carbon Fibre Reinforced Polyetheremide (PEI) Composites”, *Journal of Material Science* 41, 6237–6244, (2006).
- [58] Go´mez-del Ri´o, T., Zaera, R., Barbero, E., Navarro, C., “Damage in CFRPs due to Low Velocity Impact at Low Temperature”, *Composites: Part B* 36, 41–50, (2005).
- [59] Tai, N.H., Yip, M.C., Lin, J.L., “Effects of Low-Energy Impact on the Fatigue Behavior of Carbon/Epoxy Composites”, *Composites Science and Technology* 58, 1-8, (1998).
- [60] Gellert, E.P., Cimpoeru, S.J., Woodward, R.L., “A Study of the Effect of Target Thickness on the Ballistic Perforation of Glass Fibre Reinforced Plastic Composites”, *International Journal of Impact Engineering* 24, 445-456, (2000).
- [61] Caprino, G., Lopresto, V., “On the Penetration Energy for Fibre-Reinforced Plastics Under Low-Velocity Impact Conditions”, *Composites Science and Technology* 61, 65-73, (2001).
- [62] Carrillo, J.G., Cantwell, W.J., “Mechanical Properties of a Novel Fiber-Metal Laminate Based on a Polypropylene Composite”, *Mechanics of Materials* 41, 828-838, (2009).

- [63] Kiratisaevae, H., Cantwell, W.J., “The Impact Response of Aluminum Foam Sandwich Structures Based on a Glass Fiber-Reinforced Polypropylene Fiber-Metal Laminate”, *Polymer Composite*, vol: 25, no: 5, 499-509, (2004).
- [64] Lawcock, G.D., Ye, L., Mai, Y.W., Sun, C.T., “Effects of Fibre/Matrix Adhesion on Carbon-Fibre-Reinforced Metal Laminates – II. Impact Behavior”, *Composites Science and Technology* 57, 1621–1628, (1997).
- [65] Reyes, V.G., Cantwell, W.J., “The Mechanical Properties of Fibre-Metal Laminates Based on Glass Fibre Reinforced Polypropylene”, *Composites Science and Technology* 60, 1085–1094, (2000).
- [66] Afaghi-Khatibi, A., Lawcock, G., Ye, L., Mai, Y.W., “On the Fracture Mechanical Behaviour of Fibre Reinforced Metal Laminates (FRMLs)”, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 185, 173-190, (2000).
- [67] Cepeda-Jiménez, C.M., Alderliesten, R.C., Ruano, O.A., Carreño, F., “Damage Tolerance Assessment by Bend and Shear Tests of Two Multilayer Composites: Glass Fibre Reinforced Metal Laminate and Aluminium Roll-Bonded Laminate”, *Composites Science and Technology* 69, 343–348, (2009).
- [68] Remmers, J.J.C., de Borst, R., “Delamination Buckling of Fibre–Metal Laminates”, *Composites Science and Technology* 61, 2207–2213, (2001).
- [69] Hinz, S., Omoori, T., Hojo, M., Schulte, K., “Damage Characterisation of Fibre Metal Laminates Under Interlaminar Shear Load”, *Composites: Part A* 40, 925–931, (2009).
- [70] Jannerfeldt, G., Törnqvist, R., Rambert, N., Boogh, L., Månson, J.A.E., “Matrix Modification for Improved Reinforcement Effectiveness in Polypropylene/Glass Fibre Composites”, *Applied Composite Materials* 8, 327–341, (2001).
- [71] Ramulu, M. Stickler, P.B., McDevitt, N.S., Datar, I.P., Kim, D., Jenkins, M.G., “Influence of Processing Methods on the Tensile and Flexure Properties of High Temperature Composites”, *Composites Science and Technology* 64, 1763–1772, (2004).
- [72] Reyes, G., Cantwell, W.J., “The Effect of Strain Rate on the Interfacial Fracture Properties of Carbon Fiber-Metal Laminates”, *Journal of Materials Science Letters* 17, 1953-1955, (1998).
- [73] Marannano, G.V., Pasta, A., “An Analysis of Interface Delamination Mechanisms in Orthotropic and Hybrid Fiber-Metal Composite Laminates”, *Engineering Fracture Mechanics* 74, 612–626, (2007).
- [74] Moussavi-Torshizi, S.E., Dariushi, S., Sadighi, M., Safarpour, P., “A Study on Tensile Properties of a Novel Fiber/Metal Laminates”, *Materials Science and Engineering A* 527, 4920–4925, (2010).

- [75] Iaccarino, P., Langella, A., Caprino, G., “A Simplified Model to Predict the Tensile and Shear Stress–Strain Behaviour of Fibreglass/Aluminium Laminates”, *Composites Science and Technology* **67**, 1784–1793, (2007).
- [76] Corté's, P., Cantwell, W.J., “Fracture Properties of a Fiber-Metal Laminates Based on Magnesium Alloy”, *Journal of Materials Science* **39**, 1081 – 1083, (2004).
- [77] Mathivanan, P., Balakrishnan, M., Krishnan, H., “Metal Thickness, Fiber Volume Fraction Effect on the Tensile Properties, Debonding of Hybrid Laminates”, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, **vol: 29, no: 14**, 2128-2140, (2010).
- [78] Krimbalis, P.P, Poon, C., Behdinin, K., Fawaz, Z., “On the Pin Bearing Behavior of Orthotropic Fiber Metal Laminates”, *Journal of Composite Materials*, **vol: 42, no: 15**, 1547-1566, (2008).
- [79] Khalili, S.M.R., Mittal, R.K., Kalibar, S.G., “A Study of the Mechanical Properties of Steel/Aluminium/GRP Laminates”, *Materials Science and Engineering A* **412**, 137–140, (2005).
- [80] Reyes, G., Kang, H., “Mechanical Behavior of Lightweight Thermoplastic Fiber–Metal Laminates”, *Journal of Materials Processing Technology* **186**, 284–290, (2007).
- [81] Yamashita, T., Kudo, T., Horie, K., Maeda, S., Nagata, K., “Degradation of Sulfur-Containing Aromatic Polymers (II): Change in Fluorescence Spectra of Polyphenylenesulfide (PPS) During Annealing”, *Polymer Degradation and Stability*, **vol: 39, no: 3**, 271-407 (1993).
- [82]<http://tools.ticona.com/tools/mcbasei/producttools.php?sPolymer=PPS&sProduct=FORTRON> (Ziyaret Tarihi: 07 Temmuz 2011)
- [83] Cao, J., Chen, L., “Effect of Thermal Cycling on Carbon Fiber-Reinforced PPS Composites”, *Polymer Composites*, **vol:26, no:5**, 713-716, (2005).
- [84] Roman, T., Din˜o, W.A., Nakanishi, H., Kasai, H., Miyako, Y., Naritomi, M., “PPS-Metal Adhesion: A Density Functional Theory-Based Study”, *Solid State Communications* **132**, 405–408, (2004).
- [85] Critchlow, G.W., Brewis, D.M., “Review of Surface Pretreatments for Aluminium Alloys”, *International Journal of Adhesion and Adhesive*, **vol:16, no: 4**, 255–275, (1996).
- [86] Harris, A.F., Beevers, A., “The Effects of Grit-Blasting on Surface Properties for Adhesion”, *International Journal of Adhesion and Adhesive* **19**, 445–452, (1999).

- [87] Liu, J., Chaudhury, M.K., Berry, D.H., Seeberg, J.E., Osborne, J.H., Blohowiak, K.Y., “Effect of Surface Morphology on Crack Growth at a Sol-Gel Reinforced Epoxy/Aluminium Interface”, *Journal of Adhesives* **82**, 487-516, (2006).
- [88] Rider, A.N., Arnott, D.R., “Boiling Water and Silane Pre-Treatment of Aluminium Alloys for Durable Adhesive Bonding”, *International Journal of Adhesion and Adhesive* **20**, 209–220, (2000).
- [89] Rider, A.N., Olsson-Jacques, C.L., Arnott, D.R., “Influence of Adherend Surface Preparation on Bond Durability”, *Surface and Interface Analysis* **27**, 1055–1063, (1999).
- [90] Prolongo, S.G., Uren, A., “Effect of Surface Pre-Treatment on the Adhesive Strength of Epoxy–Aluminium Joints”, *International Journal of Adhesion & Adhesives* **29**, 23–31, (2009).
- [91] Rider, A.N., “Factors Influencing the Durability of Epoxy Adhesion to Silane Pretreated Aluminium”, *International Journal of Adhesion & Adhesives* **26**, 67–78, (2006).
- [92] Lefebvre, D.R., Ahn, B.K., Dillard, D.A., Dillard, J.G., “The Effect of Surface Treatments on Interfacial Fatigue Crack Initiation in Aluminum/Epoxy Bonds”, *International Journal of Fracture* **114**, 191–202, (2002).
- [93] Brewis, D.M., Critchlow, G.W., “Locus of Failure of T-Peel Joints Formed Between Aluminium and Various Adhesives”, *International Journal of Adhesion & Adhesives* **17**, 33-38, (1997).
- [94] Sang Park, S.Y., Choi, W.J., Choi, H.S., Kwon, H., Kim, S.H., “Effects of Surface Pre-Treatment and Void Content on GLARE Laminate Process Characteristics”, *Journal of Materials Processing Technology* **210**, 1008–1016, (2010).
- [95] Oosting, R., “Toward a New Durable and Environmentally Compliant Adhesive Bonding Process for Aluminum Alloys”, Doktora Tezi, *Delft University of Technology*, Netherlands, (1995).
- [96] Sheasby, P.G., Pinner, R., “The Surface Treatment and Finishing of Aluminium and Its Alloys”, *6th ed. Materials Park, OH: ASM International/Stevenage, Herts, UK: Finishing Publications Ltd.*, (2001).
- [97] Bjorgum, A., Lapique, F., Walmsley, J., Redford, K., “Anodising as Pre-Treatment for Structural Bonding”, *International Journal of Adhesion & Adhesives* **2**, 401–412, (2003).
- [98] Mertens, T., Kollek, H., “On the Stability and Composition of Oxide Layers on Pre-Treated Titanium”, *International Journal of Adhesion & Adhesives* **30**, 466–477, (2010).

- [99] Critchlow, G.W., Yendall, K.A., Bahrani, D., Quinn, A., Andrews, F., “Strategies for the Replacement of Chromic Acid Anodising for the Structural Bonding of Aluminium Alloys”, *International Journal of Adhesion & Adhesives* **26**, 419–453, (2006).
- [100] Fedel, M., Olivier, M., Poelman, M., Deflorian, F., Rossi, S., Druart, M.E., “Corrosion Protection Properties of Silane Pre-Treated Powder Coated Galvanized Steel”, *Progress in Organic Coatings* **66**, 118–128, (2009).
- [101] Abel, M.L., Digby, R.P., Fletcher, I.W., Watts, J.F., “Evidence of Specific Interaction Between  $\gamma$ -Glycidoxypopyltrimethoxysilane and Oxidized Aluminium Using High-Mass Resolution to F-SIMS”, *Surface and Interface Analysis*, *vol: 29, no: 2*, 115-125, (2000).
- [102] Bishopp, A., “Handbook of Adhesives and Sealants”, Amsterdam, *Elsevier*, (2005).
- [103] Kinloch, A.J., Little, M.S.G., Watts, J.F., “The Role of the Interphase in the Environmental Failure of Adhesive Joints”, *Acta Materialia* **48**, 4543–4553, (2000).
- [104] Digby, R.P., Packham, D.E., “Pretreatment of Aluminium: Topography, Surface Chemistry and Adhesive Bond Durability”, *International Journal of Adhesion & Adhesives*, *vol: 15, no: 2*, 61-71, (1995).
- [105] Carrino, L., Napolitano, G., Sorrentino, L., “Wettability Improving of 2024 Aluminium Alloy by Oxygen Cold Plasma Treatment”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* **31**, 465–473, (2006).
- [106] Hadavinia, H., Kinloch, A.J., Little, M.S.G., Taylor, A.C., “The Prediction of Crack Growth in Bonded Joints Under Cyclic-Fatigue Loading I. Experimental Studies”, *International Journal of Adhesion & Adhesives* **23**, 449-461, (2003).
- [107] Vine, K., Cawley, P., Kinloch, A.J., “The Correlation of Non-Destructive Measurements and Toughness Changes in Adhesive Joints During Environmental Attack”, *Journal of Adhesion*, *vol: 77, no: 2*, 125-161, (2001).
- [108] Domingues, L., Fernandes, J.C.S., Da Cunha Belo, M., Ferreira, M.G.S., Guerra-Rosa, L., “Anodising of Al 2024-T3 in a Modified Sulphuric Acid / Boric Acid Bath for Aeronautical Applications”, *Corrosion Science* **45**, 149-160, (2003).
- [109] Zucchi, F., Trabanelli, G., Grassi, V., Frignani, A., “Proceeding of the EUROCORR. 2001”, *Riva del Garda, Italy*, (2001).
- [110] Hobbs, P.M., Kinloch, A.J., “The Computational Molecular Modelling of Organosilane Primers”, *Journal of Adhesion* **66**, 203-228, (1998).
- [111] Lee, N.-J., Jang, J., “The Effect of Fibre Content on the Mechanical Properties of Glass Fibre Mat/Polypropylene Composites”, *Composites Part:A* **30**, 815-822, (1999).

- [112] Thomason, J. L., Vlug, M. A., “ Influence of Fibre Length and Concentration on the Properties of Glass Fibre-Reinforced Polypropylene: 1. Tensile and Flexural Modulus”, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol: 27, no:6, 477-484, (1996).
- [113] <http://composite.about.com/library/glossary/f/bldef-f2200.htm>, (**Ziyaret Tarihi: 07 Temmuz 2011**).
- [114] Wakeman, M.D., Cain, T.A., Rudd, C.D., Brooks, R., Long, A.C., “ Compression Moulding of Glass and Polypropylene Composites for Optimised Macro- and Micro-Mechanical Properties II. Glass-Mat-Reinforced Thermoplastics”, *Composites Science and Technology* 59, 709-726, (1999).
- [115] Bigg, D., Preston, J., “Stamping of Thermoplastic Matrix Composites”, *Polymer Composites* 10, 261-268, (1989).
- [116] Giles, H., Reinhard, D., “Compression Moulding of Polypropylene Glass Composites”, *36th international SAMPE symposium and exhibition, San Diego, California*, 556-570, (1991).
- [117] Ericson, M., Berglund, L., “Deformation and Fracture of Glass-Mat-Reinforced Polypropylene”, *Composites Science and Technology*, vol: 43, no:3, 269-281. (1992).
- [118] Vlasveld, D.P.N., Daud, W., Bersee, H.E.N., Picken, S.J., “Continuous Fibre Composites with a Nanocomposite Matrix: Improvement of Flexural and Compressive Strength at Elevated Temperatures”, *Composites: Part A* 38, 730-738, (2007).
- [119] <http://www.tainstruments.com/product.aspx?id=16&n=1&siteid=11>, (**Ziyaret Tarihi: 14 Temmuz 2011**).
- [120] *ASTM D790*, Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials, (09.01.2007).
- [121] *ASTM D2344/ D2344 M*, Standard Test Method for Short-Beam Strength of Polymer Matrix Composite Materials and Their Laminates, (2006).
- [122] Lawcock, G., Ye, L., Mai, Y.W., Sun, C.T., “The Effect of Adhesive Bonding Between Aluminum and Composite Prepreg on the Mechanical Properties of Carbon-Fiber Reinforced Metal Laminates”, *Composites Science and Technology* 57, 1997, 35-45, (1999).
- [123] *ASTM D7136/D7136M*, Standard Test Method for Measuring the Damage Resistance of a Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composite to a Drop-Weight Impact Event, (10.01.2007).
- [124] Wakeman M.D., Cain, T.A., Rudd, C.D., Brooks, R., Long, A.C., “Compression Moulding of Glass and Polypropylene Composites for Optimised

Macro- and Micro- Mechanical Properties 3. Sandwich Structures of GMTS and Commingled Fabrics”, *Composite Science and Technology* **59**, 1153-1167, (1999).

[125] Boucher, D.T., Fisa, B., Denault, J., Gagnon, P., “Experimental Investigation of Stamp Forming of Unconsolidated Commingled E-Glass/Polypropylene Fabrics”, *Composite Science and Technology* **66**, 555-570, (2006).

[126] Caba, A.C., Loos, A.C., Batra, R.C., “Fiber-Fiber Interactions in Carbon Mat Thermoplastics”, *Composites Part A: applied science and manufacturing* **38**, 469-483, (2007).

[127] Wakeman M.D., Cain, T.A., Rudd, C.D., Brooks, R., Long, A.C., “Compression Moulding of Glass and Polypropylene Composites for Optimised Macro- and Micro- Mechanical Properties- 1. Commingled Glass and Polypropylene”, *Composite Science and Technology* **58**, 1879-1898, (1998).

[128] Nohara, L.B., Nohara, E.L., Moura, A., Gonçalves, M.R.P., Costa, M.L., Rezende, M.C., “Study of Crystallization Behavior of Poly(Phenylene Sulfide)”, *Polimeros:Ciencia e Tecnologia*, **vol:16, no:2**, 104-110, (2006).

[129] Jimbo, T., Asai S., Sumita, M., “Relationship Between Rigid Amorphous Fraction and Structural Changes of Poly(phenylene sulfide) on Thermal Treatment”, *Journal of Macromolecular Science-Physics*, **vol:36, no:3**, 381-394, (1997).

[130] Parlevliet, P.P., Werf, W.A.W., Bersee, H.E.N., Beukers, A., “Thermal Effects on Microstructural Matrix Variations in Thick-Walled Composites”, *Composites Science and Technology* **68**, 896-907, (2008).

[131] Yang, J., Xu, T., Lu, A., Zhang, Q., Tan, H., Fu, Q., “Preparation and Properties of Poly (p-phenylene Sulfide)/Multiwall Carbon Nanotube Composites Obtained by Metl Compounding”, *Composites Science and Technology* **69**, 147-153, (2009).

[132] Boey, F.Y.C., Lee, T.H., “Effect of Matrix Crystallinity on the Buckling Failure of a PPS Thermoplastic Composite”, *Polymer Testing* **13**, 47-53, (1994).

[133] Zhang, R.C., Xu, Y., Lu, A., Cheng, K., Huang, Y., Li, Z.M., “Shear-Induced Crystallization of Poly (Phenylene Sulphide)”, *Polymer* **49**, 2604-2613, (2008).

[134] Zhang, R., Huang, Y., Min, M., Gao, Y., Yu, X., Lu, A., Lu, Z., “Isothermal Crystallization of Pure and Glass Fiber Reinforced Poly(Phenylene Sulphide) Composites”, *Polymer Composites* **30**, 460-466, (2009).

[135] Lu, J., Huang, R., Oh, I.-K., “Melt Crystallization and Morphology of Poly (p-phenylene sulphide) Under High Pressure”, *Macromolecular Chemistry and Physics* **208**, 405-414, (2007).

- [136] Langdon, G.S., Cantwell, W.J., Nurick, G.N., “The Blast Response of Novel Thermoplastic-Based Fibre-Metal Laminates – Some Preliminary Results and Observations”, *Composites Science and Technology* **65**, 861–872, (2005).
- [137] Yıldızhan, H., “Polimer Matrisli Kompozitlerin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Isparta, 2, (2008).
- [138] Yılmaz, T., Sınmazçelik, T., “Investigation of Load Bearing Performances of Pin Connected Carbon/Polyphenylene Sulphide Composites Under Static Loading Conditions”, *Materials and Design* **28**, 520-527, (2007).
- [139] Kim, Y.G., Lee, D.G., Oh, P.K., “Manufacturing of the Composite Screw Rotors by Resin Transfer Molding”, *Journal of Materials Processing Technology* **48**, 641-647, (1995).
- [140] Kim, Y.G., Jeong, K.S., Lee, D.G., Oh, P.K., “A Study on the Composite Screw Rotors for Superchargers”, *Composite Structures* **32**, 575-581, (1995).
- [141] Choi, J.K., Lee, D.G., “Manufacturing of a Carbon Fiber-Epoxy Composite Spindle-Bearing System for a Machine Tool”, *Composite Structures* **37**, 241-251, (1997).
- [142] Cheon, S.S., Lee, D.G., Jeong, K.S., “Composite Side Door Impact Beams for Passenger Cars”, *Composite Structures* **38**, 229-239, (1997).
- [143] Oh, S.H., Chang, S.H., Lee, D.G., “Improvement of Dynamic Properties of the Steel-Composite Hybrid Flexspline of a Harmonic Drive”, *Composite Structures* **38**, 251-260, (1997).
- [144] Denault, J., “Consolidation Process of PEEK/Carbon Composite for Aerospace Applications”, *Advanced Performance Materials* **5**, 83-96, (1998).
- [145] Oya, N., Hamada, H., “Mechanical Properties and Failure Mechanisms of Carbon Fibre Reinforced Thermoplastic Laminates”, *Composites Part A* **28**, 823-832, (1997).
- [146] Yang, Y., Li, B., Dong, L., “Enhanced Glass Fiber-Reinforced Phenolphthalein Poly(ether ketone) Composites by Blending Poly(phenylene sulfide)”, *Journal of Applied Polymer Science* **59**, 531-535, (1996).
- [147] Freidrich, K., Fakirov, S., Zhang, Z., “Polymer Composites From Nano-to Macro-Scale”, ISBN 10: 0-387-26312-X (e-book), *Springer*, 233, (2005).
- [148] Plotkin, S.E., “European and Japanese Fuel Economy Initiatives: What They Are Their Prospects for Success, Their Usefulness as a Guide for US Action”, *Energy Policy* **29**, 1073–1084, (2001).



- [149] Yuxuan, L., “Use of High Strength Steel Sheet for Light Weight and Crashworthy Car Body”, *Materials and Design*, **vol: 24, no:3**, 177–182, (2003).
- [150] Jambor, A., Beyer, M., “New Cars-New Materials”, *Materials and Design*, **vol: 18, no: 4/6**, 203–209, (1997).
- [151] Li, Y., Lin, Z., Jiang, A., Chen, G., “Experimental Study of Glass-Fiber Mat Thermoplastic Material Impact Properties and Lightweight Automobile Body Analysis”, *Materials and Design* **25**, 579–585, (2004).
- [152] Berglund, L.A., Ericson, M.L. “Glass Mat Reinforced Polypropylene. In: Karger-Kocsis J, Editor. Polypropylene: Structure, Blends and Composites”, *Composites 3, London, Chapman and Hall, Cambridge*, 202–227, (1995).
- [153] Schoeppner, G.A., Abrate, S., “Delamination Threshold Loads for Low Velocity Impact on Composite Laminates”, *Composites: Part A* **31**, 903–915, (2000).
- [154] Mitrevski, 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).
- [155] Mitrevski, T., Marshall, I.H., Thomson, R.S., Jones, R., “Low-Velocity Impacts on Preloaded GFRP Specimens with Various Impactor Shapes”, *Composite Structures* **76**, 209–217, (2006).
- [156] Collombet, F., Bonini, J., Lataillade, J.L., “A Three-Dimensional Modelling of Low Velocity Impact Damage in Composite Laminates”, *International Journal For Numerical Methods In Engineering*, **vol:39, no: 9**, 1491-1516, (1996).
- [157] Bouvet, C., Castanié, B., Bizeul, M., Barrau, J.J., “Low Velocity Impact Modelling in Laminate Composite Panels with Discrete Interface Elements”, *International Journal of Solids and Structures*, **vol: 46, no: 14-15**, 2809-2821, (2009).
- [158] Hosur, M.V., Karim, M.R., Jeelani, S. “Experimental Investigations on the Response of Stitched/Unstitched Woven S2-Glass/SC15 Epoxy Composites Under Single and Repeated Low Velocity Impact Loading”, *Composite Structures*, **vol:61, no:1-2**, 89-102, 2003.
- [159] Belingardi, G., Grasso, F., Vadori, R., “Energy Absorption and Damage Degree in Impact Testing of Composite Materials”, *Experimental Mechanics, Vols 1 And 2 - Advances In Design*, 279-285, (1998).
- [160] Belingardi, G., Vadori, R., “Low Velocity Impact Tests of Laminate Glass-Fiber-Epoxy Matrix Composite Material Plates”, *International Journal Of Impact Engineering*, **vol:27, no:2**, 213-229, (2002).

- [161] Belingardi, G., Vadori, R., “Influence of the Laminate Thickness in Low Velocity Impact Behavior of Composite Material Plate”, *Composite Structures*, **vol:61, no:1-2**, 27-38, (2003).
- [162] Hebert, M., Rousseau, C.E., Shukla, A., “Shock Loading and Drop Weight Impact Response of Glass Reinforced Polymer Composites”, *Composite Structures*, **vol:84, no:3**, 199-208, (2008).
- [163] Atas, C., Sayman, O. “An Overall View on Impact Response of Woven Fabric Composite Plates”, *Composite Structures*, **vol:82, no:3**, 336-345, (2008).
- [164] Atas, C., Liu, D., “Impact Response of Woven Composites with Small Weaving Angles”, *International Journal Of Impact Engineering*, **vol:35, no:2**, 80-97, (2008).
- [165] Asundi, A. Choi, A.Y.N., “Fiber Metal Laminates: An Advanced Material for Future Aircraft”, *Journal of Materials Processing Technology* **63**, 384-394, (1997).
- [166] Payeganeh, G.H., AshenaiGhasemi, F., Malekzadeh, K., “Dynamic Response of Fiber–Metal Laminates (FMLs) Subjected to Low-Velocity Impact”, *Thin-Walled Structures* **48**, 62–70, (2010).
- [167] Liu, Y., Liaw, B., “Effects of Constituents and Lay-up Configuration on Drop-Weight Tests of Fiber-Metal Laminates”, *Applied Composite Materials* **17**, 43–62, (2010).
- [168] Langdon, G.S., Chi, Y., Nurick, G.N., Haupt, P., “Response of GLARE<sup>c</sup> Panels to Blast Loading”, *Engineering Structures* **31**, 3116-3120, (2009).
- [169] Hoo Fatt, M.S., Lin, C., Revilock Jr, D.M., Hopkins, D.A., “Ballistic Impact of GLARE<sup>TM</sup> Fibre Metal Laminates”, *Composite Structures* **61**, 73-88, (2003).
- [170] Langdon, G.S., Nuricka, G.N., Cantwell, W.J., “The Response of Fibre Metal Laminate Panels Subjected to Uniformly Distributed Blast Loading”, *European Journal of Mechanics A/Solids* **27**, 107–115, (2008).
- [171] Santulli, C., “Impact Damage Characterisation of Thermoplastic Matrix Composites Using Transmission Transient Thermography”, *Nondestructive Testing and Evaluation*, **vol: 19, no: 3**, 79–90, (2003).
- [172] de Moura, M.F.S.F., Gonçalves, J.P.M., “Modelling the Interaction between Matrix Cracking and Delamination in Carbon–Epoxy Laminates Under Low Velocity Impact”, *Composites Science and Technology* **64**, 1021–1027, (2004).
- [173] Yokozeki, T., Kuroda, A., Yoshimura, A., Ogasawara, T., Aoki, T., “Damage Characterization in Thin-Ply Composite Laminates Under Out-Of-Plane Transverse Loadings”, *Composite Structures* **93**, 49–57, (2010).

- [174] Azouaoui, K., Azari, Z., Pluinage, G., “Evaluation of Impact Fatigue Damage in Glass/Epoxy Composite Laminate”, *International Journal of Fatigue* **32**, 443–452, (2010).
- [175] Reis, P.N.B., Ferreira, J.A.M., Antunes, F.V., Costa, J.D.M., “Flexural Behaviour of Hybrid Laminated Composites”, *Composites: Part A* **38**, 1612–1620, (2007).
- [176] Sinval, A., Rodrigues, J., Ferracane, J. L., Bona, A. I.D., “Flexural Strength and Weibull Analysis of a Microhybrid and a Nanofill Composite Evaluated by 3- And 4-Point Bending Tests”, *Dental Materials* **24**, 426–431, (2008).
- [177] Moniruzzaman, M., Du, F., Romero, N., Winey, K.I., “Increased Flexural Modulus and Strength in SWNT/Epoxy Composites by a New Fabrication Method”, *Polymer* **47**, 293–298, (2006).
- [178] Mujika, F., “On the Difference Between Flexural Moduli Obtained by Three-Point and Four-Point Bending Tests”, *Polymer Testing* **25**, 214–220, (2006).
- [179] Stokes, V.K., “Random Glass Mat Reinforced Thermoplastic Composites. Part I: Phenomenology of Tensile Modulus Variations”, *Polymer Composites*, *vol:11, no:1*, 32–44, (1990).
- [180] Stokes, V.K., “Random Glass Mat Reinforced Thermoplastic Composites. Part II: Characterization of The Tensile Strength”, *Polymer Composites*, *vol: 11, no:6*, 354–367, (1990).
- [181] Jang, J., Han, S., “Mechanical Properties of Glass-Fibre Mat/PMMA Functionally Gradient Composite”, *Composites: Part A* **30**, 1045–1053, (1999).
- [182] Zhao, R., Zhou, X., Dai, G., “Effect of the Microstructure of GMT on Its Mechanical Properties”, *Polymer Composites*, *vol: 23, no: 6*, 1026-1035, (2002).
- [183] Zhai, H., Zhou, X., Fang, L., Lu, A., “Study on Mechanical Properties of Powder Impregnated Glass Fiber Reinforced Poly(phenylene sulphide) by Injection Molding at Various Temperatures”, *Journal of Applied Polymer Science* **115**, 2019–2027, (2010).
- [184] Gonon, L., Chabert, B., Bernard, A., Van Hoyweghen, D., Gerard, J. F., “New Coupling Agents as Adhesion Promoters at the Poly(Phenylene Sulfide)/Glass Interface – Studies with Micro and Macro Composites”, *The Journal of Adhesion* **61**, 271-292, (1997).
- [185] Jang, J., Kim, H.S. “Performance Improvement of Glass Fiber-Poly(phenylene sulfide) Composite”, *Journal of Applied Polymer Science* **60**, 2297-2306, (1996).
- [186] Santiuste, C., Sanchez-Saez, S., Barbero, E., “Residual Flexural Strength After Low-Velocity Impact in Glass/Polyester Composite Beams”, *Composite Structures* **92**, 25–30, (2010).

- [187] Abrate, S., “Modeling of impacts on composite structures”, *Composite Structures* **51**, 129-138, (2001).
- [188] Khondker, O.A., Herszberg, I., Hamada, H., “Measurements and Prediction of the Compression-After-Impact Strength of Glass Knitted Textile Composites”, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, **vol: 35, no: 2**, 145–157, (2004).
- [189] Sánchez-Sáez, S., Barbero, E., Zaera, R., Navarro, C., “Compression After Impact of Thin Composite Laminates”, *Composites Science and Technology*, **vol: 65, no: 13**, 1911–1919, (2005).
- [190] Zhang, X., Hounslow, L., Grassi, M., “Improvement of Low-Velocity Impact and Compression-After-Impact Performance by Z-Fibre Pinning”, *Composites Science and Technology*, **vol: 66, no: 15**, 2785–2794, (2006).
- [191] Schubel, P.M., Luo, J.-J., Daniel, I.M., “Impact and Post Impact Behaviour of Composite Sandwich Panels”, *Composites Part A: Applied Science and Manufacture* **38**, 1051–1057, (2007).
- [192] Sanchez-Saez, S., Barbero, E., Navarro, C., “Compressive Residual Strength at Low Temperatures of Composite Laminates Subjected to Low-Velocity Impacts”, *Composite Structures*, **vol: 85, no: 3**, 226–232, (2008).
- [193] Sihm, S., Kim, R.Y., Kawabe, K., Tsai, S.W., “Experimental Studies of Thin-Ply Laminated Composites”, *Composites Science and Technology* **67**, 996–1008, (2007).
- [194] Amaro, A.M., Reis, P.N.B., Moura, M.F.S.F., “Residual Strength After Low Velocity Impact in Carbon-Epoxy Laminates”, *Materials Science Forum* **514–516**, 624–628, (2006).
- [195] Zhang, Z.Y., Richardson, M.O.W., “Low Velocity Impact Induced Damage Evaluation and Its Effect on the Residual Flexural Properties of Pultruded GRP Composites”, *Composite Structures* **81**, 195–201, (2007).
- [196] Chenghong, H., Yubin, L., Zuoguang, Z., Zhijie, S., “Impact Damage Modes and Residual Flexural Properties of Composite Beam”, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, **vol: 27, no: 11**, 1163–1175, (2008).
- [197] Christoforou, A.P., “Impact Dynamics and Damage in Composite Structures”, *Composite Structures*, **vol: 52, no: 2**, 181-188, (2001).
- [198] Cortes, P., Cantwell, W.J., Kuang, K.S.C., “The Fracture Properties of a Smart Fiber Metal Laminate”, *Polymer Composites* **28**, 534–544, (2007).
- [199] Burns, M.J., Compston, P., “Interfacial Fracture Toughness of Polyester-Based Fiber-Metal Laminates with Primary Contact and Secondary Adhesive Bonding”, *Journal of Materials Science* **39**, 2855 – 2859, (2004).

- [200] Cortes, P., Cantwell, W.J., “ Interfacial Fracture Properties of Carbon Fiber Reinforced Peek/Titanium Fiber-Metal Laminates”, *Journal Of Materials Science Letters* **21**, 1819 – 1823, (2002).
- [201] Castrodeza, E.M., Bastian, F.L., Perez Ipin~A, J.E., “Fracture Toughness of Unidirectional Fiber–Metal Laminates: Crack Orientation Effect”, *Engineering Fracture Mechanics* **72**, 2268–2279, (2005).
- [202] Abel, M.L., Allington, R.D., Digby, R.P., Porritt, N., Shaw, S.J., Watts, J.F., “Understanding the Relationship between Silane Application Conditions, Bond Durability and Locus of Failure”, *International Journal of Adhesion & Adhesives* **26**, 2–15, (2006).
- [203] Chen, M.A., Zhang, X.M., Huang, R., Lu, X.B., “Mechanism of Adhesion Promotion between Aluminium Sheet and Polypropylene with Maleic Anhydride-Grafted Polypropylene by  $\gamma$  -Aminopropyltriethoxy Silane”, *Surface and Interface Analysis*, vol: **40**, no: **8**, 1209-1218, (2008).
- [204] Deflorian, F., Rossi, S., Fedrizzi, L., “Silane Pre-Treatments on Copper and Aluminium”, *Electrochimica Acta* **51**, 6097–6103, (2006).
- [205] Botelho, E. C., Silva, R. A., Pardini, L. C., Rezende, M. C., “Evaluation of Adhesion of Continuous Fiber–Epoxy Composite/Aluminum Laminates”, *Journal of Adhesion Science and Technology*, vol: **18**, no: **15-16**, 1799–1813, (2004).
- [206] Krimbalis, P. P., Poon, C., Fawaz, Z., Behdian, K., “Prediction of Bearing Strength in Fiber Metal Laminates”, *Journal of Composite Materials* **41**, 1137-1157, (2007).
- [207] Abel, M.L., Watts, J.F., “The Influence of Process Parameters on the Interfacial Chemistry of  $\gamma$ -GPS on Aluminium: A Review”, *The Journal of Adhesion* **80**, 291-312, (2004).
- [208] Pluedemann, E. P., “Silanes Coupling Agents”, 2nd ed., *Plenum Press*, New York, (1991).
- [209] Frizzell, R.M., McCarthy, C.T., McCarthy, M.A., “An Experimental Investigation into the Progression of Damage in Pin-Loaded Fibre Metal Laminates”, *Composites: Part B* **39**, 907–925, (2008).
- [210] Carrillo, J.G., Cantwell, W.J., “Scaling Effects in the Tensile Behavior of Fiber-Metal Laminates”, *Composites Science and Technology* **67**, 1684–1693, (2007).

## KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER

### *SCI Kapsamlı Yayın Bilgileri*

[1] Çoban, O., Bora, M.Ö., Sınmazçelik, T., Avcu, E., "The Influence of Annealing on the Crystallization and Tribological Behavior of MWNT/PEEK Nanocomposites", *Polymer Composites* **32** (11), 1766-1771, (2011).

[2] Sınmazçelik, T., Avcu, E., Bora, M.Ö., Çoban, O., "A Review: Fibre Metal Laminates, Background, Bonding Types and Applied Test Methods", *Materials & Design* **32** (7), 3671-3685, (2011).

[3] Çoban, O., Bora, M.Ö., Sınmazçelik, T., Günay, V., "Effect of Fiber Orientation on Viscoelastic Properties of Polymer Matrix Composites Subjected to Thermal Cycles", *Polymer Composites* **31**(3), 411-416, (2010).

[4] Bora, M.Ö., Çoban, O., Sınmazçelik, T., Günay, V., "Effect of Fiber Orientation on Scratch Resistance in Unidirectional Carbon-Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composites", *Journal of Reinforced Plastics and Composites* **29** (10), 1476-1490, (2010).

[5] Bora, M.Ö., Çoban, O., Sınmazçelik, T., Günay, V., Zeren, M., "Instrumented Indentation and Scratch Testing Evaluation of Tribological Properties of Tin-Based Yataklama Materials", *Materials and Design* **31**(6), 2707-2715, (2010).

[6] Bora, M.Ö., Çoban, O., Sınmazçelik, T., Cürgül, İ., Günay, V., "On the Life Time Prediction of Repeatedly Impacted Thermoplastic Matrix Composites", *Materials & Design* **30**, 145-153, (2009).

[7] Çoban, O., Bora, M.Ö., Sınmazçelik, T., Cürgül, İ., Günay, V., "Fracture Morphology and Deformation Characteristics of Repeatedly Impacted Thermoplastic Matrix Composites", *Materials & Design* **30**, 628-634, (2009).

[8] Sınmazçelik, T., Çoban, O., Bora, M.Ö., Günay, V., Cürgül, İ., "The Effects of Thermal Cycles on the Impact Fatigue Properties of Thermoplastic Matrix Composites", *Applied Composite Materials* **15**, 99-113, (2008).

### *SCI Kapsamı Dışındaki Yayın Bilgileri*

[1] Fidan, S., Sınmazçelik, T., Bora, M.Ö., Çoban, O., "Düşük Hızlı Darbe Yüklemeleri Sonucu Kompozit Malzemelerde Ortaya Çıkan Hasar Mekanizmaları", *Mühendis ve Makina* **51** (611), 1-8, (2011)

### ***Bildiri Bilgileri***

- [1] Bora, M.Ö., Çoban, O., Fidan, S., Avcu, E., Sınmazçelik, T., Cürgül, İ., "Processing of a Novel Fibre Metal Laminates: The Effect of Circular Hole Formations on Flexural Properties", " ***14th International Conference on Advances in Materials and Processing Technologies, İstanbul, 223***, (2011).
- [2] Fidan, S., Sınmazçelik, T., Avcu, E., Bora, M.Ö., Çoban, O., "Detecting Impact Damages in an Aramid/Glass Fiber Reinforced Hybrid Composite With Micro Tomography", ***14th International Conference on Advances in Materials and Processing Technologies, İstanbul, 24***, (2011).
- [3] Çoban, O., Bora, M.Ö., Özcan, B., Avcu, E., Sınmazçelik, T., "Process Optimization by Design of Experiments: Micro-compounding and Injection Molding of PPS Composites", ***14th International Conference on Advances in Materials and Processing Technologies, İstanbul, 224***, (2011).
- [4] Bora, M.Ö., Çoban, O., Avcu, E., Fidan, S., Sınmazçelik, T., Cürgül, İ., "The Influence of Different Circular Hole Formations on Interlaminar Shear Strength of a Novel Fiber Metal Laminates", ***THEPLAC 2011 International Workshop on Thermoplastic Matrix Composites, Lecce, İtalya***, (2011).
- [5] Avcu, E., Fidan, S., Bora, M.Ö., Çoban, O., Taşkıran, İ., Sınmazçelik, T., "Solid Particle Erosive Wear Behaviour of Glass Mat Reinforced Thermoplastics: Influence of Erodent Particle Size, Particle Impingement Angle and Pressure", ***THEPLAC 2011 International Workshop on Thermoplastic Matrix Composites, Lecce, İtalya***, (2011).
- [6] Çoban, O., Bora, M.Ö., Avcu, E., Taşkıran, İ., Sınmazçelik, T., "Effect of Mixed Particles Reinforcing on the Thermal, Mechanical and Morphological Properties of PPS Composites", ***THEPLAC 2011 International Workshop on Thermoplastic Matrix Composites, Lecce, İtalya***, (2011).
- [7] Kaba, C., Yalçınkaya, G., Çoban, O., Bora, M.Ö., Sınmazçelik, T., Avcu, E., Cürgül, İ. "“Farklı Çaptaki Darbe Uçlarının Cam Fiber Takviyeli Pps Kompozitlerinin Darbe Davranışlarına Etkisi", ***Anadolu Üniversitesi Yayınları, No, 2083 Sivil Havacılık Yüksekokulu Yayınları, III.Ulusal Havacılık ve Uzay Konferansı, Eskişehir, 18, 86***, (2010).
- [8] Fidan, S., Sınmazçelik, T., Çoban, O., Bora, M.Ö., "Düşük Hızlı Darbe Yüklemeleri Sonrası Cam Fiber Takviyeli Polyester Kompozitlerde Ortaya Çıkan Hasar Konisinin İncelenmesi", ***15. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi, İstanbul, 217-226***, (2010).
- [9] Bora, M.Ö., Çoban, O., Sınmazçelik, T., Günay, V., "Termal Çevrimlere Maruz Kalan Polimer Kompozitlerde Fiber Oryantasyonunun Eğilme Dayanımı ve Kırılma Morfolojisine Etkisi", ***14. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi Özet Kitabı, 14. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi, İstanbul, 39***, (2008).

- [10] Bora, M.Ö., Çoban, O., Sınmazçelik, T., Günay, V., "Termal Çevrimlere Maruz Kalan Polimer Matrisli Kompozitlerde Fiber Oryantasyonunun Viskoelastik Özelliklere Etkisi", **14. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi Özet Kitabı, 14. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi, İstanbul, 215**, (2008).
- [11] Bora, M.Ö., Çoban, O., Sınmazçelik, T., Günay, V., "Termal Yaşlandırılmış Polimer Matrisli Kompozitlerde Fiber Oryantasyonunun Yüzey Çizilme Dayanımına Etkisi", **14. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi Özet Kitabı, 14. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi, İstanbul, 216**, (2008).
- [12] Bora, M.Ö., Çoban, O., Sınmazçelik, T., Cürgül, İ., Günay, V., "On The Life Time Prediction Of Repeatedly Impacted Thermoplastic Matrix Composites", **Theplac 2007 International Workshop on Thermoplastic Matrix Composites, Birindisi, İtalya**, (2007).
- [13] Çoban, O., Bora, M.Ö., Sınmazçelik, T., Cürgül, İ., Günay, V., "Fracture Morphology And Deformation Characteristics Of Repeatedly Impacted Thermoplastic Matrix Composites", **Theplac 2007 International Workshop on Thermoplastic Matrix Composites, Birindisi, İtalya**, (2007).
- [14] Çoban, O., Bora, M.Ö., Sınmazçelik, T., Cürgül, İ., Günay, V., "Tekrarlı Darbelere Maruz Kalan Polimer Kompozitin Kırılma Morfolojisinin Elektron Mikroskobu İle İncelenmesi", **Uluslararası Katılımlı 18. Ulusal Elektron Mikroskopi Kongresi, Eskişehir**, (2007).
- [15] Çoban, O., Bora, M.Ö., Sınmazçelik, T., Cürgül, İ., "Termal Çevrimlere Maruz Bırakılmış Polimer Kompozitlerin Düşük Enerjili Tekrarlı Darbeler Altındaki Davranışlarının İncelenmesi", **8.Uluslararası Kırılma Konferansı, İstanbul, 369-379**, (2007)
- [16] Bora, M.Ö., Çoban, O., Sınmazçelik, T., Cürgül, İ., "Farklı Enerjilerde Ardışık Tekrarlı Darbelere Maruz Kalan Polimer Kompozitlerin Darbe Davranışlarının İncelenmesi", **8.Uluslararası Kırılma Konferansı, İstanbul, 380-389**, (2007).
- [17] Sınmazçelik, T., Çoban, O., Bora, M.Ö., Günay, V., Cürgül, İ., "The Effects Of Thermal Cycles On The Impact Fatigue Properties Of Thermoplastic Matrix Composites", **ECCOMAS Thematic Conference on Mechanical Response of Composites,Portekiz**, (2007).



## **ÖZGEÇMİŞ**

Ankara’da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini İstanbul’da tamamladı. 2001 yılında girdiği Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü’nden 2005 yılında mezun oldu. Eylül 2005-Haziran 2007 yılları arasında Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda, Yüksek Lisans öğrenimini tamamladı. Eylül 2007’den bugüne Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Doktora öğrenimini sürdürmektedir. Aralık 2005 yılından beri Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü’nde Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaktadır.