

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TERMOPLASTİK KOMPOZİTLERİN DÜŞÜK
HIZLI DARBE DAVRANIŞLARININ
İNCELENMESİ



Oğuzhan DURDU

Kasım, 2020
İZMİR

TERMOPLASTİK KOMPOZİTLERİN DÜŞÜK HIZLI DARBE DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Yüksek Lisans Tezi

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Mekanik Programı

Oğuzhan DURDU

Kasım, 2020

İZMİR

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

OĞUZHAN DURDU, tarafından **DOÇ. DR. OKAN ÖZDEMİR** yönetiminde hazırlanan “**TERMOPLASTİK KOMPOZİTLERİN DÜŞÜK HIZLI DARBE DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Okan ÖZDEMİR

Yönetici

Prof. Dr. Ramazan KARAKUZU

Jüri Üyesi

Dr. Öğr. Üyesi Uğur KEMİKLİOĞLU

Jüri Üyesi

Prof. Dr. Özgür ÖZÇELİK

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının başından sonuna kadar benden yardımlarını esirgemeyen değerli tez danışmanım Doç. Dr. Okan ÖZDEMİR'e içtenlikle teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmanın her aşamasında bana yardımcı olan Halis KANDAŞ'a tüm destekleri için sonsuz teşekkür ederim. Bunun yanı sıra Mekanik Test Laboratuvarı teknisyeni Canip DURAK' a teşekkür ederim.

Son olarak hayatımın her evresinde olduğu gibi yüksek lisans boyunca da beni destekleyen aileme sonsuz sevgi ve saygılarımı sunarım.

Oğuzhan DURDU

TERMOPLASTİK KOMPOZİTLERİN DÜŞÜK HIZLI DARBE DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

ÖZ

Termoplastik malzemeler, genel olarak, termoset malzemelerden sünek ve daha dayanıklıdır ve dolgu veya takviye olmadan çok çeşitli yapısal olmayan uygulamalar için kullanılır. Termoplastikler ısıtılarak eritilebilir ve tekrar soğutularak katılaşarak tekrar şekillendirme ve yeniden biçimlendirme kabiliyetine sahiptir. Çeşitli uygulamalarda, termoplastik malzemeler cam elyaf takviyeli ile güçlendirilir ve yüksek mekanik mukavemet gerektiren alanlarda yaygın olarak kullanılır. Bu kapsamda, bu çalışmada malzemenin düşük hızda etki davranışını etkileyen termoplastik üretim sırasında oluşabilecek eksikliklerin etkisini ortaya koymak amaçlanmıştır.

Aynı kalınlıkta (3 mm), delaminasyonsuz ve farklı delaminasyon malzemeleri kullanılarak numuneler üretilmiştir. Kompozit üretiminde uzun cam elyaf takviyeli homopolipropilen kompozit granüller ve termoplastik prepreg laminalar kullanılmıştır. Yapay delaminasyonlar termoplastik prepreg laminalar arasına yerleştirilmiştir. Delaminasyon malzemesi olarak ayırıcı film, vakum torbası ve vakum infüzyon filesi kullanılmıştır. İki farklı delaminasyon çapı (13 ve 26 mm) kullanılmıştır. Tüm numunelere düşük hızlı darbe testleri uygulanmış ve elde edilen verilerle oluşturulan grafikler değerlendirilmiştir.

Anahtar kelimeler: Cam elyaf takviyeli termoplastik malzemeler, termoplastik prepreg, düşük hızlı darbe, delaminasyon

INVESTIGATION OF LOW VELOCITY IMPACT BEHAVIORS OF THERMOPLASTICS COMPOSITES

ABSTRACT

Thermoplastic materials are generally ductile and more durable than thermoset materials and are used for a wide variety of non-structural applications without fillers or reinforcements. The thermoplastics can be melted by heating and have the ability to reshape and reshape by solidifying by re-cooling. In various applications, thermoplastic materials are reinforced with glass fiber reinforcement and are widely used in areas requiring high mechanical strength. In this context, in this study, it is aimed to reveal the effect of deficiencies that may occur during thermoplastic production which affects the low velocity impact behavior of the material.

Specimens of the same thickness (3 mm) were produced without delamination and using different delamination materials. In the production of composite, long glass fiber reinforced homopolypropylene composite granules and thermoplastic prepreg laminates were used. Artificial delaminations was placed between thermoplastic prepreg laminates. Release film, vacuum bag and infusion mesh extrude were used as delamination material. Two different delamination diameters (13 and 26 mm) were used. All specimens were subjected to low velocity impact tests and the graphs generated with the obtained data were evaluated.

Keywords: Glass fiber reinforced thermoplastic materials, thermoplastic prepreg, low velocity impact, delamination

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZ	iv
ABSTRACT	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
TABLolar LİSTESİ	x
BÖLÜM BİR – GİRİŞ	1
BÖLÜM İKİ – KOMPOZİT MALZEMELER	8
2.1 Kompozitlerin Tanımı ve Kısa Tarihi	8
2.2 Kompozitlerin Yapısı	9
2.3 Kompozitlerin Sınıflandırılması.....	11
2.4 Kompozitlerin Matris Malzemelerine Göre Sınıflandırılması	12
2.4.1 Polimer Matrisli Kompozitler.....	13
2.4.1.1 Termosetler	14
2.4.1.2 Termoplastikler	14
2.4.2 Metal Matrisli Kompozitler	15
2.4.3 Seramik Matrisli Kompozitler	17
2.5 Kompozit Malzemelerin Avantajları ve Dezavantajları.....	18
2.6 Düşük Hızlı Darbe Hasarları	20
2.6.1 Matris Çatlakları	21
2.6.2 Delaminasyon	21
2.6.3 Fiber Kopması	21
BÖLÜM ÜÇ – ÜRETİM MALZEMELERİ	23
3.1 Tek Eksenli Cam Elyaf Takviyeli Prepreg Laminalar	23

3.2 Cam Elyaf Takviyeli Homopolipropilen Granüller.....	25
3.3 Delaminasyon Malzemeleri.....	27
BÖLÜM DÖRT – ÜRETİM VE CİHAZLAR	30
4.1 Üretim ve Deneyde Kullanılan Cihazlar	30
4.1.1 Sıcak Presleme Cihazı	30
4.1.2 Darbe Cihazı	31
4.2 Numunelerin Hazırlanması ve Üretim	33
4.3 Darbe Deneyi ve Amacı	36
BÖLÜM BEŞ – SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME	38
5.1 Delaminasyon Çap Etkisi	39
5.1.1 Vakum Torbası Delaminasyon Malzemesinin Grafikleri.....	39
5.1.1.1 20J’de Gerçekleştirilen Deneyler.....	39
5.1.1.2 30J’de Gerçekleştirilen Deneyler.....	40
5.1.1.3 40J’de Gerçekleştirilen Deneyler.....	41
5.1.1.4 50J’de Gerçekleştirilen Deneyler.....	42
5.1.1.5 Artan Darbe Enerjisine Bağlı Grafikler	43
5.1.2 Ayırıcı Film Delaminasyon Malzemesinin Grafikleri	45
5.1.2.1 20J’de Gerçekleştirilen Deneyler.....	45
5.1.2.2 30J’de Gerçekleştirilen Deneyler.....	46
5.1.2.3 40J’de Gerçekleştirilen Deneyler.....	47
5.1.2.4 50J’de Gerçekleştirilen Deneyler.....	48
5.1.2.5 Artan Darbe Enerjisine Bağlı Grafikler	48
5.1.3 Vakum İnfüzyon Fıçısı Delaminasyon Malzemesinin Grafikleri.....	50
5.1.3.1 20J’de Gerçekleştirilen Deneyler.....	50
5.1.3.2 30J’de Gerçekleştirilen Deneyler.....	51
5.1.3.3 40J’de Gerçekleştirilen Deneyler.....	52
5.1.3.4 50J’de Gerçekleştirilen Deneyler.....	53
5.1.3.5 Artan Darbe Enerjisine Bağlı Grafikler	54

5.2 Delaminasyon Malzemesi Etkisi	55
5.2.1 13 mm Delaminasyon Çapı İçin Karşılaştırma.....	56
5.2.1.1 20J Seviyesinde Karşılaştırma	56
5.2.1.2 30J Seviyesinde Karşılaştırma	57
5.2.1.3 40J Seviyesinde Karşılaştırma	58
5.2.1.4 50J Seviyesinde Karşılaştırma	58
5.2.1.5 Artan Darbe Enerjisine Bağlı Grafikler	59
5.2.2 26 mm Delaminasyon Çapı İçin Karşılaştırma.....	60
5.2.2.1 20J Seviyesinde Karşılaştırma	60
5.2.2.2 30J Seviyesinde Karşılaştırma	61
5.2.2.3 40J Seviyesinde Karşılaştırma	62
5.2.2.4 50J Seviyesinde Karşılaştırma	63
5.2.2.5 Artan Darbe Enerjisine Bağlı Grafikler	64
5.3 Hasarlı Numunelerin İncelenmesi	65
BÖLÜM ALTI –YARGILAR VE SONUÇLAR	70
KAYNAKLAR	73

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1 Boeing 787 yolcu uçağında kullanılan malzemeler	9
Şekil 2.2 Kompozit malzemelerin genel yapısı.....	10
Şekil 2.3 Fiberli kompozitlerin şematik gösterimi	12
Şekil 2.4 Parçacıklı kompozitlerin şematik gösterimi.....	12
Şekil 2.5 Kompozit malzemelerin matrise göre sınıflandırılması.....	13
Şekil 2.6 Kovalent bağlı moleküler konfigürasyon tipleri a) Doğrusal zincir, b) Dalı molekül, c) Çapraz bağlı ağ	13
Şekil 2.7 a) Amorf polimer, b) Yarı kristal polimer	15
Şekil 2.8 Metal matrisli kompozitten elektronik bileşen	16
Şekil 2.9 Seramik matrisli kompozitten egzoz nozulu.....	17
Şekil 2.10 Yüksek mukavemetli kompozitlerin ve bazı havacılık alaşımlarının modülünün karşılaştırılması	18
Şekil 2.11 a) Tek yönlü laminalı kompozitlerde darbe hasarı, b) İç laminalar hasarı etkileşimi	22
Şekil 3.1 Tek eksenli cam elyaf takviyeli termoplastik prepreg	24
Şekil 3.2 Bir kompozitin bazı mekanik özelliklerinin fiber uzunluğunun bir fonksiyonu olarak değişimi	25
Şekil 3.3 Uzun cam elyaf takviyeli polipropilen granüller	27
Şekil 3.4 Yeşil transparan renkli vakum torbası	28
Şekil 3.5 Vakum infüzyon filesi.....	28
Şekil 3.6 Kırmızı transparan ayırıcı film ve yeşil transparan renkli vakum torbası ..	29
Şekil 4.1 LabEcon 600 serisi pres cihazı	31
Şekil 4.2 Düşük hızlı darbe cihazı bölümleri	31
Şekil 4.3 CEAST-Fractovis Plus darbe cihazı	32
Şekil 4.4 a) Kalıp ve teflon, b) Laminalar arası granül yerleşimi, c) Preslenmeye hazır delaminasyonsuz numune	33
Şekil 4.5 a) 13 mm, b) 26 mm çapında delaminasyonlu ve malzemesi vakum infüzyon file olan numune	34
Şekil 4.6 a) 13 mm, b) 26 mm çapında delaminasyonlu ve malzemesi ayırıcı film olan numune	34

Şekil 4.7 a) 13 mm, b) 26 mm çapında delaminasyonlu ve malzemesi vakum torbası olan numune	35
Şekil 4.8 Üretim aşaması.....	35
Şekil 4.9 Numune kesim aşaması	36
Şekil 5.1 Delaminasyon malzemesi vakum torbası olan ve ön delaminasyon olmayan numuneye ait 20J’de a) Temas kuvveti-yer değiştirme, b) Temas kuvveti-zaman, c) Enerji-zaman grafikleri	40
Şekil 5.2 Delaminasyon malzemesi vakum torbası olan ve ön delaminasyon olmayan numuneye ait 30J’de a) Temas kuvveti-yer değiştirme, b) Temas kuvveti-zaman, c) Enerji-zaman grafikleri	41
Şekil 5.3 Delaminasyon malzemesi vakum torbası olan ve ön delaminasyon olmayan numuneye ait 40J’de a) Temas kuvveti-yer değiştirme, b) Temas kuvveti-zaman, c) Enerji-zaman grafikleri	42
Şekil 5.4 Delaminasyon malzemesi vakum torbası olan ve ön delaminasyon olmayan numuneye ait 50J’de a) Temas kuvveti-yer değiştirme, b) Temas kuvveti-zaman, c) Enerji-zaman grafikleri	43
Şekil 5.5 Delaminasyon malzemesi vakum torbası olan ve ön delaminasyon olmayan numuneye ait a) Maksimum temas kuvvetinin, b) Maksimum deformasyonun, c) Absorbe enerjinin artan darbe enerjisi ile değişim grafikleri	44
Şekil 5.6 Delaminasyon malzemesi ayırıcı film olan ve ön delaminasyon olmayan numuneye ait 20J’de a) Temas kuvveti-yer değiştirme, b) Temas kuvveti-zaman, c) Enerji-zaman grafikleri	45
Şekil 5.7 Delaminasyon malzemesi ayırıcı film olan ve ön delaminasyon olmayan numuneye ait 30J’de a) Temas kuvveti-yer değiştirme, b) Temas kuvveti-zaman, c) Enerji-zaman grafikleri	46
Şekil 5.8 Delaminasyon malzemesi ayırıcı film olan ve ön delaminasyon olmayan numuneye ait 40J’de a) Temas kuvveti-yer değiştirme, b) Temas kuvveti-zaman, c) Enerji-zaman grafikleri	47
Şekil 5.9 Delaminasyon malzemesi ayırıcı film olan ve ön delaminasyon olmayan numuneye ait 50J’de a) Temas kuvveti-yer değiştirme, b) Temas kuvveti-zaman, c) Enerji-zaman grafikleri	48

Şekil 5.10 Delaminasyon malzemesi ayırıcı film olan ve ön delaminasyon olmayan numuneye ait a) Maksimum temas kuvvetinin, b) Maksimum deformasyonun, c) Absorbe enerjinin artan darbe enerjisi ile değişim grafikleri.	50
Şekil 5.11 Delaminasyon malzemesi vakum infüzyon filesi olan ve ön delaminasyon olmayan numuneye ait 20J’de a) Temas kuvveti-yer değiştirme, b) Temas kuvveti-zaman, c) Enerji-zaman grafikleri.....	51
Şekil 5.12 Delaminasyon malzemesi vakum infüzyon filesi olan ve ön delaminasyon olmayan numuneye ait 30J’de a) Temas kuvveti-yer değiştirme, b) Temas kuvveti-zaman, c) Enerji-zaman grafikleri.....	52
Şekil 5.13 Delaminasyon malzemesi vakum infüzyon filesi olan ve ön delaminasyon olmayan numuneye ait 40J’de a) Temas kuvveti-yer değiştirme, b) Temas kuvveti-zaman, c) Enerji-zaman grafikleri.....	53
Şekil 5.14 Delaminasyon malzemesi vakum infüzyon filesi olan ve ön delaminasyon olmayan numuneye ait 50J’de a) Temas kuvveti-yer değiştirme, b) Temas kuvveti-zaman, c) Enerji-zaman grafikleri.....	54
Şekil 5.15 Delaminasyon malzemesi vakum infüzyon filesi olan ve ön delaminasyon olmayan numuneye ait a) Maksimum temas kuvvetinin, b) Maksimum deformasyonun, c) Absorbe enerjinin artan darbe enerjisi ile değişim grafikleri	55
Şekil 5.16 20J enerji seviyesinde 13 mm delaminasyon çapı için a) Temas kuvveti-yer değiştirme, b) Temas kuvveti-zaman, c) Enerji-zaman grafikleri.....	56
Şekil 5.17 30J enerji seviyesinde 13 mm delaminasyon çapı için a) Temas kuvveti-yer değiştirme, b) Temas kuvveti-zaman, c) Enerji-zaman grafikleri	57
Şekil 5.18 40J enerji seviyesinde 13 mm delaminasyon çapı için a) Temas kuvveti-yer değiştirme, b) Temas kuvveti-zaman, c) Enerji-zaman grafikleri.....	58
Şekil 5.19 50J enerji seviyesinde 13 mm delaminasyon çapı için a) Temas kuvveti-yer değiştirme, b) Temas kuvveti-zaman, c) Enerji-zaman grafikleri.....	59
Şekil 5.20 13 mm delaminasyon çapı için a) Maksimum temas kuvvetinin, b) Maksimum deformasyonun, c) Absorbe enerjinin artan darbe enerjisi ile değişim grafikleri.....	60
Şekil 5.21 20J enerji seviyesinde 26 mm delaminasyon çapı için a) Temas kuvveti-	

yer değiştirme, b) Temas kuvveti-zaman, c) Enerji-zaman grafikleri.....	61
şekil 5.22 30J enerji seviyesinde 26 mm delaminasyon çapı için a) Temas kuvveti- yer değiştirme, b) Temas kuvveti-zaman, c) Enerji-zaman grafikleri.....	62
şekil 5.23 40J enerji seviyesinde 26 mm delaminasyon çapı için a) Temas kuvveti- yer değiştirme, b) Temas kuvveti-zaman, c) Enerji-zaman grafikleri.....	63
şekil 5.24 50J enerji seviyesinde 26 mm delaminasyon çapı için a) Temas kuvveti- yer değiştirme, b) Temas kuvveti-zaman, c) Enerji-zaman grafikleri.....	64
şekil 5.25 26 mm delaminasyon çapı için a) Maksimum temas kuvvetinin, b) Maksimum deformasyonun, c) Absorbe enerjinin artan darbe enerjisi ile değişim grafikleri.....	65
şekil 5.26 Delaminasyon malzemesi vakum torbası olan numunelerin deney sonrası hasar şekilleri.....	67
şekil 5.27 Delaminasyon malzemesi ayırıcı film olan numunelerin deney sonrası hasar şekilleri.....	68
şekil 5.28 Delaminasyon malzemesi vakum infüzyon filesi olan numunelerin deney sonrası hasar şekilleri	69

TABLÖLAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 2.1 Kompozit ve klasik malzemelerin özelliklerinin kıyaslanması	19
Tablo 3.1 Farklı Cam Elyaf Türlerinin Kimyasal Bileşimi.....	24
Tablo 3.2 %50 elyaf oranına sahip uzun cam elyaf takviyeli polipropilenin mekanik özellikleri.....	26



BÖLÜM BİR

GİRİŞ

Kompozitler, farklı bir ara yüzle ayrılmış iki veya daha fazla kimyasal ve fiziksel olarak farklı fazdan oluşan malzemeler olarak tanımlanabilir. Farklı sistemler, tek başına herhangi bir bileşen tarafından elde edilemeyen daha yararlı yapısal veya işlevsel özelliklere sahip bir sistem elde etmek için mantıklı bir şekilde birleştirilir. Kompozitler, ayrı ayrı bileşenlerin ayrı kimliklerini korudukları, bileşimleri farklı olan malzeme kombinasyonlarıdır. Bu ayrı bileşenler, kompozit parçaya gerekli mekanik mukavemeti veya sertliği vermek için birlikte hareket eder. Kompozit malzeme, iki veya daha fazla farklı fazdan (matris fazı ve dağınık faz) oluşan ve bileşenlerin herhangi birinden önemli ölçüde farklı kütle özelliklerine sahip bir malzemedir (Njuguna, 2016).

Matris malzemesi olarak kullanılan termoplastik ve termoset malzemelerin birbirlerine göre avantajları ve dezavantajları vardır. Bunlar kullanıldıkları alanlara göre değişmektedir. Kompozitler kullanıldıkları çalışma ortamlarına göre farklı hızda darbelere maruz kalmaktadır. Kullanım alanı genişliğinden dolayı termoplastik ve termoset kompozitlerin düşük hızlı darbe davranışları birçok çalışmada incelenmiştir.

B. Vieille ve diğer. (2013), çalışmada düşük hızlı darbelere maruz kalan Termoset bazlı (epoksi) ve Termoplastik bazlı laminaların tepkisini karşılaştırmayı amaçlamışlardır. C-scan incelemeleri, darbenin farklı arıza mekanizmalarından kaynaklanan elmas şeklindeki hasara yol açtığını göstermiştir: fiber kırılmaları, lamineler arası ve katmanlar arası hasarlar ve C/PEEK ve C/epoksi laminalarda yoğun delaminasyon. TP bazlı laminalarda, matris plastikleşmesi, kalıcı olarak deformasyonları teşvik ederek matris bakımından zengin bölgelerde önemli bir rol oynadığını gözlemlemişlerdir. Her iki mekanizmada, hasarların genişlemesi, özellikle de belirli bir darbe enerjisine müteakip delaminasyonun azalttığı görülmüştür. Epoksi esaslı laminalarda, kırılmış elyaf ve matris kalıntıları çatlaklara ve bitişik katmanlara sıkışır ve çarpışmadan sonra çatlakların ve delaminasyonun kapanmasını önleyen bir çeşit blokaj sistemi oluşturmuştur. Çalışmada düşük hızlı

darbe altında karbon dokuma ile takviyelenmiş polimer kompozitlerin davranışlarının, C/epoksi laminaların TP tabanlı laminalarla karşılaştırıldığında daha büyük delaminasyona sahip olduğunu gözlemlemişlerdir.

Russo ve diğer. (2017), çalışmalarında, numune kalınlığı ve test sıcaklığına bağlı dokunmuş cam elyafı ile takviyelenmiş termoplastik poliüretan bazlı termoplastik lamine yapıların düşük hızlı darbe davranışını incelemişlerdir. Darbe sonuçları, tipik yük-deformasyon ve enerji-zaman eğrileri cinsinden incelemişler, ancak aynı zamanda iyi bilinen süneklik endeksi (DI) parametresine referansla tartışılmıştır. Sonuç olarak önden ve arkadan etkilenen alanların görsel incelemeleriyle desteklenen tüm araştırılan örnekler için hiçbir delaminasyon olayı doğrulanmamıştır.

Sun ve diğer. (2018), termoplastik (IM7/PEEK) ve termoset (IMS65/MTM) karbon elyafı takviyeli kompozitler için düşük hızlı darbe hasarının deneysel ve nümerik çalışmalarını karşılaştırmışlardır. Deneyleri, aynı koşullar altında 8J ve 30J enerjisinde yapmışlardır. LS-DYNA Sonlu Elemanlar Analizi programını kullanmışlardır. Fiber hatasını, sayısal yaklaşımlarla tahmin etmişlerdir. Termoplastik malzemelere göre termoset malzemeler gözle görülür derecede üstün davranış göstermemiştir. Termoplastik levhalar üzerindeki deneysel veriler termoset levhalara kıyasla hasar gelişiminde ve kararsız hasar büyümesinde büyük değişiklikler bulunmuştur. Miktarı açıklayan detaylı mikroskobik deneysel veriler ve farklı hasar modlarının konumu uygun bulunmamış ve bu konuda yeni çalışmalar gerekli görülmüştür.

Sandviç kompozit levhaların, termoplastik ve termoset matris malzemeler ile darbe tepkisi farklılıkları üzerine deneysel bir araştırma yapmışlardır. Polimer kompozit yüzey tabakaları üretmek için e-cam takviyeli epoksi (termoset) ve polipropilen (termoplastik) kullanmışlardır. Çekirdek malzeme olarak PVC köpük kullanılmıştır. Çeşitli darbe enerjileri altında düşük hızlı darbe testi yapılmıştır. Yapılan testler, termoplastik numunelerin eğilme rijitliğinin, termoset numunelerden daha düşük olduğunu ve bunun termoset kompoziti daha sert ve dayanıklı hale

getirdiği, ancak termoplastik yüzey tabakalarının yük taşıma ve deformasyon kabiliyeti termosetlere göre daha yüksek olduğu sonucuna varmışlardır (Doğan ve Arıkan, 2017).

Reyes ve Sharma. (2009), dokuma cam elyafı ve polipropilenden oluşan üç katmanlı termoplastik laminaların düşük hızlı darbe davranışını, iki farklı elyaf konfigürasyonu için araştırmışlardır. Çözü (warp) ve doldurma (fill) yönlerinde 50/50 ve 20/80 konfigürasyonlarına sahip olan levhalar, 4J ile 16J arasında düşük hızlı darbe enerjilerine maruz bırakılmıştır. Deneysel testler, 16J'lük enerji darbesinden sonra eğilme mukavemetinde 50/50 için yaklaşık %27 ve 20/80 için yaklaşık %12'lik bir azalma göstermiştir. Sonuçlar, çarpma enerjisi arttıkça eğilme dayanımı ve modülünde bir azalma olduğunu göstermiştir.

Termoplastik poliüretan (TPU) ve dokuma cam elyafı ile güçlendirilmiş kompozit laminalar; katman istifleme ve basınçlı kalıplama prosedürleriyle hazırlanmış ve düşük sıcaklıkta statik ve dinamik mekanik testlere tabi tutulmuştur. Test sıcaklığının ve numune kalınlığının, incelenen numunelerin hasar davranışları üzerindeki etkilerini tespit etmişlerdir. Deneylerde darbe sıcaklığı ve laminaların kalınlığının tümünde, çatlak ilerlemesiyle ilgili bir bozulma tespit edememişlerdir. Levha kalınlığındaki değişimde hem eğilme rijitliğinde hem de mukavemetinde tekdüze değişiklikler olmamıştır (Russo ve diğer., 2016).

Özdemir ve Kandaş, uzun cam elyaf takviyeli polipropilen granüllerden oluşan termoplastik kompozitlerin düşük hızlı darbe davranışları deneysel olarak incelemişlerdir. Cam elyaf takviyeli polipropilen kompozit prepregler kullanılarak sandviç yapıda bir dizilime sahip kompozitler üretmişlerdir. Kalınlığın ve sıcaklığın düşük hızlı darbe davranışına olan etkilerini incelemek amacıyla 4 ve 6 mm kalınlığa sahip kompozitlerin oda sıcaklığında ve 50°C'de deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Sonuç olarak, iki farklı dizilime sahip kompozitlerin kalınlığın artmasıyla maksimum temas kuvvetinin arttığı, sıcaklığın yükselmesiyle de düştüğünü gözlemlemişlerdir (Özdemir ve Kandaş, 2018).

Poli (etilen 2,6-naftalat) (PEN) bazlı termoplastik kompozitleri, sıcaklığın statik ve darbe özellikleri üzerindeki etkisini açıklamak amacıyla incelemişlerdir. Matris olarak karbon, Twaron, Vectran, bazalt elyaf bazlı dört farklı dokuma kumaş ile güçlendirilmiştir. Numuneler, 20°C, 60°C ve 100°C'de statik eğilme ve düşük hız çarpma testleri ile değerlendirilmiştir. Düşük hız darbe direnci, elyaf tipine, elyaf/matris ara yüz dayanımına ve lamina kalınlığına bağlı olduğu ve en iyi performans bazalt bazlı laminalarla göstermiştir. Eğilme davranışı sıcaklıktan etkilenmiş, ancak 100°C sıcaklıklara kadar PEN/Vectran hariç diğerlerinde sınırlı bir azalma (%20'den düşük) olmuştur (Sorrentino ve diğer., 2017).

Termoplastik kompozitler, yalnızca yapısal olmayan parçaları değil, aynı zamanda potansiyel olarak darbelere maruz kalan alanlarda bulunan yapısal bileşenlerin yerine kullanılan malzemelerin doğru alternatifi olarak da görünmektedir. Bu çalışmada Boria ve diğer. (2017), hem takviye hem de matrisin polipropilenden yapıldığı, tamamen termoplastik bir kompozit üzerinde yapılan deneysel bir çalışmanın sonuçlarını değerlendirmişlerdir. Darbe kütlelerinin ve hızının, malzemenin enerji emme kabiliyeti üzerindeki etkisini analiz etmişlerdir. Testler sırasında, malzeme sünek bir davranış sergilemiş ve çatlak ucu olmadan uzatılmış plastiklik geliştirmiştir. Kütlelerin artırılması, absorbe edilen enerjide ve rijitlikte bir artış olurken, daha yüksek hızda düşük enerjilerin ve rijitlik olduğunu gözlemlemişlerdir. Gözlemlenen ana hasar mekanizmaları iplik kayması, delaminasyon ve lif kırılması olmuştur. Muhtemelen laminaların yüksek kalınlığı nedeniyle delik delinmemiştir.

Sabancı ve Karakuzu çalışmalarında, gömülü delaminasyonun büyüklüğü ve konumunun lamine kompozitin etki davranışına etkisi deneysel olarak incelemişlerdir. Örnekler vakum destekli reçine infüzyon kalıplama yöntemi (VARIM) ile delaminasyonlu ve delaminasyonsuz olarak üretilmiştir. Gömülü delaminasyonlar sırasıyla 2., 4. ve 6. katmanlara farklı numunelerde 13 mm, 20 mm ve 26 mm boyutlarında yerleştirilmiştir. Darbe deneyi enerjisi olarak 5J, 10J, 20J, 30J, 40J ve 50J seçilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda, darbe davranışında delaminasyonun konumunun, delaminasyonun boyutundan daha etkili olduğu görülmüştür. Maksimum temas kuvveti ve maksimum deformasyon, aynı enerji

seviyesi için delaminasyonun boyutuna bağılı olarak önemli ölçüde değişmemiştir (Sabancı ve Karakuzu, 2013).

Jeon ve diğer arkadaşları, farklı açılı iki katmanın ara yüzüne gömülü optik fiberlerle kompozit laminaların darbe hasarının ve darbe sonrası sıkıştırma davranışının gelişimini araştırmak için düşük hızlı darbe testi ve delaminasyon burkulması testi yapmışlardır. Tüm numuneleri cam elyaf epoksi matris tek yönlü prepreglerle üretmişlerdir. Düşük hızlı darbe testleri için, optik fiberler, 0°, 45° ve 90° açılarla üst katmanın elyaf yönüne karşı ve 3 mm ve 6 mm'lik aralıklarla yerleştirmişlerdir. Numunelere uygulanan 3J'lük ve 5J'lük darbe enerjileri sonucunda, en az hasar alanı 90° açıyla konulan optik fiberlerde olurken en fazla hasar alanı ise 45° açılı olanlarda görülmüştür (Jeon ve diğer., 1998).

Sawal ve arkadaşları, cam elyaf takviyeli plastikten (GFRP) ve polipropilen (PP) bal peteği çekirdekli epoksi reçineden oluşan kompozit sandviç yapıların düşük hızlı darbe etkisini incelemişlerdir. Numune kalınlığı 30 mm ve 60x200 mm² boyutlarında üretmişlerdir. Yarı küresel ve 12.5 mm çapında vurucu uç kullanmışlardır. Sonuçta ortaya çıkan bir hasar, çarpma enerjisi yüksek olduğunda, numune tarafından absorbe edilen enerji de yüksek ve bu nedenle, çarpma hasarı alanının yayılmasının da arttığını gözlemlemişlerdir. Darbe absorbe etki faktörünün, darbe enerjisinin artmasıyla arttığı gözlemlenmiştir (Sawal ve diğer., 2017).

Özdemir ve diğer, E-cam elyaf takviyeli termoplastik yüzey tabakaları ve balsa çekirdeklerinden oluşan sandviç yapıların tek ve tekrarlanan etki davranışlarını araştırmışlardır. Düşük hızda darbe testleri, 15 mm ve 25 mm kalınlığındaki numunelere yarı küresel bir uçla yapılmış ve tamamen elastik seviyeden (10J) delinme enerji seviyesine (80J) değişen enerji seviyelerinde darbe testi yapılmıştır. Deney sonucunda, tek darbeleri için delinme eşiği seviyesi, seçilen sandviç kompozit tasarım için artan çekirdek kalınlığı ile arttığını gözlemlemişler ve farklı çekirdek kalınlıkları için tekrarlı darbe davranışlarına genelleştirilmiş formüller yazmışlardır (Özdemir ve diğer., 2018).

Arıkan ve diğer çalışmalarında, E-cam elyaf takviyeli kompozitler iki tip reçine, polipropilen ve epoksi (Termoplastik ve Termoset) ile üretilmiş ve düşük hızlı tekli ve tekrarlanan etkiler ile reçine tipinin kompozitlerin darbe tepkisi üzerindeki etkisi incelemişlerdir. Darbe enerjileri, tek darbe testleri için 20J, 50J, 80J ve 110J, tekrarlanan darbe testleri için 50J seçmişlerdir. Çalışma sonucunda, termoplastik matris kompozitin maksimum temas kuvveti, termoset olanın neredeyse yarısı kadar olduğu, ancak düşük eğilme rijitliği ve matrisin deforme olabilen yapısından dolayı absorbe enerji seviyelerinin aynı olduğunu gözlemlemişler ve reçine tipinin, kompozitlerin tekrarlanan darbe tepkisi için çok önemli bir parametre olduğu sonucuna varmışlardır (Arıkan ve diğer., 2015).

Carillo ve diğer arkadaşları çalışmada, aramid elyaf takviyeli polipropilen ve alüminyum alaşımı Al 5052-H32'den yapılan termoplastik fiber metal laminaların (FML'ler) düşük hızlı darbe davranışını incelemişlerdir. Termoplastik polimer PP'yi matris malzemesi olarak kullanmışlardır. Numuneleri 2/2 (Al, 0/90, 0/90, Al) ve 3/4 (Al, 0/90, 0/90, Al, 0/90, 0/90, Al) şeklinde üretmişlerdir. Uygulanan düşük hızlı darbe deneyleri sonucunda, numune 3/4 numune 2/2'ye kıyasla daha yüksek rijitliğe sahip olduğundan, ilk çatlakta ve delinmede birim kalınlık başına daha fazla darbe enerjisi emdiği tespit etmişlerdir. Termoplastik fiber metal laminaların alüminyuma göre daha yüksek delinme eşiğine sahip olduğunu gözlemlemişler (Carillo ve diğer., 2019).

Evcı ve Gülgeç çalışmalarında, üç farklı kompozitte darbe hasarı büyümesini ve maksimum kuvvet eşiklerinin belirlenmesini araştırmışlardır. Tek yönlü E-Cam, dokuma E-Cam ve dokuma Aramid kompozit numuneler düşük hızlı darbe testine maruz bırakılmıştır. Sekme, delinme başlangıcı ve kompozitlerin delinme limitleri belirlenmiştir. Ayrıca hem tek yönlü hem de düz dokuma E-Glass kompozitlerin enerji diyagramları elde edilmiştir. Test sonuçlarına göre, düşük hız etkisinin korunma sınırında dokunmuş kompozitlerin tek yönlü kompozitlerden üstün olduğu bulunmuştur. Ayrıca dokuma kompozitlerde hasar büyümesinin daha küçük bir alanda kısıtlandığını da gözlemlemişlerdir (Evcı ve diğer., 2011).

Araştırmacılar, fiber takviyeli lamine kompozitlerin düzlemde boyut etkisinin düşük hızlı darbe altında değerlendirilmesiyle ilgili çalışmışlardır. Darbe testleri 135 ve 2600 g'lık darbe kütlelerinde ve 3 m/s'lik bir darbe hızında gerçekleştirilmiştir. Çalışmalar, 150x150 mm, 150x100 mm ve 150x50 mm plaka boyutlarında, iki karşılıklı kenarı sıkılmış halde ve diğer iki serbest ve darbe yükü her bir plakanın ortasına uygulanarak gerçekleştirilmiştir. 150x100 mm plakanın delaminasyon alanı diğer ikisinden daha geniş olduğu ve maksimum darbe kuvvetinin elde edildiği görülmüştür. Sonuç olarak dikdörtgen kompozit laminanın genişliği ne kadar küçük olursa temas süresi o kadar yüksek olabileceği ve düşük hızda kompozit yapıların mekanik davranış etkisi düzlemsel boyutlarına bağlı olduğu sonucuna varmışlardır (Aslan ve diğer., 2003).

Delaminasyona sahip kompozit malzemeler üzerinde yapılan çalışmalar daha çok burulma deneylerini kapsayan çalışmalarda yapılmıştır. Düşük hızlı darbe deneyi uygulanan çalışmada ise termoset kompozit malzemeler kullanılmıştır. Bu tez kapsamında cam elyaf takviyeli polipropilen kompozitler kullanılarak termoplastikler üzerinde bir araştırma yapılmıştır.

BÖLÜM İKİ

KOMPOZİT MALZEMELER

2.1 Kompozitlerin Tanımı ve Kısa Tarihi

Kompozit terimi, özellikle kullanışlı bir bileşenin bir eksikliğini gidermek için iki veya daha fazla malzeme birleştirildiğinde mühendislikte ortaya çıkmıştır. Bir kompozit malzeme, birbirine bağlanmış iki veya daha fazla homojen fazın heterojen bir karışımı olarak tanımlanabilir. Fazlar, metal, polimer, seramik, karbon veya hatta bir sıvı veya boşluk alanı dahil olmak üzere herhangi bir malzeme sınıfında olabilir: gerçekten, en yüksek oranda gözenekli materyaller de kompozitlerdir. İki fazın varlığının çıplak gözle kolayca ayırt edilememesi veya iki fazın dağılımının yapısal ölçeğinin sağlanması şartıyla onları kullanan yapınınkinden çok daha küçükse, ortaya çıkan kompozitin kendisi fiziksel ve mekanik özelliklere sahip homojen bir malzeme olarak kabul edilebilir (Mortensen, 2007).

Kompozit malzemeler yüzyıllardır var olmuştur. İnsanların ne zaman kompozit kullanmaya başladığına dair bir kayıt yoktur. Kullanımlarının en eski kayıtlarından bazıları, kontrplak, kâğıt hamuru ve tuğlaları güçlendirmek için samanın çamurda kullanımıyla tanınan Mısırlılara aittir. Benzer şekilde, eski İnka ve Maya medeniyetleri, tuğlaları ve çanak çömlekleri güçlendirmek için bitkisel lifler kullandı. Kılıç ve zırh, orta çağda güç katmak için kaplandı. Bir örnek, çok katlı bir kompozit oluşturmak için tekrar tekrar katlanarak ve yeniden şekillendirilerek üretilen Samuray kılıcıdır (birkaç milyon tabakanın kullanılabileceği tahmin edilmektedir). Eskimolar, iglolar (eskimo evi) oluştururken buzu güçlendirmek için yosun kullanırlar. Benzer şekilde, daha fazla mukavemet için alçıda at kılı bulmak nadir değildir. Bunların hepsi insan yapımı kompozit malzemelerin örnekleridir. Bambu, kemik ve kereviz, doğada var olan hücresel kompozitlere örnektir. Kas dokusu çok yönlü lifli bir laminadır. Hem doğal hem de yapay kompozit malzemelerin çok sayıda başka örnekleri vardır (Staab, 2015).

Kompozit malzemelerin erken büyük ölçekli ticari uygulamaları, II. Dünya Savaşı sırasında (1940'ların sonları ve 1950'lerin başlarında) askeriye'nin denizcilik uygulamalarıyla başlamıştır; ancak bugün, kompozit ürünler havacılık, otomotiv, denizcilik, denizcilik, spor malzemeleri, tüketici, altyapı ve daha fazlasını içeren çok çeşitli endüstriler tarafından üretilmektedir. Yeni malzeme yenilikleri, fiyatlandırmada düşüş ve gelişmiş üretim süreçlerinin geliştirilmesinde, hemen hemen her endüstriyel sektörde kompozit malzemelerin varlığının artmasına neden olmuştur. Şekil 2.1'de bir Boeing 787 yapımında kullanılan malzemeler gösterilmiştir (Mazumdar, 2001).



Şekil 2.1 Boeing 787 yolcu uçağında kullanılan malzemeler (Campell, 2010)

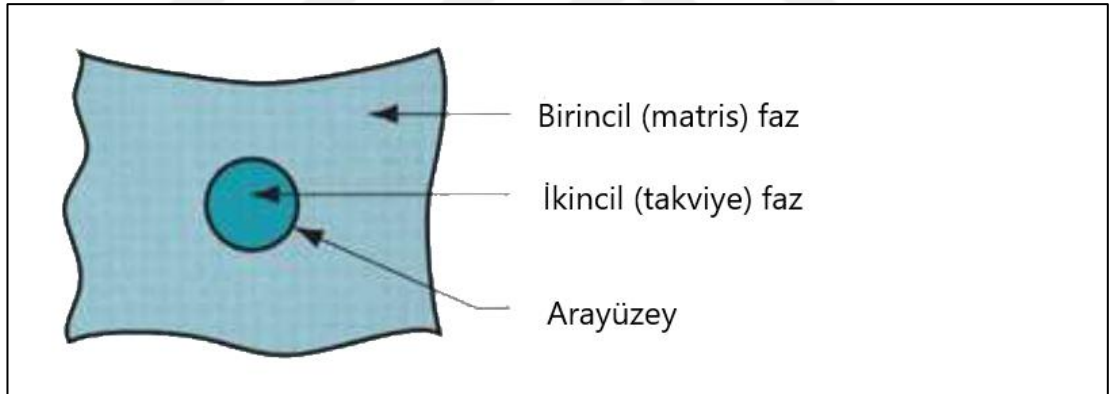
2.2 Kompozitlerin Yapısı

Bir kompozitin bileşenleri genellikle, bir veya daha fazla kesintili fazın sürekli bir faza gömüleceği şekilde düzenlenir. Süreksiz faz takviye olarak adlandırılır ve sürekli faz matristir. Bunun bir istisnası, kauçuk modifiyeli polimerler olarak bilinen bir malzeme sınıfı üreten sert bir kauçuk matrisinde asılı kauçuk parçacıklarıdır. Genel olarak, takviyeler matriste göre çok daha güçlü ve daha sağlamdır. Her iki

bileşen de gereklidir ve eğer kompozit amaçlanan şekilde gerçekleştirilecekse, her biri özel görevleri yerine getirmelidir (Staab, 2015).

Kompozitlerin fiziksel ve mekanik özellikleri, bileşenlerin özelliklerine, geometrisine ve konsantrasyonuna bağlıdır. Donatıların hacim içeriğinin artırılması, bir bileşiğin sağlamlığını ve sertliğini bir noktaya kadar artırabilir. Eğer takviyelerin hacim içeriği çok yüksekse, onları ayrı tutmak için yeterli matris olmayacaktır ve dolaştırılabılırler. Benzer şekilde, bireysel takviyelerin geometrisi ve bunların matris içindeki düzenlenmesi bir kompozitin performansını etkileyebilir. Kompozit malzemelerle tasarlanırken dikkat edilmesi gereken birçok faktör vardır. Takviye ve matris tipi, her bir bileşenin geometrik düzenlemesi ve hacim kesri, beklenen mekanik yükler, kompozit için çalışma ortamı vb. dikkate alınmalıdır (Staab, 2015).

Şekil 2.2’de bir kompozitin genel yapısının görünümü gösterilmiştir.



Şekil 2.2 Kompozit malzemelerin genel yapısı (Mallick, 2007)

Matris fazı uygulanan bir kuvveti ara yüzey vasıtasıyla takviye fazına iletir. Bu sayede takviye fazını tutarak tahribatı önler. Takviye faz, üretim esnasında matris fazın tane büyüklüğünü kontrol eder ve iletilen yükleri paylaşarak karşı koyar. Matris yapı ile takviye elemanı arasında bağlayıcılık görevi yapan ara yüzey bağı ise, genellikle kırılğan özellik göstermesine rağmen oluşan herhangi bir kuvveti çözülmeye ve kırılmaya uğramadan takviye fazına iletir. Bu bölge malzemenin

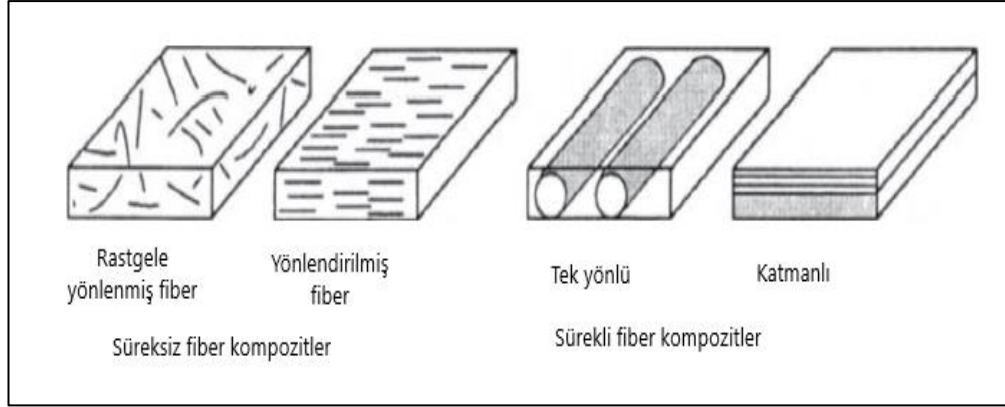
elastikiyet modülünü etkileyen en önemli bölgedir. Bu yüzden kompozit malzemenin dayanıklılığı ara yüzey bağının istenilen şekilde olmasına bağlıdır (Qu, 1993).

2.3 Kompozitlerin Sınıflandırılması

Bir kompozitin ana konsepti, matris malzemeleri içermesidir. Tipik olarak, kompozit malzeme, bir matris reçinesinde fiberlerin güçlendirilmesiyle oluşturulur. Takviyeler elyaf, partikül veya kesikli olabilir ve matris malzemeleri metaller, plastikler veya seramikler olabilir. Takviyeler polimerler, seramikler ve metallerden yapılabilir. Fiberler sürekli, uzun veya kısa olabilir (Mazumdar, 2001).

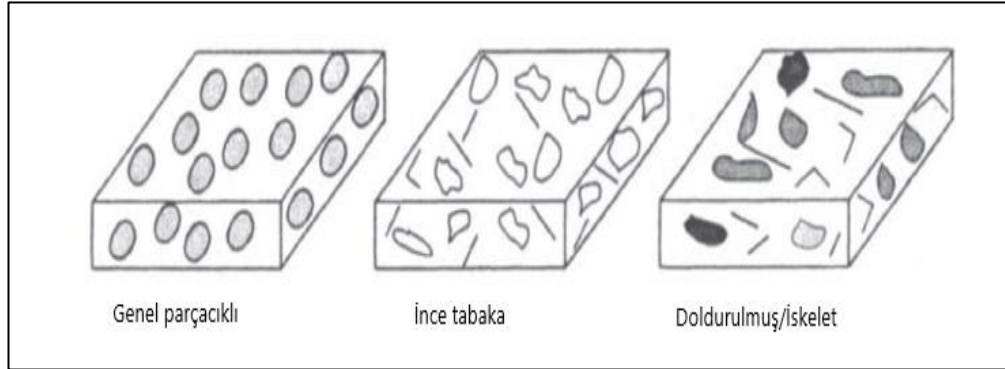
Kompozit malzemeler genellikle kullanılan takviye tipine göre sınıflandırılır. İki geniş kompozit sınıfı lifli ve parçacıklıdır. Her birinin kendine has özellikleri ve uygulama potansiyeli vardır ve aşağıdaki gibi belirli kategorilere ayrılabilir (Staab, 2015).

- Elyafli (fiberli): Elyafli bir kompozit, bir matris malzemesinde sürekli (uzun) veya kesik fiberlerden oluşur. Sürekli bir elyaf, geometrik olarak, çok yüksek bir uzunluk/çap oranına sahip olması ile karakterize edilir. Genellikle dökme malzemedan daha güçlü ve daha katıdırlar. Fiber çapları genellikle 0,00012 ile 0,0074'in arasında değişmektedir. Bir kesik elyaf genellikle kısa, güdük bir lif olarak kabul edilir. Çapları genellikle 0,787 ile 3937 μ 'in arasında değişmektedir. Takviyelerin süresiz elyaf veya kesikli olduğu kompozitler, şekil 2.3'de gösterildiği gibi rastgele veya yönlendirilmiş görünümde olabilir. Sürekli fiber kompozitler, tek katmanlı veya çok katmanlı olabilir. Tek katmanlı sürekli elyaf kompozitleri tek yönlü veya dokuma olabilir ve çok katmanlı kompozitler genellikle laminalar olarak adlandırılır (Staab, 2015).



Şekil 2.3 Fiberli kompozitlerin şematik gösterimi (Staab, 2015)

- **Parçacıklı:** Parçacıklı bir kompozit, bir matris içinde asılı duran parçacıklardan oluşması ile tanımlanır. Parçacıklar herhangi bir şekle, boyuta veya yapılandırmaya sahip olabilir. Şekil 2.4’de gösterildiği gibi iki tane partikül sınıfı vardır; ince tabakalı ve doldurulmuş/iskelet. Mukavementin tasarımın önemli bir bileşeni olmadığı birçok uygulama için kullanılırlar (Staab, 2015).

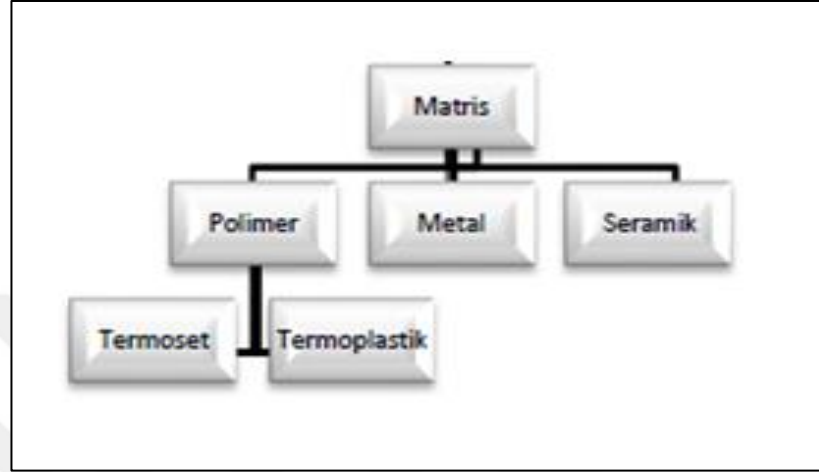


Şekil 2.4 Parçacıklı kompozitlerin şematik gösterimi (Staab, 2015)

2.4 Kompozitlerin Matris Malzemelerine Göre Sınıflandırılması

Bir kompozit içindeki matris malzemesi bir polimer, bir metal veya bir seramik olabilir. Kullanılan matrise bağlı olarak, kompozit malzemeler şekil 2.5’te gösterildiği gibi polimer matris kompozitleri (PMK'ler), metal matris kompozitleri

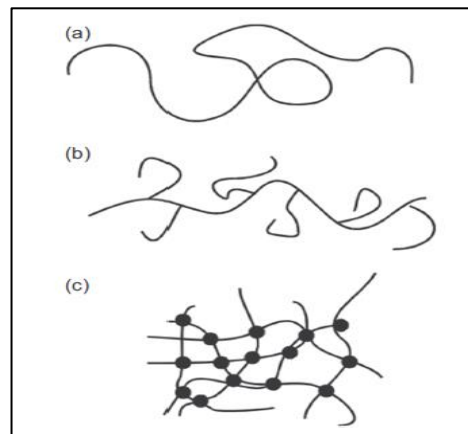
(MMK'ler) veya seramik matris kompozitleri (SMK'ler) olarak sınıflandırılır. Ticari olarak kullanılan kompozitlerin çoğu, polimer matrislerine dayanmaktadır; Bununla birlikte hem MMK hem de SMK yüksek sıcaklık uygulamalarına büyük ilgi çekmektedir (Mallick, 2007).



Şekil 2.5 Kompozit malzemelerin matrise göre sınıflandırılması (Mallick, 2007)

2.4.1 Polimer Matrisli Kompozitler

Polimerler (veya makromoleküller), birbirine kovalent olarak bağlanmış, monomerler veya tekrarlayan üniteler adı verilen daha küçük birimlerden oluşan çok geniş moleküllerdir. Polimer yapısı değişebilir. Şekil 2.6'de üç olası molekül yapısı gösterilmektedir (Njuguna, 2016).



Şekil 2.6 Kovalent bağlı moleküler konfigürasyon tipleri a) Doğrusal zincir, b) Dallı molekül, c) Çapraz bağlı ağ (Njuguna, 2016)

En yaygın geliştirilmiş kompozitler, ince çaplı liflerle (örneğin grafit, aramidler, bor) takviye edilmiş bir polimerden (örneğin epoksi, polyester, üretan) oluşan polimer matris kompozitlerdir (PMK). Örneğin, grafit/epoksi kompozitler ağırlık karşılaştırma esasına göre çelikten yaklaşık beş kat daha güçlüdür. En yaygın kompozit olma nedenleri arasında düşük maliyet, yüksek mukavemet ve basit üretim ilkeleri bulunur. PMK'lerin temel dezavantajı düşük çalışma sıcaklıkları, yüksek ısı ve nem genleşme katsayıları ve belirli yönlerde düşük elastik özellikler içermesidir (Kaw, 2006). Polimer matrisli kompozitler farklı kimyasal bağlar sebebiyle Termoplastik ve Termoset olmak üzere ikiye ayrılırlar.

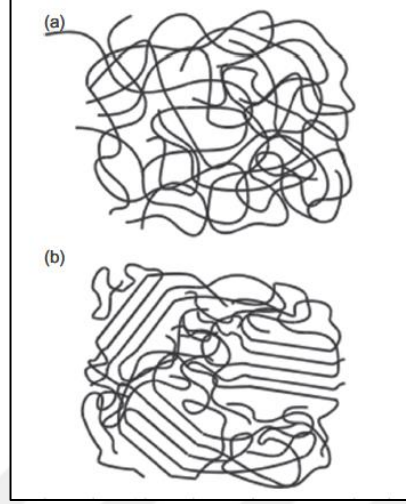
2.4.1.1 Termosetler

Adından da anlaşılacağı gibi, termoset plastikler veya termosetler kalıcı bir şekilde ayarlanır, iyileştirilir veya sertleştirilir. Sertleştirme işlemi genellikle oda sıcaklığı koşulları altında, ısı veya ultraviyole (UV) ışığı altında hızlı bir şekilde gerçekleşir ve polimerin geri dönüşümsüz bir çapraz bağlanmasına yol açar. Termoset polimerleri, polimer zincirlerini üç boyutlu olarak bağlayan kovalent bağlara sahiptir. Bu bağlantılar, zincirlerin birbirinden geçmesini önler, daha yüksek bir modül ve daha yüksek sünme direnci sağlar. Genellikle termosetler termoplastiklerden daha kırılmandır. Termosetler, tüm moleküllerle kovalent bağlara sahip çapraz bağlanmış veya ağ içyapılarına sahiptir. Isıtma ile ayrışırlar. Çapraz bağlama işlemiyle katılaşınca, yeniden şekillendirilemezler. Yaygın örnekler epoksiler, polyesterler, fenolikler, üre, melamin, silikon ve polimitlerdir (Njuguna, 2016).

2.4.1.2 Termoplastikler

Termoplastikler, güçlü molekül içi bağlara sahip, ancak zayıf moleküller arası bağlara (Van der Waals) sahip olan doğrusal veya dallanmış zincir moleküllerinden oluşur. Isı ve basınç uygulanarak yeniden şekillendirilebilirler ve yapılarında Şekil 2.7'deki gibi ya yarı kristal ya da amorf turlar. Örnekler arasında polietilen, polipropilen, polistiren, naylonlar, polikarbonat, poliasetaller, poliamidimitler,

polieter eter keton, polisülfon, polifenilen sülfid, polieterimid ve benzerleri bulunur (Njuguna, 2016).



Şekil 2.7 a) Amorf polimer, b) Yarı kristal polimer (Njuguna, 2016)

Termoplastikler işlem sıcaklıklarında yüksek viskoziteye sahiptir, bu da işlemlerini daha zor hale getirir. Termoplastiklerin akışını sağlamak için ihtiyaç duyulan yüksek kayma gerilmeleri, elyafların hasar görmesine neden olarak elyaf uzunluğunun 10 ila 100 kat azalmasına neden olmaktadır. Bu nedenle, yeni termoplastik malzemelerin ve işlemlerin üretiminde ana hedeflerden biri akışkandaki viskoz etkileri azaltmaktır (Barbero, 2017).

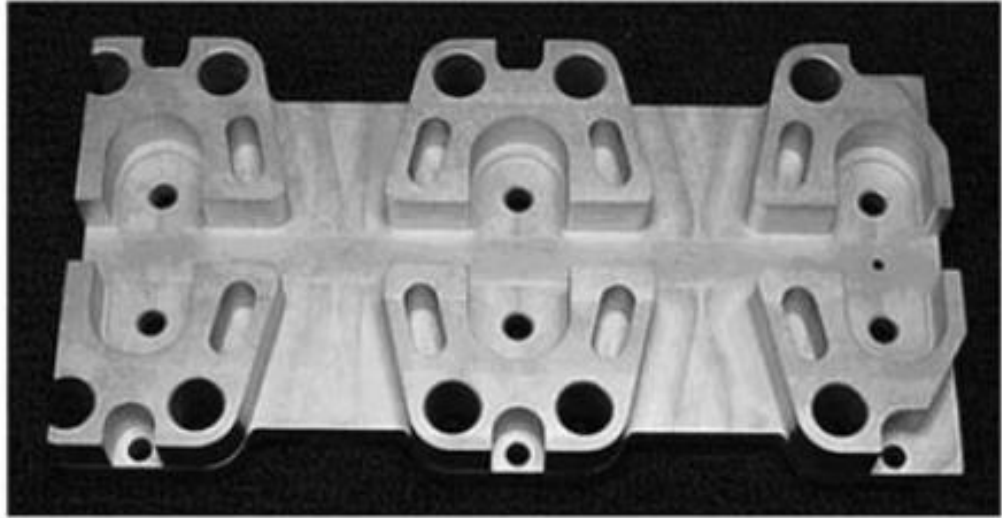
Termoplastikler soğutmalı depolama gerektirmez ve neredeyse sınırsız raf ve kap ömrüne sahiptir. Ayrıca, termoplastik kompozitler tamir edilebilir, çünkü yumuşatılmış aşamaya geçiş herhangi bir sayıda ısı uygulanarak gerçekleştirilebilir (Barbero, 2017).

2.4.2 Metal Matrisli Kompozitler

Metal matrisli kompozitler, rijit takviyelerin sünek bir metal veya alaşım matrisine gömüldüğü bir tür kompozit malzemedir. Takviyeler parçacık, kısa elyaf veya sürekli elyaf formunda olabilir. MMK'ler, süneklik ve tokluk gibi metalik özellikleri ile sertlik ve modül gibi seramik özellikleri birleştirerek, kesme ve

sıkıştırma işlemlerinde daha fazla güç ve daha yüksek servis sıcaklığı yetenekleri sağlar. Havacılık ve otomotiv endüstrilerinde ve diğer yapısal uygulamalarda kullanım için MMK'lere olan ilgi, bu çekici fiziksel ve mekanik özellikler nedeniyle son 30 yılda artmıştır. Ayrıca, nispeten ucuz takviyelerin mevcudiyeti ve çoğaltılabilir mikro yapıya ve özelliklere sahip MMK'ler üretmek için çeşitli işlem yollarının geliştirilmesi, MMK'lere olan ilgiyi daha da arttırmaktadır (Balasubramanian, 2013).

Metal matris kompozitler, yüksek mukavemet, yüksek sıcaklık dayanımı, düşük termal genleşme katsayıları ve bazı durumlarda daha iyi aşınma direnci gibi özellikleri ile ana metallere kıyasla bir dizi avantaj sunar. Bununla birlikte, yüksek maliyetleri nedeniyle MMK'ler için ticari uygulamalar azdır. Süreksiz takviyelendirilmiş MMK'lerin bazı sınırlı kullanımları vardır, ancak sürekli takviyeli MMK'ler için neredeyse hiç geçerli uygulama yoktur. Şekil 2.8'de metal matrisli kompozit örneği gösterilmiştir (Campbell, 2010).



Şekil 2.8 Metal matrisli kompozitten elektronik bileşen (Campbell, 2010)

2.4.3 Seramik Matrisli Kompozitler

Seramik malzemeler çok sert ve kırılgandır. Genellikle, oksijen, karbon veya azot gibi bir metal olmayan birleştirilmiş bir veya daha fazla metalden oluşurlar. Güçlü kovalent ve iyonik bağlara sahipler. Karakteristik olarak, seramikler düşük kırılma şekil değiştirmesi ve düşük tokluk veya kırılma enerjilerine sahiptir. Kırılgan olmalarına ek olarak, özelliklerinde homojenliğe sahip değildir, düşük termal ve mekanik şok direncine sahiptirler ve düşük gerilme mukavemetine sahiptirler. Öte yandan, seramik malzemeler çok yüksek elastik modüllere, düşük yoğunluklara sahiptir ve çok yüksek sıcaklıklara dayanabilirler (Chawla, 2012).

Başlangıçta bu malzemeler havacılık uygulamaları için geliştirildi. Şimdi daha fazla yeni alana tanıtıldılar ve maliyetleri önemli ölçüde düşürülürse uygulama alanları önemli ölçüde genişleyecektir. C/C kompozitler, uçak fren disklerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Diğer özel uygulamalar roket nozulları, iniş araçlarının termal kalkanları ve uzay mekiğidir. Askeri uçak motorlarının kapakları endüstriyel olarak C/SiC kompozitler kullanılarak üretilir. Yanma odaları ve türbinler gibi hava taşıtı motorlarının başka parçaları ve sıcak filtreleme sistemleri, brülörler ve ısı geri kazanıcılar gibi enerji üretim bileşenleri geliştirilmektedir. Şekil 2.9'da seramik matrisli kompozit örneği gösterilmiştir (Balasubramanian, 2013).

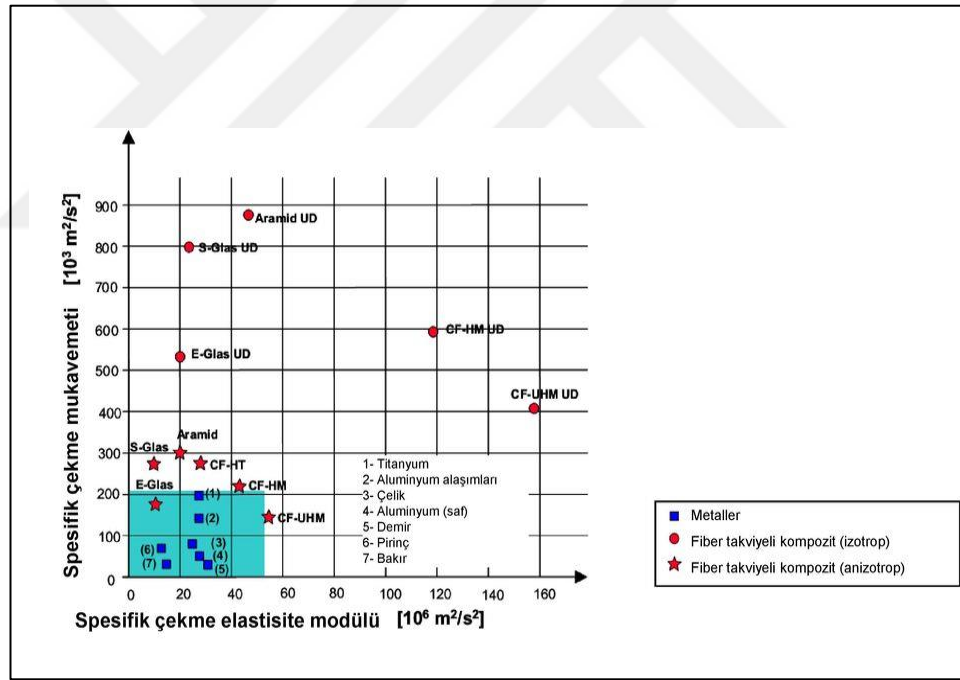


Şekil 2.9 Seramik matrisli kompozitten egzoz nozulu (Campbell, 2010)

2.5 Kompozit Malzemelerin Avantajları ve Dezavantajları

Kompozitlerin temel avantajı, yüksek özgül sertliği ve dayanıklılığıdır. Bu nedenle, bileşen ağırlığı kompozitler kullanılarak büyük ölçüde azaltılabilir (Balasubramanian, 2013).

Yüksek mukavemetli elyafların (özellikle karbon) spesifik mukavemeti (mukavemet/yoğunluk) ve spesifik modülü (modül/yoğunluk) diğer benzer havacılık metalik alaşımlarınınkinden daha yüksektir. Bu, daha yüksek performans, daha fazla yük tasarrufu, daha uzun menzil ve yakıt ile sonuçlanan daha fazla ağırlık tasarrufuna dönüşür. Şekil 2.10'da metal alaşımları ve kompozit malzemelerin mukavemet değerleri kıyaslanmıştır (Campbell, 2010).



Şekil 2.10 Yüksek mukavemetli kompozitlerin ve bazı havacılık alaşımlarının modülünün karşılaştırılması (Campbell, 2010)

ABD donanması da uçak yapılarının baş mühendisi, bir zamanlar yazara kompozitleri sevdiğini, çünkü çürümüyorlar ve yorulmuyorlar (yorulma) demiştir. Alüminyum alaşımlarının korozyonu hem ticari hem de askeri uçaklar için büyük bir maliyet ve sürekli bir bakım problemidir. Tablo 2.1'de kompozitlerin ve diğer

malzemelerin özgül özellikleri belirtilmiştir. Kompozitlerin korozyon direnci, desteklenebilir maliyetlerinde büyük tasarruflara neden olabilir (Campbell, 2010).

Tablo 2.1 Kompozit ve klasik malzemelerin özelliklerinin kıyaslanması (Mallick, 2007)

Malzeme	Yoğunluk ρ gr/cm ³	Çekme Muk. σ_c MPa	Elastisite Modülü E GPa	Özgül Çekme Mukavemeti σ_c/ρ	Özgül Rijitlik E/ ρ
Alaşımsız Çelik	7.9	459	203	58	26
Alüminyum	2.8	84	71	30	25
Al alaşımı-2024	2.8	247	69	88	25
Pirinç	8.5	320	97	38	11
Ahşap (Kayın)	0.7	110	13	157	19
Kemik	1.8	138	26	75	14
Bor-Epoksi	1.8	1600	224	889	124
Karbon-Epoksi-1	1.6	1260	218	788	136
Karbon-Epoksi-2	1.5	1650	140	1100	93
Kevlar-Epoksi	1.4	1400	77	1000	55
S Camı-Epoksi	1.8	1400	56	824	33
E Camı-Epoksi	1.8	1150	42	639	23

Montaj maliyetleri, bir uçağın maliyetinin yüzde 50'sine tekabül edebilir. Kompozitler, montaj işçiliği miktarını ve gerekli bağlantı elemanlarının sayısını önemli ölçüde azaltma fırsatı sunmaktadır (Campbell, 2010).

Kompozitler, temel maliyetten maliyete göre geleneksel malzemelerden daha pahalıdır. Kompozitler ağırlık bazında sırasıyla alüminyum ve çelikten yaklaşık 5 ila 20 kat daha pahalıdır. Fakat, kompozitlerin performans seviyeleri yüksektir. Kompozitler, yalnızca malzeme seçimi sırasında yüksek performansın ana etken olduğu bir yerde tercih edilir (Balasubramanian, 2013).

Kompozitler tamamen farklı tür malzemelerle yapıldığından, ara yüzde kusur oluşma olasılığı yüksektir. İşleme sırasında büyük özen gösterilmediği sürece, hata kaçınılmazdır (Balasubramanian, 2013).

Montaj sırasında, yanlış parça kullanımı veya yanlış takılmış bağlantı elemanları delaminasyonlara neden olabilir. Hizmet sırasında, düşmüş araçlardan veya uçağa

giren forkliftlerden kaynaklanan düşük hızlı darbe hasarı hasara neden olabilir. Hasar, yüzeyde sadece küçük bir girinti olarak görünebilir, ancak laminalar boyunca yayılarak karmaşık bir delaminasyon ve matris çatlakları ağı oluşturabilir (Campbell, 2010).

Kompozitlerin üretim oranı genellikle düşüktür. Kompozitler, otomobil endüstrisi gibi yüksek hacimli üretim endüstrileri için uygun olmayabilir. Düşük üretim hızı problemi, termoplastik kompozitler ve kalıplama bileşikleri ile bir dereceye kadar aşılmaktadır (Balasubramanian, 2013).

Geri dönüşüm, kompozitlerin geniş kullanımı için başka bir engeldir. Kompozitlerin geri dönüşümü, geleneksel metalik malzemelerle karşılaştırıldığında zordur. Polimer matrisin iyi hava direnci, geri dönüşüm sırasında bir engeldir. Şu anda kompozitlerin geri dönüşümü için çeşitli seçenekler mevcuttur, ancak bu seçenekler biraz pahalıdır (Balasubramanian, 2013).

2.6 Düşük Hızlı Darbe Hasarları

Darbe hızı, düşük hız ve yüksek hız etkisi olmak üzere iki türe ayrılır, bu sınıflandırmada düşük darbe yüklemesi önemlidir, çünkü hedef ile atıcı arasında ne kadar enerji aktarımının gerçekleştiğine bağlı olarak, atıcının hızı, enerji dağılımının ve hasar yayılımı nasıl olacağına bağlı olarak gerçekleşecek. Düşük hızda darbe yükü nedeniyle iç kısımdan zarar görmüş kompozit malzemelerin çoğu, iç hasarın kalıntı dayanımını ve kompozit malzemenin kullanım ömrünü azaltır. Bakım ve servis sırasında genellikle düşük hızlı darbe gerçekleşir, ancak bu yük kompozit yapılar için çok tehlikelidir (Patil ve diğer., 2018).

Tek yönlü kompozit laminalarda düşük hızlı/düşük enerjili bir darbe üç tür hasara yol açar: matris çatlakları, fiber kopması ve delaminasyon (Silberschmidt, 2016).

2.6.1 Matris Çatlakları

Ortaya çıkan ilk hasar geleneksel olarak matris çatlamasıdır. Enlemesine düşük hız etkisine bağlı gerçekleşir. Matris hasarı ayrıca fiber ve matris ara yüzeyi arasındaki bağın kopması şeklinde de oluşur. Bu hasar büyüdüğünde, hızlı bir şekilde delaminasyon meydana gelir. Bu iki hasar olayı arasındaki etkileşim darbe testleri sırasında açıkça Şekil 2.11’de görülmektedir (Silberschmidt, 2016).

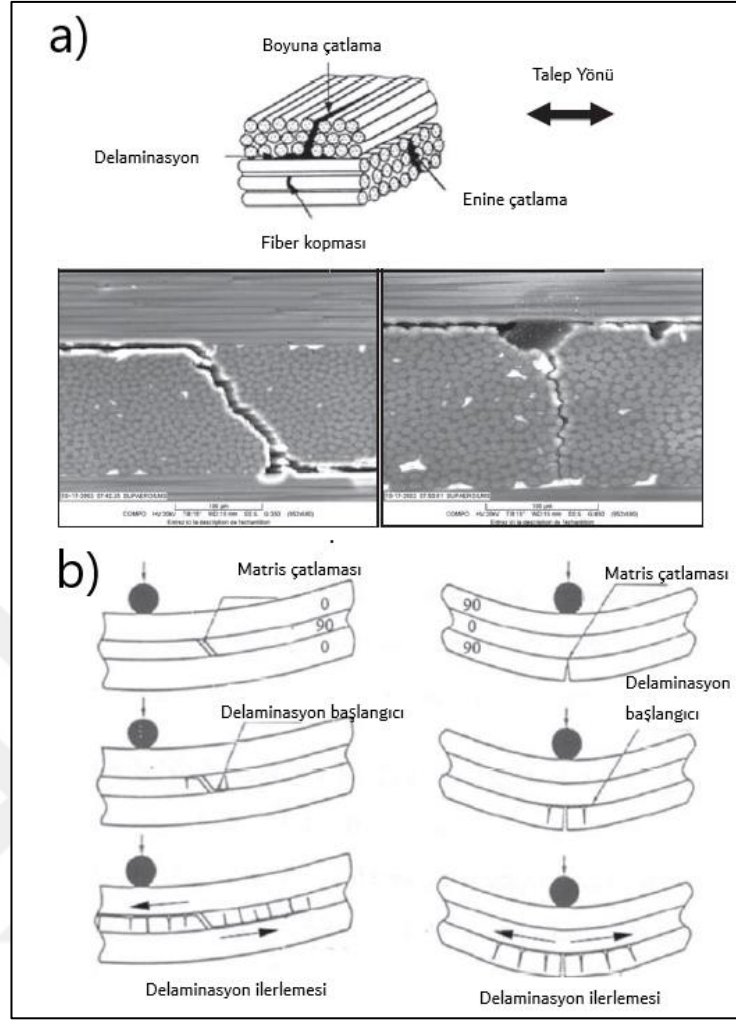
2.6.2 Delaminasyon

Delaminasyon, aynı katman grubundaki tabakalar arasında değil, farklı fiber oryantasyonlarına sahip tabakalar arasında matris bakımından zengin bölgede meydana gelen bir kırılmadır. Matris kırılması ve delaminasyon arasında sıkı bir bağ mevcuttur. Matris kırılması delaminasyonun başlaması açısından gerekli bir faktördür. Delaminasyonlar, tabakalar arası ara yüzey bölgesinde meydana gelirler. Delaminasyonun en önemli sebebi; tabakalar arasındaki bu eğilme rijitlik farklılığı ve eğilme kaynaklı gerilmelerdir (Abrate, 2011).

2.6.3 Fiber Kopması

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

1. Yüksek lokal gerilmeler ve nüfuziyetin yaratmış olduğu etkilerdir (esas olarak kesme kuvvetleri tarafından idare edilen etkiler). Bu olay çarpan cismin hemen altında gerçekleşmektedir.
2. Yüksek eğme gerilmeleridir. Bu olay ise, darbeye maruz kalmayan yüzde meydana gelmektedir (Abrate, 2011).



Şekil 2.11 a) Tek yönlü laminalı kompozitlerde darbe hasarı, b) İç laminalar hasarı etkileşimi (Silberschmidt, 2016)

BÖLÜM ÜÇ

ÜRETİM MALZEMELERİ

Bu çalışmada üretilen kompozit malzemelerin tümünde üç farklı delaminasyon malzemesinin yanı sıra pultrüzyon yöntemi ile üretilmiş cam elyaf takviyeli homopolipropilen kompozit granüller ve termoplastik prepreg laminalar kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan delaminasyon malzemelerinin kompozitin kalınlığına bir etkisi olmamıştır. Üretilen tüm kompozitlerde matris malzemesi ve takviye malzemesi aynıdır. Çalışmada üretilen kompozitlerin çekirdek malzemesi uzun cam elyaf takviyeli polipropilen granül ve matris malzemesi tek eksenli cam elyaf takviyeli polipropilendir. Delaminasyon malzemesi olarak ise açık yeşil renkli vakum torbası, koyu yeşil renkli vakum infüzyon filesi ve pembe renkli ayırıcı film kullanılmıştır.

3.1 Tek Eksenli Cam Elyaf Takviyeli Prepreg Laminalar

Cam elyafları, polimer matrisli kompozitlerde en yaygın kullanılan fiber takviyelerdir. Dökme cam yüksek sertlik, orta rijitlik, şeffaflığa ve kimyasal dirence sahiptir. Buna ek olarak elyaf formundaki camlar yüksek mukavemet ve esnekliğe sahiptir. Birçok yapısal kompozit, baskılı devre kartı ve çok çeşitli özel ürünler, takviye olarak cam elyaflar kullanılarak üretilmektedir (Balasubramanian, 2013).

Yaygın olarak kullanılan cam elyafların kimyasal bileşimleri Tablo 3.1'de verilmektedir. Genel amaçlı elyaflar, kullanılan E-cam çeşidi olmak üzere kullanılan cam liflerinin %90'ından fazlasını oluşturur. E-cam, bileşik endüstriler için maliyet ve işlem avantajları nedeniyle en çok tercih edilen elyaf türüdür. Başlangıçta bu tip daha iyi elektriksel yalıtım özellikleri nedeniyle elektriksel uygulamalar için geliştirilmiştir (Balasubramanian, 2013).

Tablo 3.1 Farklı Cam Elyaf Türlerinin Kimyasal Bileşimi (Balasubramanian, 2013)

Çeşitleri	SiO ₂	Al ₂ O ₃	B ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O/K ₂ O	Fe ₂ O ₃	ZnO	BeO	TiO ₂	ZrO ₂	Li ₂ O	Diğerleri
E	52.4-53.2	14.4-14.8	8.0-10.0	4.5	17.5	0.5	0.4	—	—	—	—	—	—
E Boron free	59.0-60.0	12.1-13.2	—	3.1-3.4	22.1-22.6	0.8-0.9	0.2	—	—	0.5-1.5	—	—	—
C	64.4	4.1	4.7	3.3	13.2	9.4	—	—	—	—	—	—	BaO: 0.9
S	64.2	24.8	0.01	10.27	0.01	0.24	0.21	—	—	—	—	—	BaO: 0.2
Z	68	0.7	—	—	—	12.3	—	—	—	1.5	16.5	1.0	—
M	53.7	—	—	9.0	12.9	—	0.5	—	8.0	7.9	2.0	3.0	CeO ₂ : 3.0
ECR	58.0	11.6	—	2.0	21.7	1.2	0.1	2.9	—	2.5	—	—	—
D	55.7-74.5	0.3-13.7	22.0-26.5	0-1.0	0.5-2.8	0.2-2.3	—	—	—	—	—	—	—
Silica	99.99	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Prepreg, önceden reçine emdirilmiş elyaf takviyelerinin kısa şeklidir. Bir prepreg, tek yönlü veya dokuma fiber takviyeli polimer kompozitin ince bir levhası veya laminasıdır. Kolayca çıkarılabilir ayırıcılar ile her iki taraftan da korunur. Bu nedenle prepregler, belirli polimer kompozitlerin imalatında bir ara ürün olarak kabul edilir. Tek yönlü prepregler, 50-250 m uzunluğunda bir rulo şeklinde olabilir ve genişliği 75 ile 1500 mm arasındadır. Kalınlık genellikle 0,125 mm'dir (Balasubramanian, 2013).

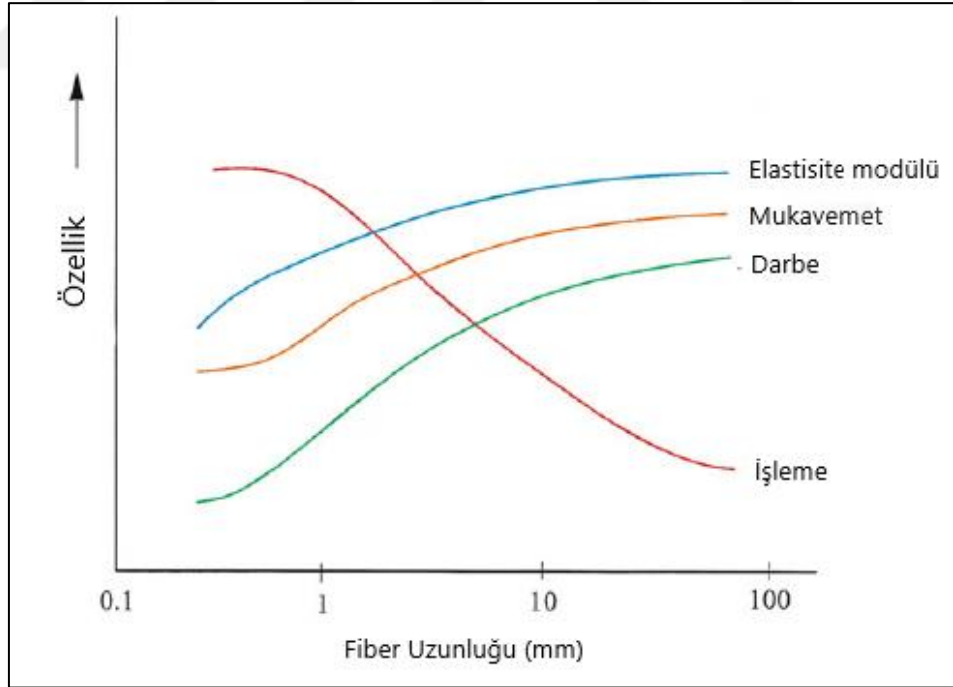
Bu çalışmada Şekil 3.1'de gösterilen tek yönlü cam elyaf takviyeli termoplastik prepregler matris malzemesi olarak kullanılmıştır.



Şekil 3.1 Tek eksenli cam elyaf takviyeli termoplastik prepreg (Kişisel arşiv, 2019)

3.2 Cam Elyaf Takviyeli Homopolipropilen Granüller

Termoplastik kompozit üretiminin en yaygın yolu, kısa uzunlukta elyafların (yaklaşık 2-3 mm veya daha az) termoplastik matris ile karıştırılmasını ve kompozitin enjeksiyon kalıplamasını içermektedir. Bu kısa elyaf takviyeli kompozitlerin özellikleri, güçlendirilmemiş matris malzemesinin özelliklerinden daha iyidir, ancak takviye edici elyafın tam potansiyeline ulaşamaz. Literatürde LFT kısaltması, uzunluğu 10 mm'den büyük lifler içeren bir termoplastik matris içeren kompozitlere atıfta bulunmak için kullanılmaktadır. Şekil 3.2, elyaf uzunluğunun bir fonksiyonu olarak bir kompozitin bazı mekanik özelliklerinin şematik bir şekilde değişimini göstermektedir. Sertlik ve mukavemetteki artışın yanı sıra, artan fiber uzunluğu ile darbe özelliklerinde iyileşme olduğuna dikkat edin. Bu, genellikle LFT kompozitleri olarak adlandırılan uzun elyaflı termoplastik matris kompozitlerin işlenmesinde yeniliklere yol açmıştır (Chawla, 2012).



Şekil 3.2 Bir kompozitin bazı mekanik özelliklerinin fiber uzunluğunun bir fonksiyonu olarak değişimi (Chawla, 2012)

Bu çalışma kapsamında kullanılan Duramax LFT50-PP, pultruzyon yöntemi ile üretilmiş, %50 uzun cam elyaf takviyeli homopolipropilen kompozit granüldür. Tablo 3.2’de özellikleri gösterilmiştir. Termoplastik malzemenin uzun cam elyafı ile güçlendirilmiş olması, yüksek mekanik mukavemete sahip olmasını sağlamaktadır. Bu ise, ürünün yüksek mekanik dayanım isteyen parçalarda kullanılmasına olanak sağlar (Nuh Kompozit, 2015).

Tablo 3.2 %50 elyaf oranına sahip uzun cam elyaf takviyeli polipropilenin mekanik özellikleri (Nuh kompozit, 2015)

Mekanik Özellik	Değer	Birim	Test Metodu
Yoğunluk	1,33	g/cm ³	ISO 1183
Çekme Dayanımı	121	MPa	ISO 527
Çekme Dayanımı Modülü	10100	MPa	ISO 527
Eğilme Dayanımı	205	MPa	ISO 178
Eğilme Dayanımı Modülü	9180	MPa	ISO 178
IZOD Darbe Dayanımı, Çentiksiz (11j)	48,5	kJ/m ²	ISO 180
IZOD Darbe Dayanımı, Çentikli (11j)	17,5	kJ/m ²	ISO 180
HDT (0,45 MPa)	158	°C	ISO 75B

Şekil 3.3’te üretimde kullanılan %50 cam elyaf oranlı polipropilen granüller gösterilmiştir. Üretilen tüm numunelerin hepsinde takviye malzemesi olarak %50 cam elyaf oranlı beyaz renkli olan granüller kullanılmıştır. Kullanılan bu granüller Nuh Kompozit San. Ve Tic. AŞ’den temin edilmiştir.



Şekil 3.3 Uzun cam elyaf takviyeli polipropilen granüller (Kişisel arşiv, 2019)

3.3 Delaminasyon Malzemeleri

Tez kapsamında kompozit malzemelerdeki delaminasyon etkisi araştırıldığından 3 farklı delaminasyon malzemesi kullanılmıştır. Bu malzemeler sırasıyla vakum torbası, vakum infüzyon filesi ve ayırıcı filmidir.

Vakum torbası filmi Şekil 3.4'te gösterilen, ileri kompozit endüstrilerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu film, Vakum infüzyon adı verilen işlemde kalıp yüzeyini vakum şartlarında kaplamak ve sızdırmaz yapmak için kullanılır. Bu malzeme, yüksek sıcaklık dayanımı, tokluk, iyi esneklik, yüksek uzama ve çok daha az geçirgenlik gibi mükemmel fiziksel özellikler nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır. Normalde yeşil renge sahip ısıya dayanıklı ve malzemesi naylondur. Yüksek basınçlarda ve 190°C'ye varan sıcaklıklarda birkaç saat çalışabilen mükemmel uzama ve ısıl yaşlanma özelliklerine sahiptir. Kalınlığı yaklaşık 0,075 mm'dir (Exportersindia, 1997).



Şekil 3.4 Yeşil transparan renkli vakum torbası (Exportersindia, 1997)

Vakum infüzyon filesi, daha kompleks kalıp şekilleri için akış ortamı sağlayarak kalıp üzerinde mükemmel uygunluklarıyla birlikte akış ortamı özellikleri sunan bir çözümlü polipropilen infüzyon ağıdır. Zorlu kalıpların vakum reçine infüzyonu sırasında reçineyi, lamina yoluyla dağıtmak için bir akış ortamı olarak kullanılmaktadır. Şekil 3.5'te kalınlığı 1,4 mm olan vakum infüzyon filesi gösterilmiştir (Kompozitsan, 2017).



Şekil 3.5 Vakum infüzyon filesi (Kompozitsan, 2017)

Ayırıcı filmin temel amacı, vakumlu torbalama için yardımcı malzemenin kullanımının uygun şekilde serbest bırakılmasını sağlamaktır. Ayırıcı filmler doğrudan lamina ile temas halinde yerleştirilir. Laminayı, serbest bırakma özelliklerine sahip olmayan havalandırma kumaşlarından ayırırlar. Mevcut birçok

ayırıcı filmi vardır ve seçim, söz konusu bileşen ve reçine sisteminin sertleşme sıcaklığına, basıncına ve karmaşıklığına bağlıdır. Çeşitli iyileşme sıcaklığı gereksinimlerini, kalınlıkları, gerilme kuvvetlerini, yapışmayı, yüksek servis sıcaklıklarını vb. karşılamak için çeşitli ayırıcı filmler mevcuttur (Exportersindia, 1997).

Şekil 3.6'da bölümümüzde bulunan ve üretimde kullanılmış olan kırmızı transparan ayırıcı film ve yeşil transparan vakum torbası gösterilmiştir. Ayırıcı filmin kalınlığı yaklaşık olarak 0,03 mm (30 μ m)'dir.



Şekil 3.6 Kırmızı transparan ayırıcı film ve yeşil transparan renkli vakum torbası (Kişisel arşiv, 2019)

BÖLÜM DÖRT

ÜRETİM VE CİHAZLAR

Bir parçayı üretmek için genellikle ham madde, kalıp, ısı ve basınca ihtiyaç duyulur. Kompozit üretilirken öncelikle takviye malzemesine, matris malzemeye, parça şekline, istenen mekanik ve fiziksel özellikler göz önünde bulundurularak üretim yöntemi seçilir. Bu tez kapsamında termoplastik kompozit üretimi için uygun olan sıcak presleme yöntemi tercih edilmiştir. Üretilen delaminasyonlu ve delaminasyonsuz numunelere bölümümüzde bulunan darbe cihazında düşük hızlı darbe deneyleri uygulanmıştır.

4.1 Üretim ve Deneyde Kullanılan Cihazlar

Bu çalışma kapsamında termoplastik kompozit numunelerin üretimi ve deney aşamalarında kullanılan cihazlar şu şekilde sıralanabilir:

- ✓ Sıcak presleme cihazı
- ✓ Darbe cihazı

4.1.1 Sıcak Presleme Cihazı

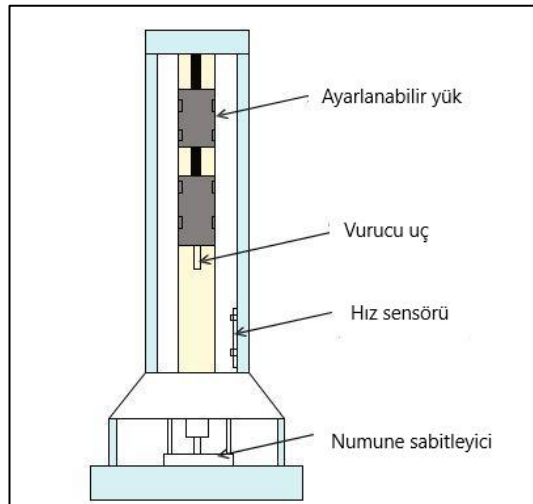
Bölümümüzde bulunan ve Şekil 4.1’de gösterilen Fontijne Presses markasının LabEcon 600 serisi presleme cihazı termoplastik kompozit üretimi için çalışma kapsamında kullanılmıştır. Cihaz dokunmatik bir kontrol ekranına sahiptir. Çenelerin boyutu 400x400 mm ve maksimum çene açıklığı 200 mm’dir. Uygulanabilen maksimum sıcaklık 600 kN ve maksimum sıcaklık değeri 300°C’dir. Cihazın stabil bir basınç kuvveti uygulaması için otomatik kontrollü hidrolik basınına sahiptir (Fontijnepresses, 2018).



Şekil 4.1 LabEcon 600 serisi pres cihazı (Fontijnepresses, 2018)

4.1.2 Darbe Cihazı

Çalışma kapsamında düşük hızlı darbe deneyi için kullanılan darbe cihazının bölümleri Şekil 4.2’de gösterilmiştir. Kullanılan vurucu uç yarı küreseldir. Ağırlığı 626 gr ve çapı 12,7 mm’dir. Vurucu uca bağlı veri okuyucu sayesinde ayarladığımız enerjilere göre yapılan testte deney verileri alınmaktadır. Bu verilerde temas kuvveti, enerji, yer değiştirme ve zaman grafikleri istenilen aralıkta alınabilmektedir.



Şekil 4.2 Düşük hızlı darbe cihazı bölümleri (Nagappa, 2015)

Bölümümüzde kullanılan darbe cihazı CEAST-Fractovis Plus Şekil 4.3'te gösterilmiştir. Cihazın özellikleri şu şekildedir:

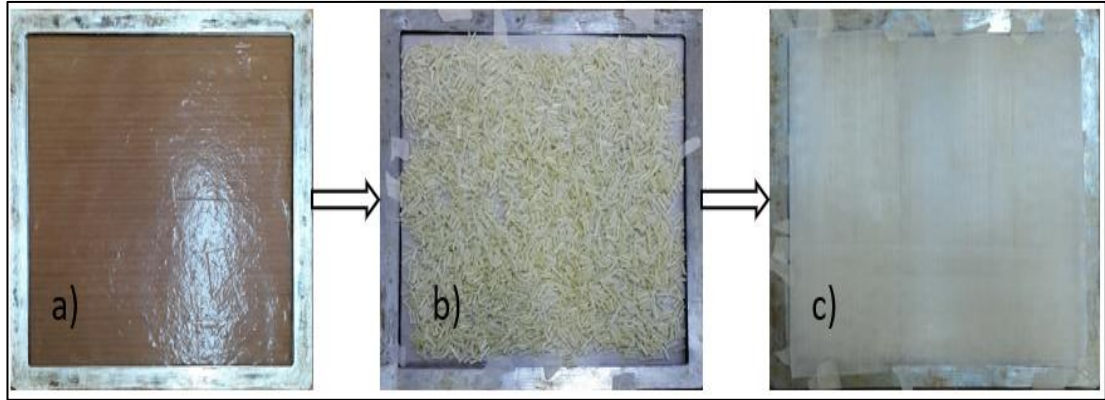
- Cihaz ağırlık düşme prensibine göre çalışmaktadır.
- Darbe deneyleri maksimum 1800 Joule enerji değerine kadar çıkabilmektedir.
- Kullanıcı güvenliği için koruyucu kapı ve paneller ile çevrili bulunmaktadır.
- Darbe deneylerini -100°C ile 150°C sıcaklıkları arasında yapabilecek sisteme sahiptir olmaktadır.
- VisualIMPACT Yazılımı ile en küçük verinin eldesi, çözümülenmesi ve ayrıntılı raporlanması yapılabilmektedir.
- Deney sırasında geri sekme önleyici sistem sayesinde tekrarlı darbe oluşumunu engellemektedir.



Şekil 4.3 CEAST-Fractovis Plus darbe cihazı (Kişisel arşiv, 2019)

4.2 Numunelerin Hazırlanması ve Üretim

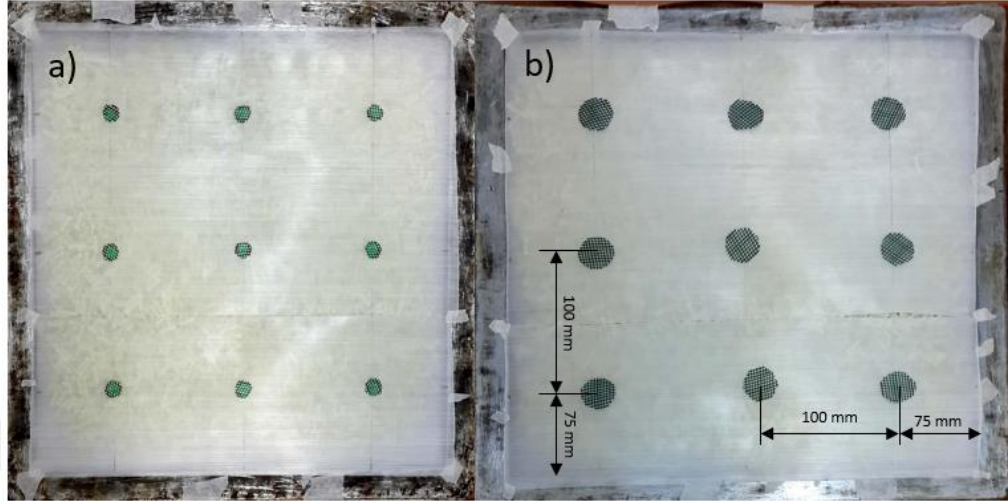
Tez kapsamında matris malzemesi olarak tek eksenli cam elyaf takviyeli polipropilen laminalar ve takviye malzemesi olarak ise uzun cam elyaf takviyeli granüller kullanılmıştır. Takviye malzemesi %50 cam elyaf takviyeli granüller öz kütlesi de göz önünde bulundurularak 340 gr olacak şekilde her bir kompozit üretiminde aynı miktarda kullanılmıştır. Matris ve takviye malzemeleri kalıba [0/90/Granül/90/0] şeklinde yerleştirilmiştir. Numune üretiminde kullanılan kalıplar 2 mm ve 1 mm olmak üzere birleştirilerek toplam 3 mm kalınlığında numuneler üretilmiştir. Delaminasyonlu ve delaminasyonsuz olmak üzere farklı numuneler üretilmiştir. Şekil 4.4'te delaminasyonsuz bir numunenin hazırlanışı gösterilmektedir.



Şekil 4.4 a) Kalıp ve teflon, b) Laminalar arasına granül yerleşimi, c) Preslenmeye hazır delaminasyonsuz numune (Kişisel arşiv, 2019)

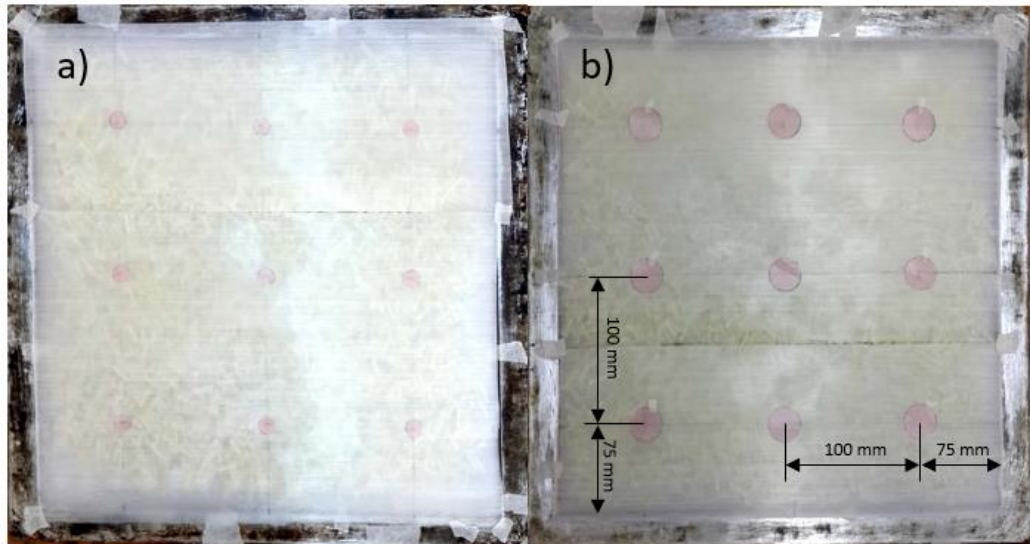
Delaminasyonlu kompozit grubu ise tek eksenli cam elyaf takviyeli polipropilen laminalar ile uzun cam elyaf takviyeli polipropilen granüllerinin aynı dizilimle [0/90/Granül/90/0] yerleştirilirken 0° ve 90° arasına birbirine eşit uzaklıkta delaminasyon malzemesi koyularak üretilmiştir. Kullanılan kalıbın 350x350 mm boyutunda ve numunelerin 100x100 mm standardına getirileceği göz önüne anılarak delaminasyon malzemeleri yerleştirilmiştir. Farklı delaminasyon malzemeleri 13 mm ve 26 mm çapında daireler halinde kesilerek yerleştirilmiştir. Şekil 4.5'te

delaminasyon malzemesi vakum infüzyon filesi olan numunenin hazırlanışı gösterilmiştir.



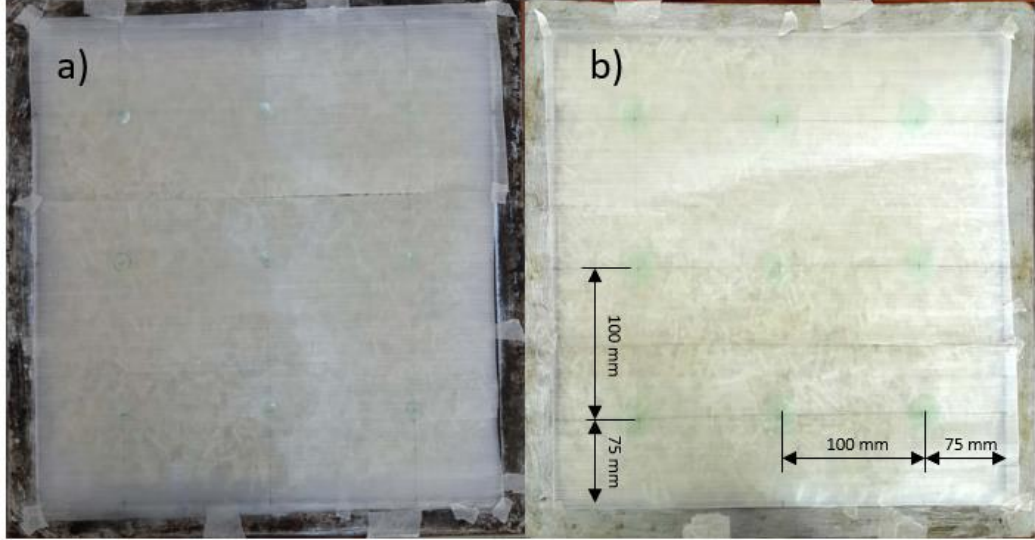
Şekil 4.5 a) 13 mm, b) 26 mm çapında delaminasyonlu ve malzemesi vakum infüzyon file olan numune (Kişisel arşiv, 2019)

Bir diğer delaminasyonlu numunenin hazırlık aşaması Şekil 4.6'da gösterilmiştir. Bu sefer delaminasyon malzemesi olarak ayırıcı film kullanılmıştır. 13 mm ve 26 mm çaplarında daire şeklinde kesilmiştir.



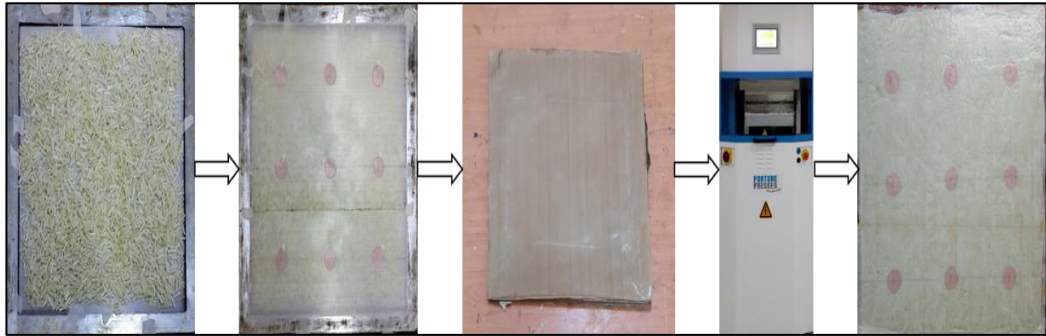
Şekil 4.6 a) 13 mm, b) 26 mm çapında delaminasyonlu ve malzemesi ayırıcı film olan numune (Kişisel arşiv, 2019)

Son olarak ise Şekil 4.7’de delaminasyon malzemesi vakum torbası olan numunenin hazırlanışı gösterilmiştir.



Şekil 4.7 a) 13 mm, b) 26 mm çapında delaminasyonlu ve malzemesi vakum torbası olan numune (Kişisel arşiv, 2019)

Hazırlık aşamasından sonra numuneler üzerlerine teflon koyularak sırayla sıcak presleme cihazına yerleştirilmiştir. Sıcaklığa dayanıklı olan bu teflonlar eriyen granüllerin çenelerine yapışmasını engeller ve düzgün bir numune yüzeyi çıkmasını sağlamaktadır. Sıcak presleme sırasında numuneler 100 kN’luk kuvvet ve 180°C sıcaklık altında 1 saat işlem görmüştür. 1 saatlik presleme sonrası 6 saatlik soğuma zamanı gerçekleşmektedir. Daha sonra numuneler cihazdan çıkartılıp mengene yardımı ile sabitlenerek kalıplarından çıkarılmıştır. Şekil 4.8’de özet olarak üretim şeması gösterilmiştir.



Şekil 4.8 Üretim aşaması (Kişisel arşiv, 2019)

Araştırmada üretilen kompozit plakalar 350x350 mm boyutlarında sıcak prestren çıkartılmıştır. Bu kompozitler sulu testere kullanılarak 100x100 mm ölçülerinde kesilmiştir. Kesilen numuneler bu boyutlarla darbe deneyine hazır hale gelmiştir. şekil 4.9’da kesim aşaması gösterilmiştir.



şekil 4.9 Numune kesim aşaması (Kişisel arşiv, 2019)

4.3 Darbe Deneyi ve Amacı

Gevreklikleri ve anizotropileri nedeniyle, kompozit laminalar, imalat veya servis sırasında ortaya çıkan kazara yüklenmelerden kaynaklanan düşük hız çarpma hasarına karşı özellikle duyarlıdır. Bu darbe dinamikleriyle ilgili, kırılma başlangıcı ve ilerleme mekanizmaları ve darbe enerjisi, hasar ve artık madde özellikleri arasındaki korelasyon ile birçok çalışmaya yol açmıştır (Abrate ve Castanie, 2013).

Kompozit malzemelerde darbe deneyi; düşük, orta veya yüksek hızlarda çok kısa bir süre içinde, bir malzeme veya yapı üzerine uygulanan anlık bir dış kuvvet olarak tanımlanabilir. Malzeme veya yapı üzerine gelen darbeleri başlıca düşük hızlı veya yüksek hızlı olarak sınıflandırılabiliriz. Darbe hızı düşük hızlı darbelerde 1 ile 10 m/s arasında değişmektedir. Düşük hızlı darbeler düşük enerjili darbe olarak da adlandırılabilir. Yüksek hızlı darbeler ise balistik limitte olan darbelerdir (Esandemir ve Caner, 2017).

Deneyin amacı termoplastik kompozitlerde oluşan delaminasyonların düşük hızlı darbelerin üzerindeki etkisini araştırmak ve delaminasyonsuz olarak üretilen numunelerle karşılaştırmak. Farklı malzemelerle üretilen yapay delaminasyonlu numunelerin darbe deneyleri sonrası kendi aralarında karşılaştırılmasının yapılması ve sonuçların nedenlerinin neler olabileceği hakkında yorumlamak.

Üretim sonrası tüm numuneler uygun ölçülerde sulu testere ile kesilip kurutulduktan sonra düşük hızlı darbe deneyi diğer adıyla düşük enerjili darbe testi uygulanmıştır. Bu tez kapsamında numunelere uygulanan enerji değerleri 10J, 20J, 30J, 40J ve 50J'dür. Üretilen delaminasyonlu numunelere uygulanan darbe testinde vurucu ucun delaminasyonlu bölgeye vurmasına dikkat edilmiştir. Her bir enerji değeri için uygulanan darbe testinde aynı numuneye ait en az üç tekrar yapılmıştır. Her bir numunede birbirine yakın olan 3 veri analiz edilmek için alınmıştır. Deney sonuç verileri ile maksimum temas kuvveti, maksimum çökme, maksimum temas süresi ve absorbe edilen enerji değerleri grafikleri çizilmiştir. Her bir numunenin elde edilen grafiklerinin ortalaması alınmıştır. Daha sonra hem delaminasyonlu numunelerin kendi aralarında hem de delaminasyonsuz numunelerle arasındaki farkları görebilmek için grafikleri üst üste çizilmiştir. Elde edilen grafikler ve sonuçlar bir sonraki bölümde açıklanmıştır.

BÖLÜM BEŞ

SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Kompozit malzemeler kullanım alanlarına göre farklı enerji seviyelerinde darbeli yüklemeye maruz kalabilmektedir. Örneğin, üretim süreci veya bakımı sırasında bu hasarlar meydana gelebilmektedir. Darbe hızları küçük olmasına rağmen, kütlenin etkisi daha büyüktür. Laminalı kompozit yapıların özelliklerinden biri, benzer metalik yapılardan daha fazla hasara hassastır. Kompozit malzemenin sertleşme işlemi sırasında, katmanların ara yüzünde gömülü delaminasyon bulunabilmektedir. Kompozit düşük hızda darbeye maruz kalırsa, iç delaminasyondan oluşan görünmez hasar da ortaya çıkabilmektedir. Bu iç hasar gücü önemli ölçüde azaltabilir ve yük altında büyüyeabilmektedir. Bunun bir sonucu olarak, birçok araştırmacı kompozit malzemelerin darbe davranışını araştırmak için birçok çalışma yapılmıştır.

Literatürde pultrüzyon yöntemiyle üretilmiş uzun cam elyaf takviyeli polipropilen granülden kompozitlerin düşük hızlı darbe davranışının farklı gömülü delaminasyon malzemeleri kullanarak incelenmesine rastlanılmamıştır. 3 farklı malzeme gömülü delaminasyon olarak farklı çaplarda numunelere yerleştirilmiştir. Bunun yanında yapay delaminasyonsuz numuneler de üretilip darbe deneyinden alınan veriler ile her bir numune için kuvvet-çökme ve enerji-zaman grafikleri çizilmiştir. Bu grafiklerden maksimum temas kuvveti ve maksimum çökme değerlerinin değişen parametrelere göre nasıl değiştiğini gözlemlemede yardımcı olmuştur. Daha sonra absorbe edilen enerji-darbe enerjisi ve maksimum deformasyon-darbe enerjisi grafikleri de çizilmiştir. Yapılan çalışmada delaminasyon malzemesi bakımından ve delaminasyon çapı bakımından iki başlık altından grafikler değerlendirilip yorumlanmıştır.

Çalışmanın gruplandırılması şu şekildedir:

- Delaminasyon çap etkisi
- Delaminasyon malzemesi etkisi

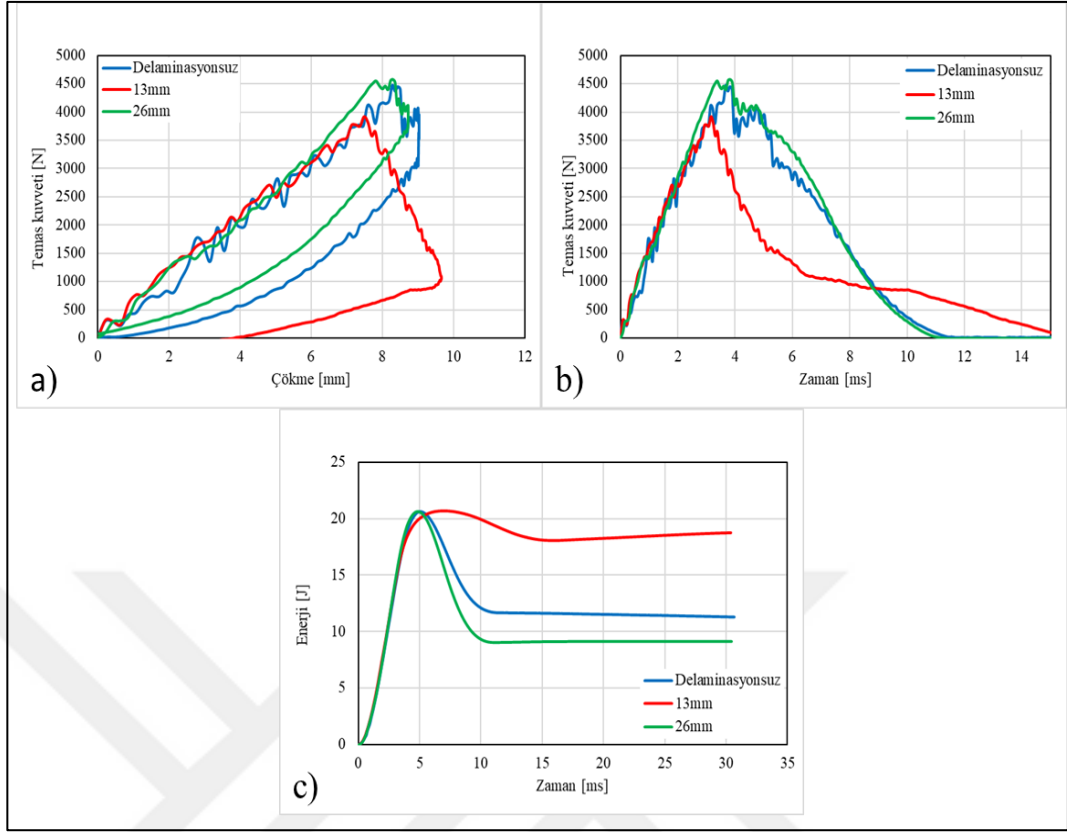
5.1 Delaminasyon ap Etkisi

Bu kısımda aynı delaminasyon malzemesi kullanarak üretilen numunelerin çapındaki değişimin etkisi incelenmiştir. Literatürde farklı kompozit malzemelerde delaminasyon çapı değişiminin incelendiği çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmada, temas kuvveti-yer değiştirme, temas kuvveti-zaman, enerji-zaman, maksimum temas kuvveti-darbe enerjisi, maksimum deformasyon-darbe enerjisi ve absorbe enerji-darbe enerjisi grafikleri çizilerek yorumlanmıştır.

5.1.1 Vakum Torbası Delaminasyon Malzemesinin Grafikleri

5.1.1.1 20J'de Gerçekleştirilen Deneyler

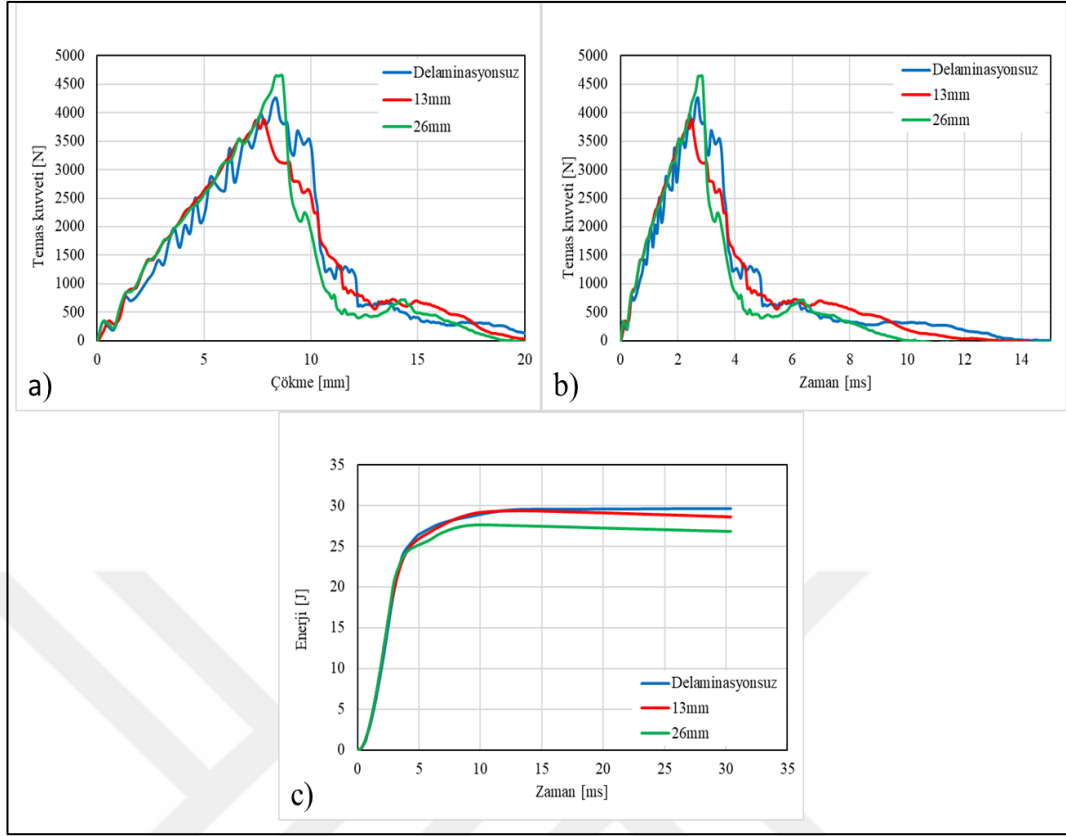
20J enerji değerine bakıldığında, 5.1-a'da tüm eğriler kapalı olduğu için hiçbir numunede delinme olmadığı gözlemlenmiştir. Maximum temas kuvveti delaminasyonsuz numune ve 26 mm çapı için birbirine yakınken, diğer numunede daha düşük olduğu görölmektedir. Enerji-zaman grafiğine (5.1-c) bakıldığında, tüm numunelerde geri sekmeler (rebounding) olduğu gözlemlenmiştir. Delaminasyon apı 13 mm için absorbe edilen enerji en yüksek iken, diğer ikisi birbirine daha yakındır. Delaminasyonun, vurucunun (impactor) apından büyük olduğu durumda delaminasyonun etkisi görölmektedir.



Şekil 5.1 Delaminasyon malzemesi vakum torbası olan ve ön delaminasyon olmayan numuneye ait 20J’de a) Temas kuvveti-yer değıştirme, b) Temas kuvveti-zaman, c) Enerji-zaman grafikleri

5.1.1.2 30J’de Gerçekleştirilen Deneyler

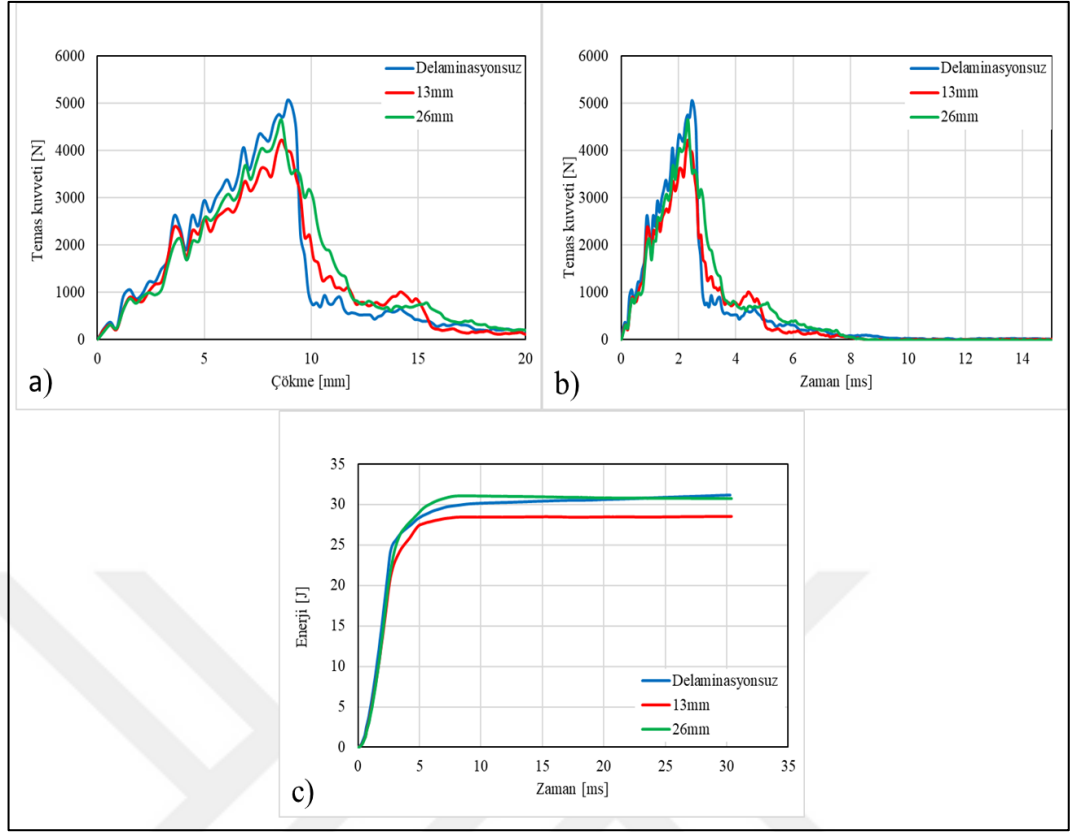
30J enerji değerine bakıldığında, 5.2-a’da tüm eğriler açık olmasından numunelerin tümünün delindiği sonucuna varılmıştır. Maximum temas kuvveti delaminasyon çapı 26 mm olan numunede en yüksek iken, çapı 13 olan numune en düşük olduğu görülmektedir. Enerji-zaman grafiğine (5.2-c) bakıldığında, delaminasyonsuz ve delaminasyon çapı 13 mm numuneler birbirine çakışık iken, delaminasyon çapı 26 mm olan numune de az miktarda absorbe edilen enerjide düşüş gözlemlenmektedir. Delaminasyonun, vurucunun (impactor) çapından büyük olduğu durumda delaminasyonun etkisi görülmektedir.



Şekil 5.2 Delaminasyon malzemesi vakum torbası olan ve ön delaminasyon olmayan numuneye ait 30J’de a) Temas kuvveti-yer değiştirme, b) Temas kuvveti-zaman, c) Enerji-zaman grafikleri

5.1.1.3 40J’de Gerçekleştirilen Deneyler

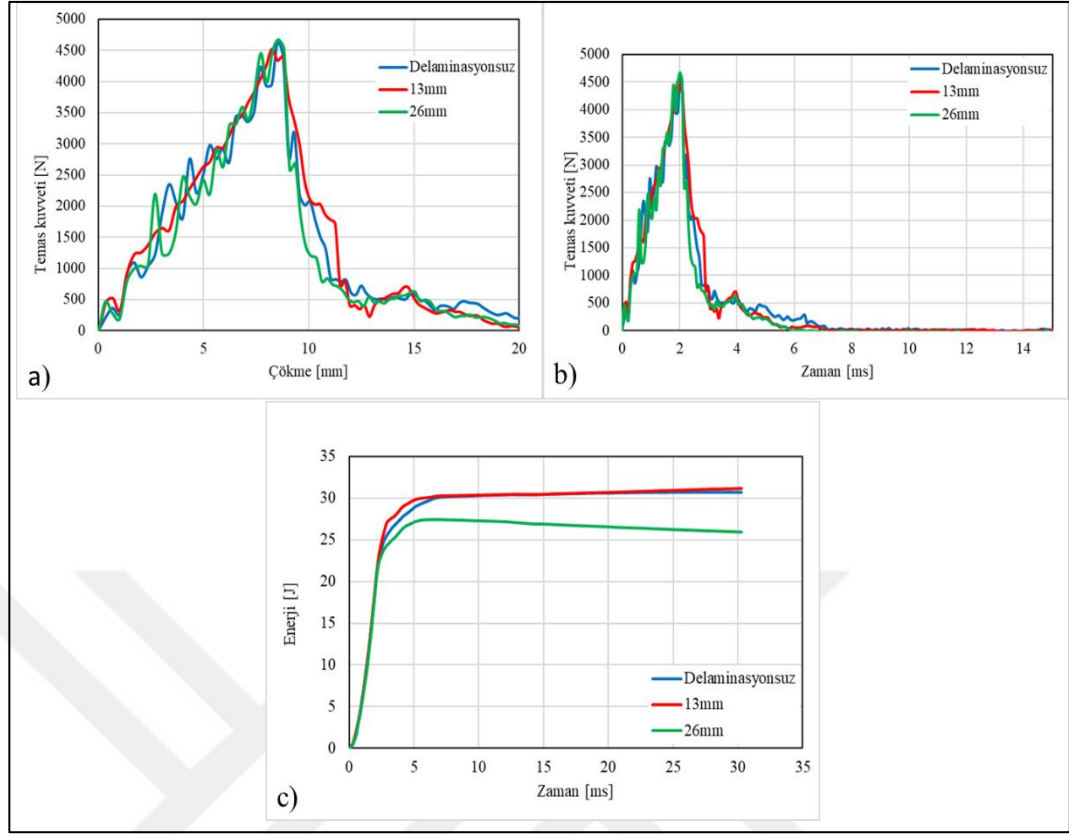
Şekil 5.3-a ve 5.3-b’deki grafikler incelendiğinde, maksimum temas kuvveti delaminasyonsuz numunede en yüksek iken, delaminasyonlu numunelerde daha düşük olduğu görülmektedir. Bunu yanı sıra artan delaminasyon çapının etkisiyle vurucu uca karşı dirençte az miktarda artış olduğu görülmektedir. Enerji-zaman grafiğine (5.3-c) bakıldığında, delaminasyonsuz ve delaminasyon çapı 26 mm numuneler birbirine çakışık iken, delaminasyon çapı 13 mm olan numune de az miktarda absorbe edilen enerjide düşüş gözlemlenmektedir. Delaminasyonun, vurucunun (impactor) çapından büyük olduğu durumda delaminasyonun etkisi görülmektedir.



Şekil 5.3 Delaminasyon malzemesi vakum torbası olan ve ön delaminasyon olmayan numuneye ait 40J’de a) Temas kuvveti-yer değıştirme, b) Temas kuvveti-zaman, c) Enerji-zaman grafikleri

5.1.1.4 50J’de Gerçekleştirilen Deneyler

Şekil 5.4-a ve 5.4-b’deki grafikler incelendiğinde, maksimum temas kuvvetinin tüm numunelerde birbirine yakın olduğu gözlenmektedir. Enerji-zaman grafiğine (5.4-c) bakıldığında, delaminasyonsuz ve delaminasyon çapı 13 mm numuneler birbirine çakışık iken, delaminasyon çapı 26 mm olan numune de az miktarda absorbe edilen enerjide düşüş gözlemlenmektedir. Delaminasyonun, vurucunun (impactor) çapından büyük olduğu durumda delaminasyonun etkisi görülmektedir.

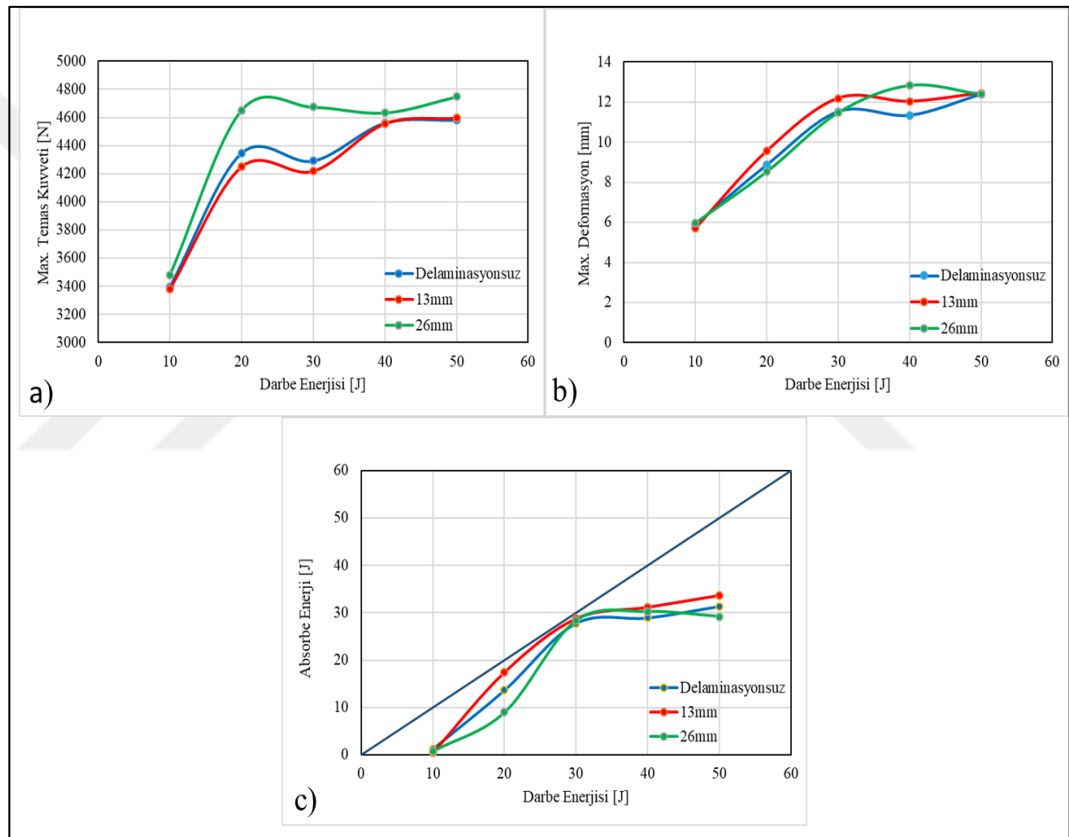


Şekil 5.4 Delaminasyon malzemesi vakum torbası olan ve ön delaminasyon olmayan numuneye ait 50J’de a) Temas kuvveti-yer değiştirme, b) Temas kuvveti-zaman, c) Enerji-zaman grafikleri

5.1.1.5 Artan Darbe Enerjisine Bağlı Grafikler

Şekil 5.5’te delaminasyon malzemesi vakum torbası olan numunelere ait ortalama maksimum temas kuvveti, ortalama maksimum deformasyon ve absorbe enerjinin artan darbe enerjisine göre grafikleri verilmiştir. Şekil 5.5-a’ya bakıldığında, yükselen darbe enerjisi ile maksimum temas kuvveti artarken delinme enerjisi olan 30J de tüm numunelerde maksimum temas kuvvetinde bir düşüş olmuştur. Daha sonra temas kuvveti tekrar yükselmiştir. Bu yükselişte delaminasyonsuz numune ve 13 mm çapındaki delaminasyonlu numune birbirine yakın eğriler izlerken 26 mm çapındaki delaminasyonlu numune daha yüksek temas kuvveti değerlerine ulaşmıştır. Şekil 5.5-b’de tüm numunelerde 40J ve 50J enerji seviyelerinde maksimum deformasyon değerinin belli bir değere yaklaştığı görülmektedir. Önceki enerji seviyelerinde ise birbirine paralele yakın eğrilere sahip olduğu gözlemlenmiştir. Benzer çalışmada Sabancı ve Karakuzu. (2013), termoset kompozitler üzerinde

yaptıkları çalışmada aynı enerji seviyesi için delaminasyon boyutuna bağlı olarak maksimum deformasyonda önemli bir değişim görememişlerdir. Şekil 5.5-c’de eş enerji diyagramları çizilmiştir. Bu diyagramla malzemelerin absorbe ettiği enerji, delinme enerjisi ve enerji sönümlemesi gibi özellikleri hakkında değerlendirme yapılmaktadır. Tüm numunelerin delinme enerjisi olan 30J’e kadar absorbe edilen enerjilerinde artış olduğu görülmektedir. Delinme enerji seviyesinden sonra yatay yönde birbirine yakın eğriler ilerlemiştir. Delaminasyonun, vurucunun (impactor) çapından büyük olduğu durumda delaminasyonun etkisi görülmektedir.

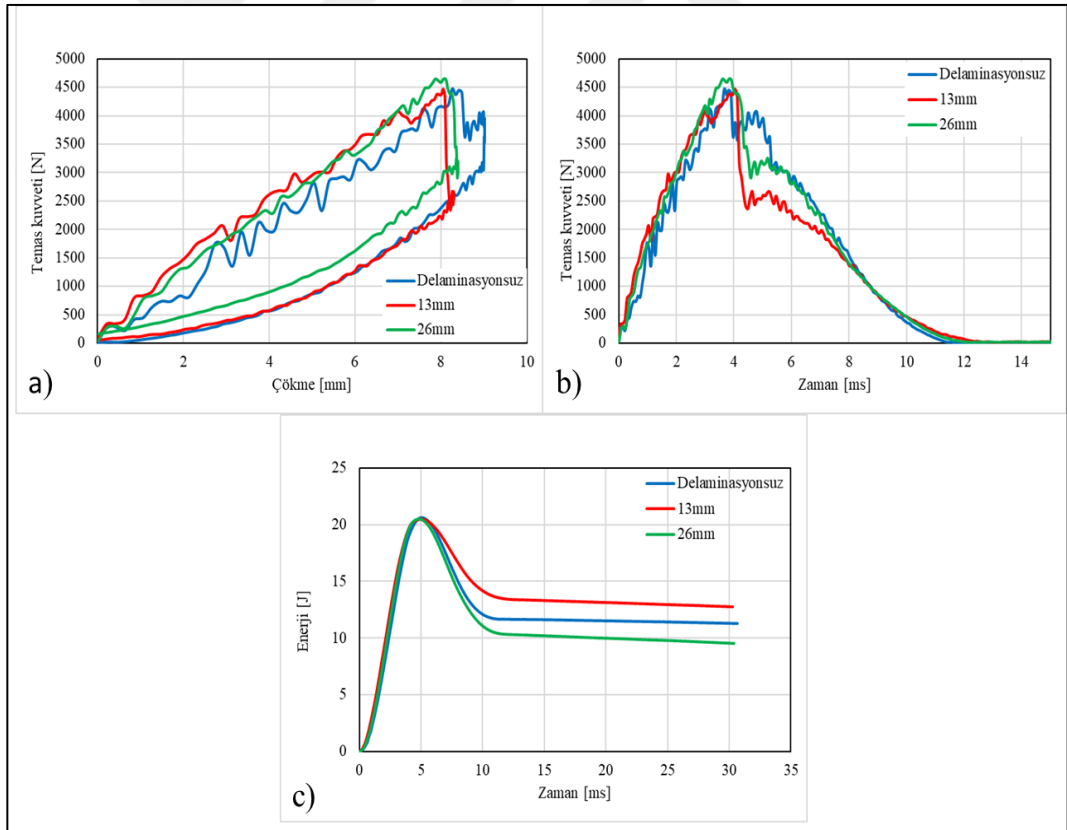


Şekil 5.5 Delaminasyon malzemesi vakum torbası olan ve ön delaminasyon olmayan numuneye ait a) Maksimum temas kuvvetinin, b) Maksimum deformasyonunun, c) Absorbe enerjinin artan darbe enerjisi ile değişim grafikleri

5.1.2 Ayırıcı Film Delaminasyon Malzemesinin Grafikleri

5.1.2.1 20J'de Gerçekleştirilen Deneyler

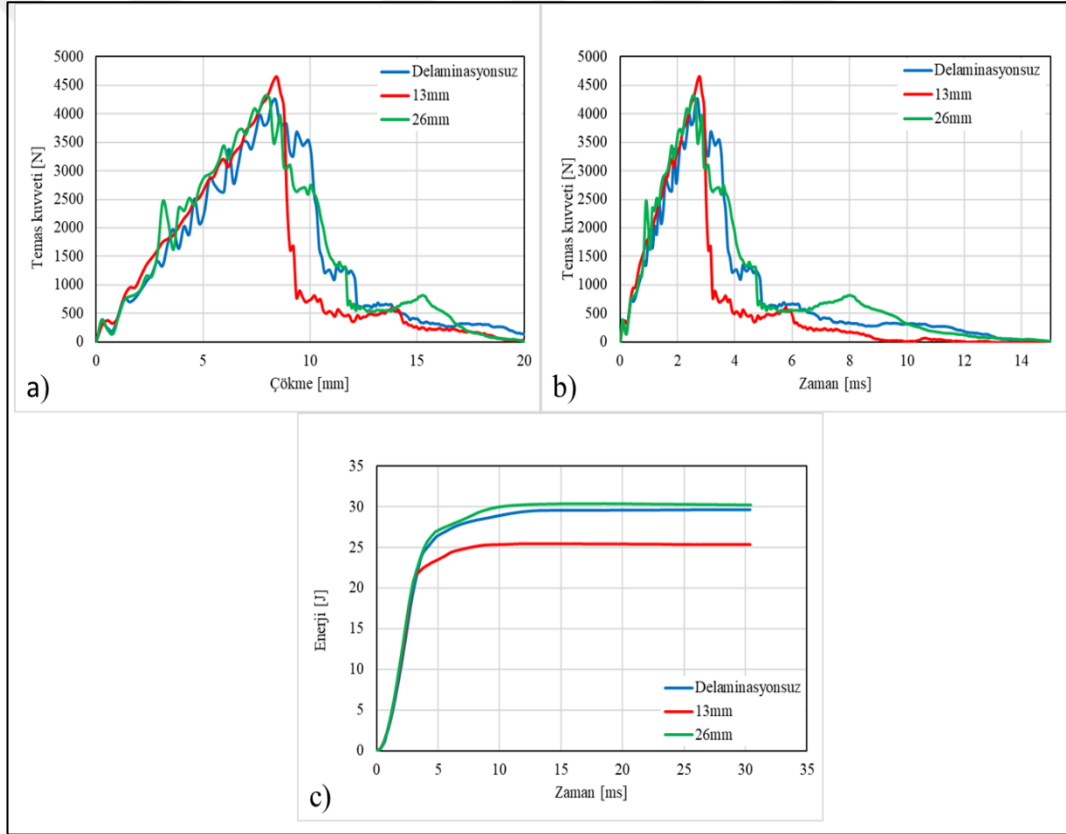
20J enerji değerine bakıldığında, 5.6-a'da tüm eğriler kapalı olduğu için hiçbir numunede delinme olmadığı gözlemlenmiştir. Maximum temas kuvveti, delaminasyonsuz ve delaminasyon çapı 13 mm numune için birbirine yakinken, diğer numunede daha yüksek olduğu görülmektedir. Enerji-zaman grafiğine (5.6-c) bakıldığında, tüm numunelerde geri sekmeler olduğu gözlemlenmiştir. Delaminasyon çapı 13 mm için absorbe edilen enerji en yüksek iken, delaminasyon çapı 26 mm olan numune de ise en düşük olduğu görülmektedir. Bu enerji değerinde delaminasyon etkisi büyük değişiklik yaratmamıştır. Delaminasyonun, vurucunun (impactor) çapından büyük olduğu durumda delaminasyonun etkisi görülmektedir.



Şekil 5.6 Delaminasyon malzemesi ayırıcı film olan ve ön delaminasyon olmayan numuneye ait 20J'de a) Temas kuvveti-yer değiştirme, b) Temas kuvveti-zaman, c) Enerji-zaman grafikleri

5.1.2.2 30J'de Gerçekleştirilen Deneyler

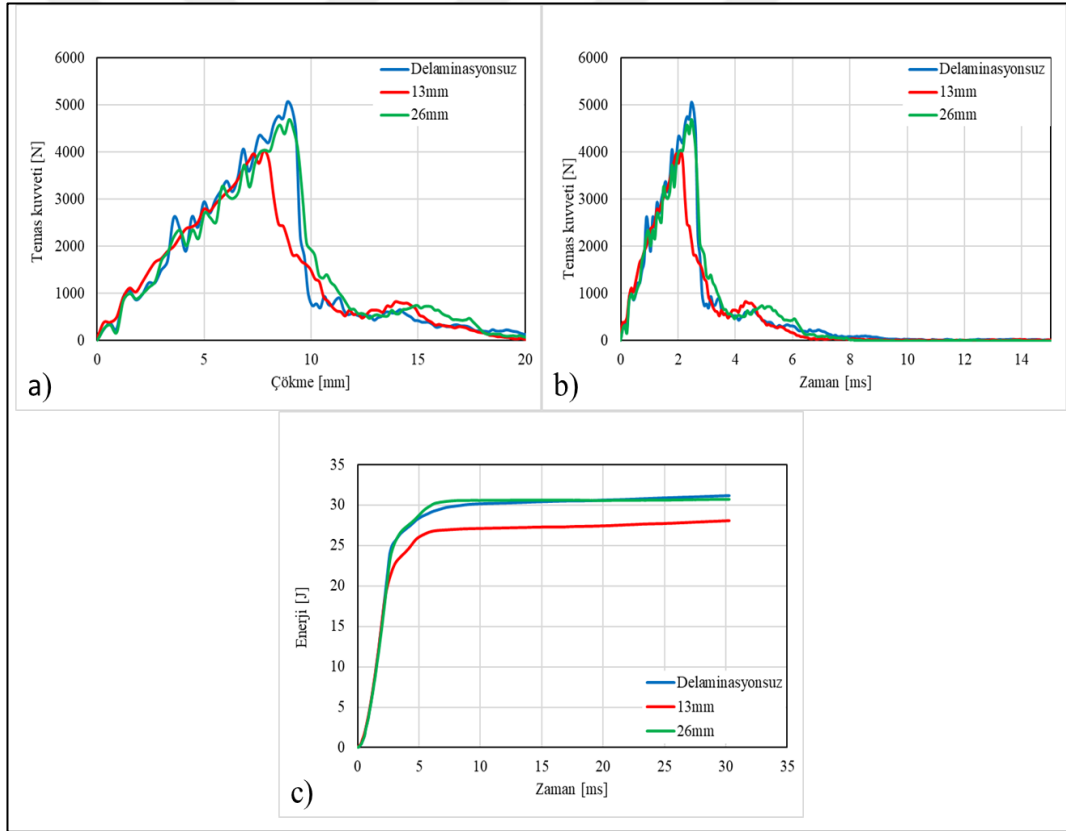
30J enerji değerine bakıldığında, 5.7-a'da tüm eğriler açık olmasından numunelerin tümünün delindiği sonucuna varılır. Maximum temas kuvveti delaminasyon çapı 13 mm olan numunede en yüksek iken, delaminasyonsuz olan numune en düşük olduğu görülmektedir. Enerji-zaman grafiğine (5.7-c) bakıldığında, delaminasyonsuz ve delaminasyon çapı 26 mm numuneler birbirine çakışık iken, delaminasyon çapı 13 mm olan numune de az miktarda absorbe edilen enerjide düşüş gözlemlenmektedir. Delaminasyonun, vurucunun (impactor) çapından büyük olduğu durumda delaminasyonun etkisi görülmektedir.



Şekil 5.7 Delaminasyon malzemesi ayırıcı film olan ve ön delaminasyon olmayan numuneye ait 30J'de a) Temas kuvveti-yer değiştirme, b) Temas kuvveti-zaman, c) Enerji-zaman grafikleri

5.1.2.3 40J'de Gerçekleştirilen Deneyler

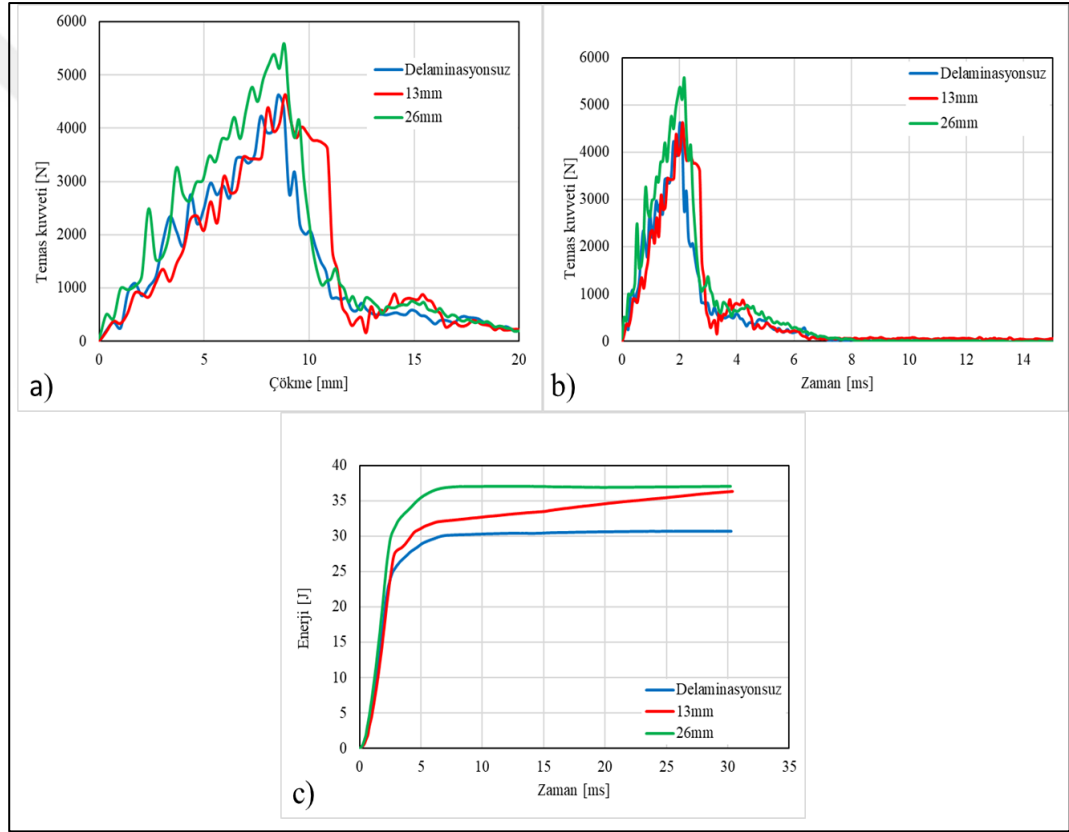
Şekil 5.8-a ve 5.8-b'deki grafikler incelendiğinde, maksimum temas kuvveti delaminasyonsuz numunede en yüksek iken, delaminasyonlu numunelerde gözle görülür şekilde daha düşük olduğu gözlemlenmektedir. Bunu yanı sıra artan delaminasyon çapının etkisiyle vurucu uca karşı dirençte artış olduğu görülmektedir. Enerji-zaman grafiğine (5.8-c) bakıldığında, delaminasyonsuz ve delaminasyon çapı 26 mm numuneler neredeyse birbirine çakışık iken, delaminasyon çapı 13 mm olan numunede absorbe edilen enerjide düşüş olduğu görülmektedir. Delaminasyonun, vurucunun (impactor) çapından büyük olduğu durumda delaminasyonun etkisi görülmektedir.



Şekil 5.8 Delaminasyon malzemesi ayırıcı film olan ve ön delaminasyon olmayan numuneye ait 40J'de a) Temas kuvveti-yer değiştirme, b) Temas kuvveti-zaman, c) Enerji-zaman grafikleri

5.1.2.4 50J'de Gerçekleştirilen Deneyler

Şekil 5.9-a ve 5.9-b'deki grafikler incelendiğinde, maksimum temas kuvvetinin delaminasyonsuz ve delaminasyon çapı 13 mm olan numunelerde birbirine neredeyse aynı iken, delaminasyon çapı 26 mm olan numunede yüksek bir artış olduğu gözlenmektedir. Enerji-zaman grafiğine (5.9-c) bakıldığında, delaminasyonsuz olan numune de diğerlerine göre absorbe edilen enerjinin daha düşük olduğu gözlemlenmektedir. Delaminasyonun, vurucunun (impactor) çapından büyük olduğu durumda delaminasyonun etkisi görülmektedir.

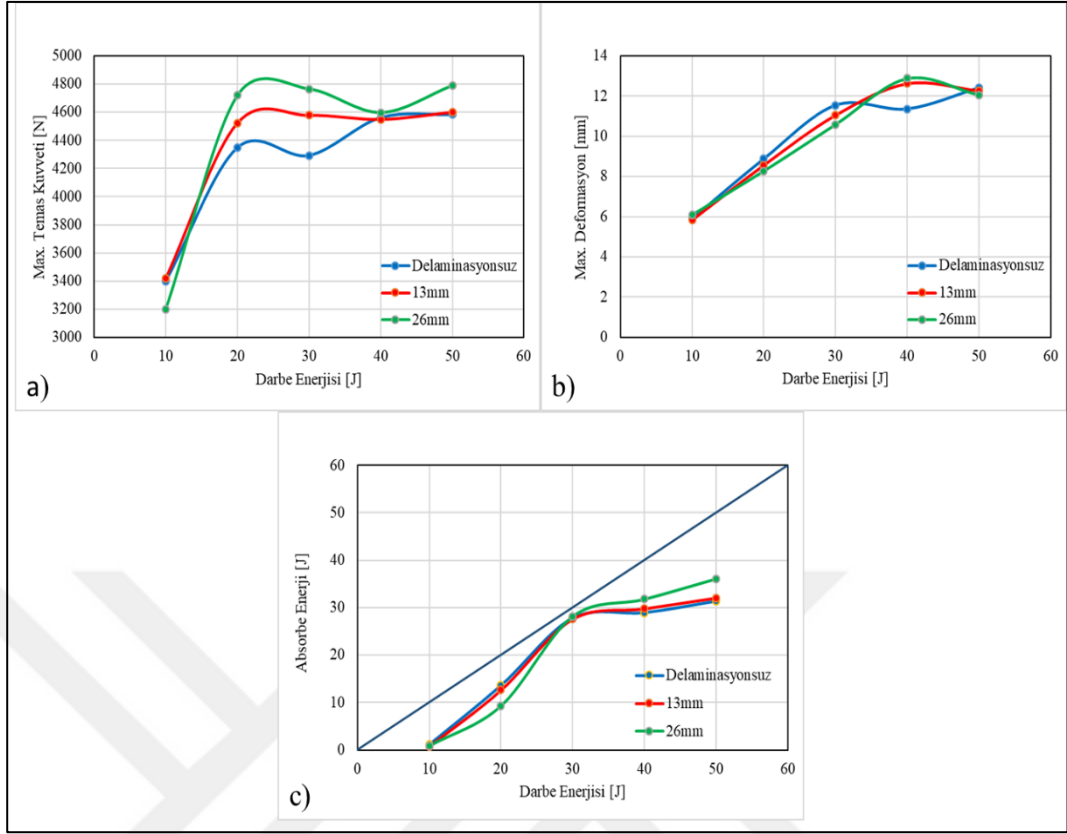


Şekil 5.9 Delaminasyon malzemesi ayırıcı film olan ve ön delaminasyon olmayan numuneye ait 50J'de a) Temas kuvveti-yer değiştirme, b) Temas kuvveti-zaman, c) Enerji-zaman grafikleri

5.1.2.5 Artan Darbe Enerjisine Bağlı Grafikler

Şekil 5.10'de delaminasyon malzemesi ayırıcı film olan numunelere ait ortalama maksimum temas kuvveti, ortalama maksimum deformasyon ve absorbe enerjinin

artan darbe enerjisine göre grafikleri verilmiştir. Şekil 5.10-a'ya bakıldığında, yükselen darbe enerjisi ile maksimum temas kuvveti artarken delinme enerjisi olan 30J de tüm numunelerde maksimum temas kuvvetinde bir düşüş olmuştur. Daha sonra maksimum temas kuvvetinde, delaminasyonsuz numunede yükselme olurken diğer numunelerde bir miktar düşüşten sonra yükselme olmuştur. 40J ve 50J enerji seviyelerinde, delaminasyonsuz numune ile 13 mm çaplı delaminasyonlu numune birbirine yakın maksimum temas kuvvetine sahipken 26 mm çaplı numune daha yüksek maksimum temas kuvvetine sahiptir. Şekil 5.10-b'de tüm numuneler delinme enerjisi 30J'e kadar birbirine yakın eğriler oluşmuştur. 40J enerji seviyesinde, delaminasyonlu numuneler birbirine yakın ve delaminasyonsuz numuneye göre daha yüksek maksimum deformasyon değerine sahiptirler. Aynı enerji seviyesinde çap artışı bir farklılık oluşturmamıştır. Benzer çalışmada Sabancı ve Karakuzu. (2013), termoset kompozitler üzerinde yaptıkları çalışmada aynı enerji seviyesi için delaminasyon boyutuna bağlı olarak maksimum deformasyonda önemli bir değişim görememişlerdir. Şekil 5.10-c'de eş enerji diyagramları çizilmiştir. Tüm numunelerin delinme enerjisi olan 30J'e kadar absorbe edilen enerjilerinde artış olduğu görülmektedir. Delinme enerji seviyesinden sonra yatay yönde birbirine yakın eğriler ilerlemiştir. Delaminasyonun, vurucunun (impactor) çapından büyük olduğu durumda delaminasyonun etkisi görülmektedir.

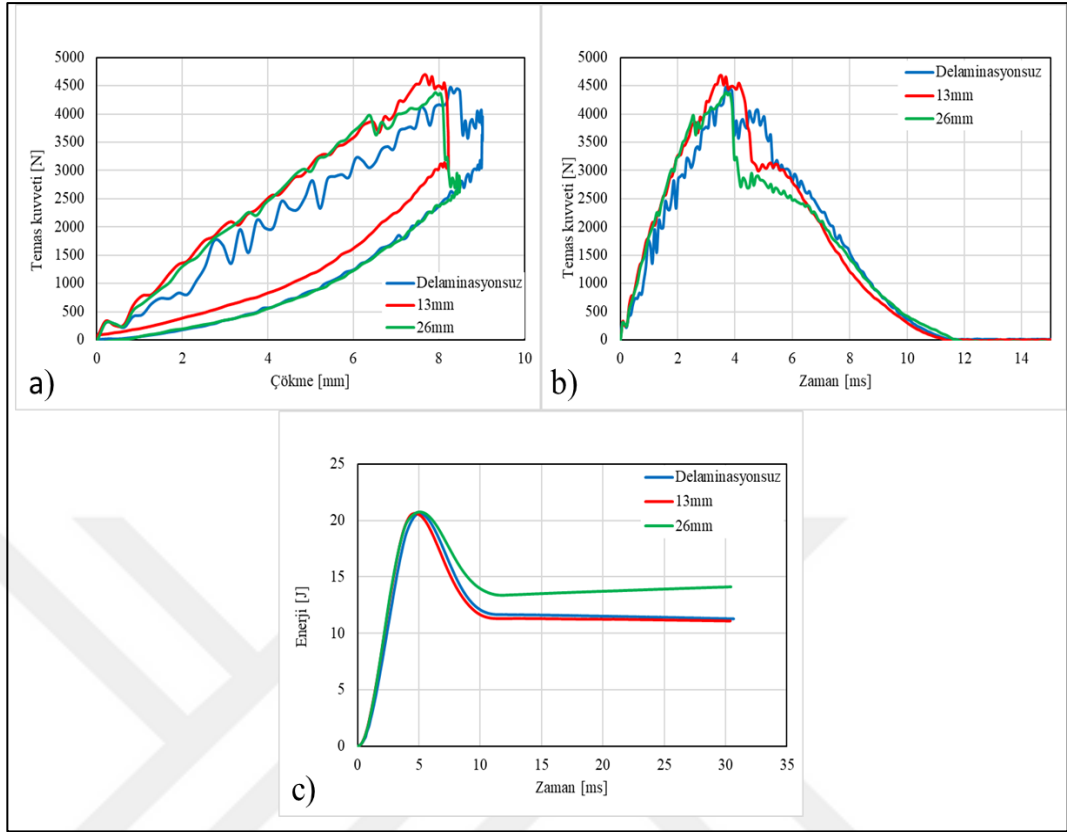


Şekil 5.10 Delaminasyon malzemesi ayırıcı film olan ve ön delaminasyon olmayan numuneye ait a) Maksimum temas kuvvetinin, b) Maksimum deformasyonun, c) Absorbe enerjinin artan darbe enerjisi ile değişim grafikleri

5.1.3 Vakum İnfüzyon Filesi Delaminasyon Malzemesinin Grafikleri

5.1.3.1 20J'de Gerçekleştirilen Deneyler

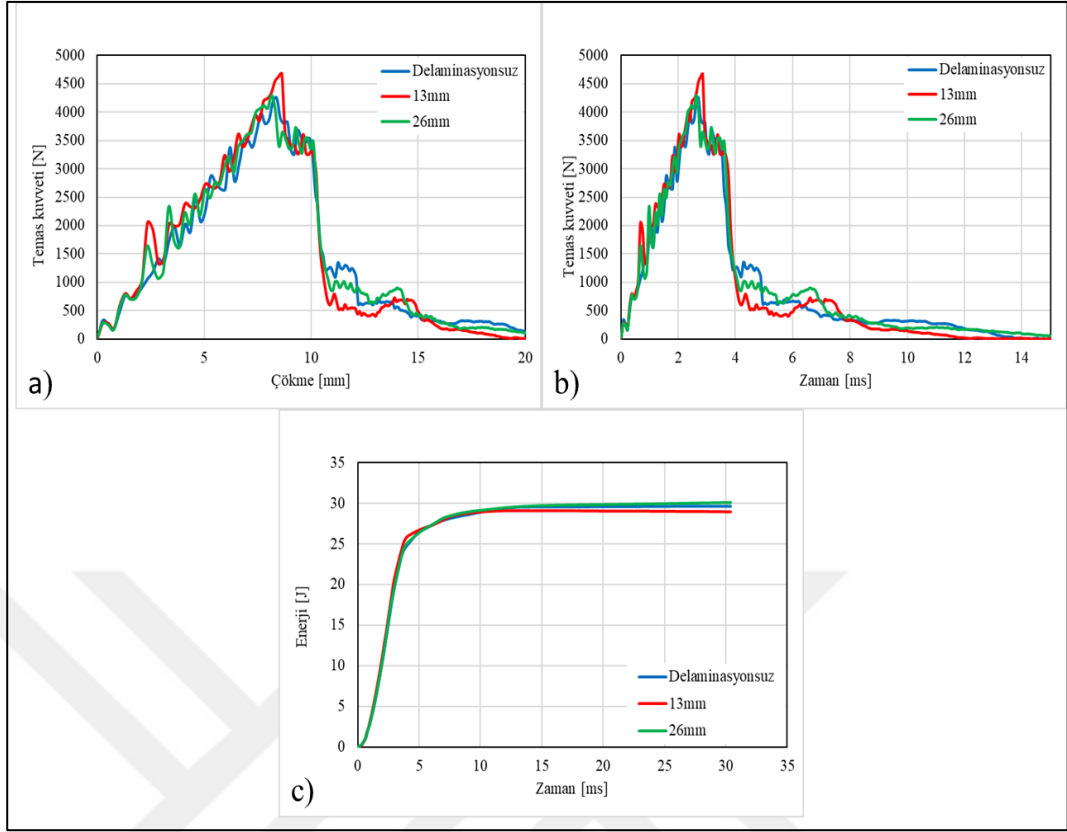
20J enerji değerine bakıldığında, 5.11-a'da tüm eğriler kapalı formda olduğu, yani hiçbir numunede delinme olmadığı gözlemlenmiştir. Maximum temas kuvveti, delaminasyonsuz ve delaminasyon çapı 26 mm numune için birbirine yakınken, diğer numunede daha yüksek olduğu görülmektedir. Enerji-zaman grafiğine (5.11-c) bakıldığında, tüm numunelerde geri sekmeler olduğu gözlemlenmiştir. Delaminasyon çapı 26 mm için absorbe edilen enerji en yüksek iken, diğer numuneler de ise birbirine çakışık ve düşük olduğu görülmektedir. Bu enerji değerinde delaminasyon etkisi büyük değişiklik yaratmamıştır. Delaminasyonun, vurucunun (impactor) çapından büyük olduğu durumda delaminasyonun etkisi görülmektedir.



Şekil 5.11 Delaminasyon malzemesi vakum infüzyon filesi olan ve ön delaminasyon olmayan numuneye ait 20J’de a) Temas kuvveti-yer değıştirme, b) Temas kuvveti-zaman, c) Enerji-zaman grafikleri

5.1.3.2 30J’de Gerçekleştirilen Deneyler

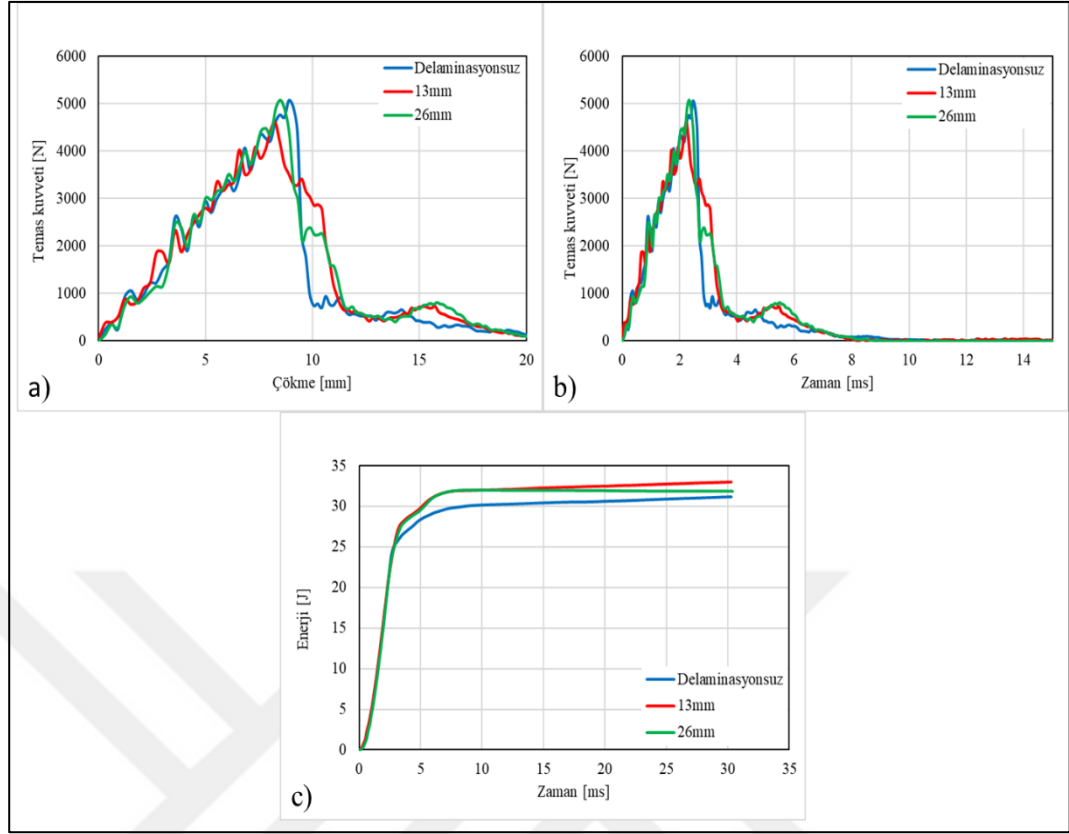
30J enerji değerine bakıldığında, Şekil 5.12-a’da tüm eğriler açık bir formda olduğu, yani numunelerin tümünün delindiği grafiklerden gözlenmektedir. Maximum temas kuvveti delaminasyon çapı 13 mm olan numunede en yüksek iken, diğer numunelerde birbirine yakın ve düşük olduğu görülmektedir. Enerji-zaman grafiğine (Şekil 5.12-c) bakıldığında, delaminasyonsuz ve delaminasyonlu numunelerin birbirine çakışık olduğu görülmektedir. Delaminasyonun, vurucunun (impactor) çapından büyük olduğu durumda delaminasyonun etkisi görülmektedir.



Şekil 5.12 Delaminasyon malzemesi vakum infüzyon filesi olan ve ön delaminasyon olmayan numuneye ait 30J'de a) Temas kuvveti-yer değiştirme, b) Temas kuvveti-zaman, c) Enerji-zaman grafikleri

5.1.3.3 40J'de Gerçekleştirilen Deneyler

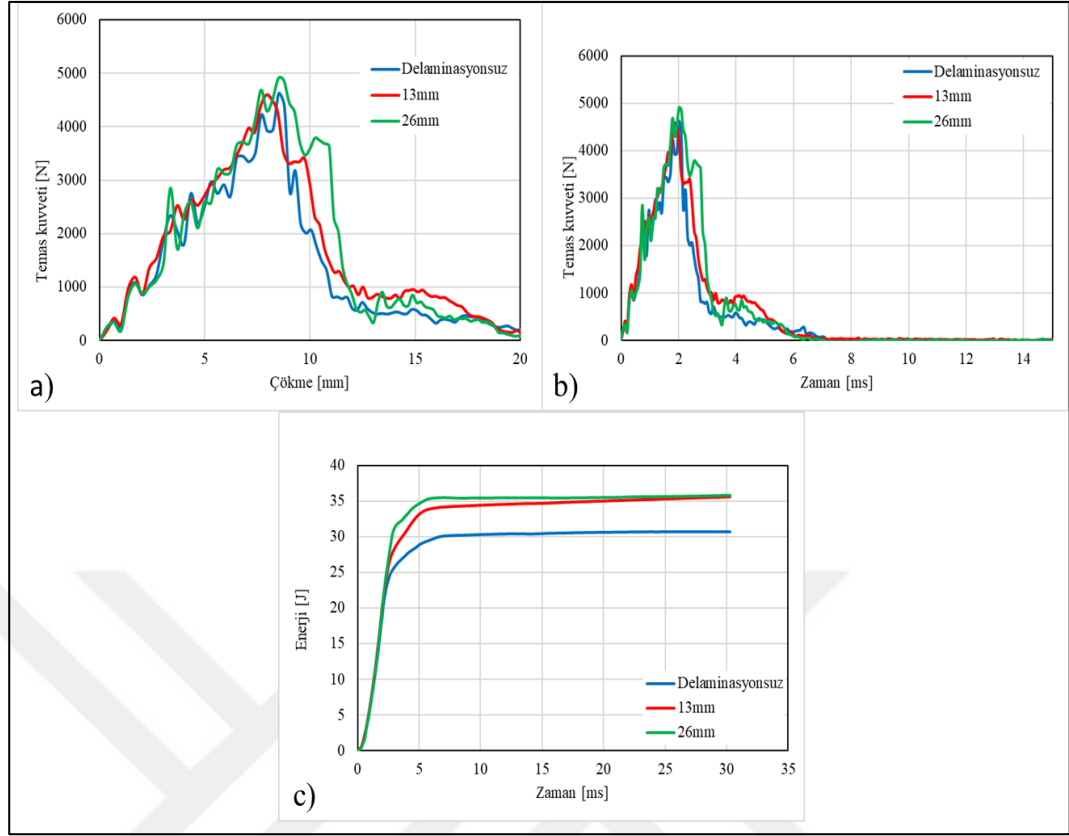
Şekil 5.13-a ve 5.13-b'deki grafikler incelendiğinde, maksimum temas kuvveti delaminasyonsuz numunede ve delaminasyon çapı 26 olan numunede birbirine yakın ve yüksek iken, delaminasyon çapı 13 olan numune de gözle görülür şekilde daha düşük olduğu gözlemlenmektedir. Bunu yanı sıra artan delaminasyon çapının etkisiyle vurucu uca karşı dirençte artış olduğu görülmektedir. Enerji-zaman grafiğine (Şekil 5.13-c) bakıldığında, delaminasyonsuz ve delaminasyonlu numunelerde absorbe edilen enerjinin birbirine yakın olduğu görülmektedir. Delaminasyonun, vurucunun (impactor) çapından büyük olduğu durumda delaminasyonun etkisi görülmektedir.



Şekil 5.13 Delaminasyon malzemesi vakum infüzyon filesi olan ve ön delaminasyon olmayan numuneye ait 40J'de a) Temas kuvveti-yer değiştirme, b) Temas kuvveti-zaman, c) Enerji-zaman grafikleri

5.1.3.4 50J'de Gerçekleştirilen Deneyler

Şekil 5.14-a ve 5.14-b'deki grafikler incelendiğinde, maksimum temas kuvvetinin delaminasyonsuz ve delaminasyon çapı 13 mm olan numunelerde birbirine neredeyse aynı iken, delaminasyon çapı 26 mm olan numunede bir miktar artış olduğu gözlenmektedir. Artan yapay delaminasyon çapının, kullanılan malzemenin etkisiyle de biraz mukavemet kattığı söylenebilir. Enerji-zaman grafiğine (Şekil 5.14-c) bakıldığında, ise delaminasyonsuz olan numune de diğerlerine göre absorbe edilen enerjinin daha düşük olduğu gözlemlenmektedir. Delaminasyonun, vurucunun (impactor) çapından büyük olduğu durumda delaminasyonun etkisi görülmektedir.

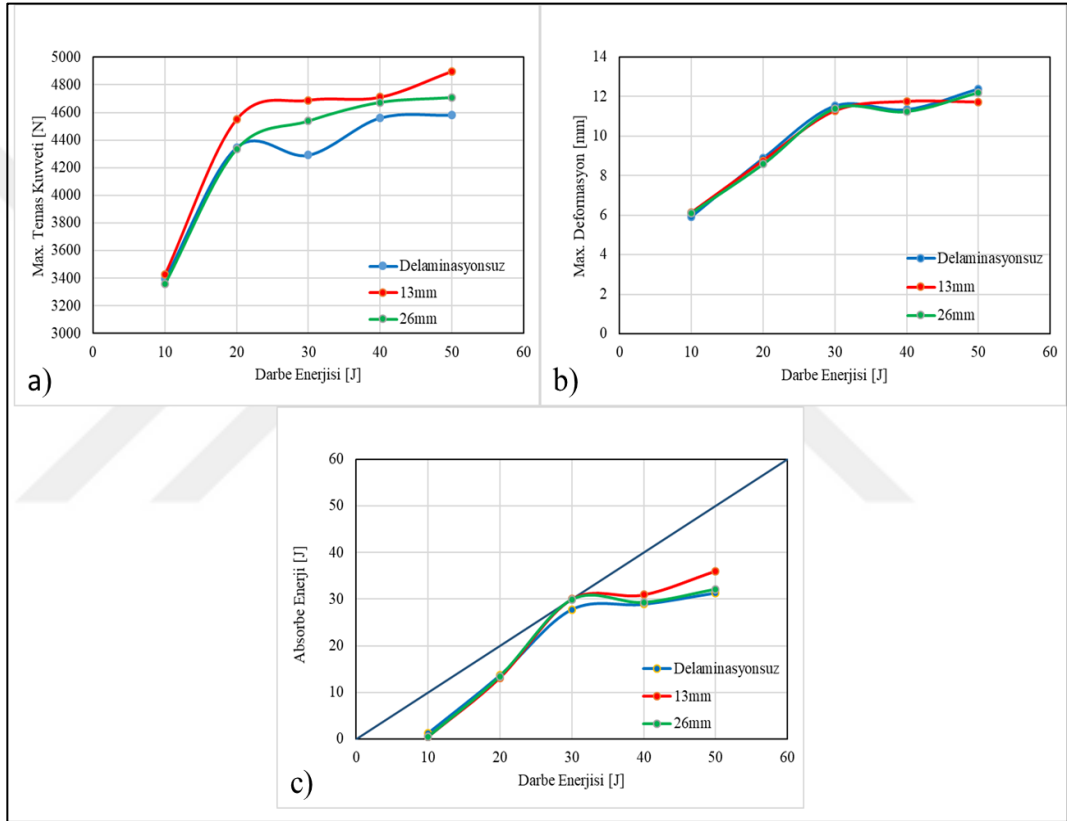


Şekil 5.14 Delaminasyon malzemesi vakum infüzyon filesi olan ve ön delaminasyon olmayan numuneye ait 50J’de a) Temas kuvveti-yer değiştirme, b) Temas kuvveti-zaman, c) Enerji-zaman grafikleri

5.1.3.5 Artan Darbe Enerjisine Bağlı Grafikler

Şekil 5.15’te delaminasyon malzemesi vakum infüzyon filesi olan numunelere ait ortalama maksimum temas kuvveti, ortalama maksimum deformasyon ve absorbe enerjinin artan darbe enerjisine göre grafikleri verilmiştir. Şekil 5.15-a’ya bakıldığında, yükselen darbe enerjisi ile maksimum temas kuvveti artarken delinme enerjisi olan 30J de delaminasyonsuz numunede maksimum temas kuvvetinde bir düşüş olmuştur. 40J’den 50J’e geçişte maksimum temas kuvvetinde, delaminasyonsuz numune ile 26 mm çapındaki delaminasyona sahip numune birbirine paralel doğrultuda değişirken diğer numunede artış gözlemlenmiştir. Şekil 5.15-b’de tüm numunelerde delinme enerjisi 30J’e kadar birbirine çakışık eğriler oluşmuştur. Daha sonraki enerjilerde de belirgin bir fark gözlemlenmemiştir. Benzer çalışmada Sabancı ve Karakuzu. (2013), termoset kompozitler üzerinde yaptıkları

çalışmada aynı enerji seviyesi için delaminasyon boyutuna bağlı olarak maksimum deformasyonda önemli bir değişim görememişlerdir. Şekil 5.15-c'ye bakıldığında, tüm numunelerin 30J'e kadar absorbe edilen enerjilerinde artış olduğu görülmektedir. Delinme enerji seviyesinden sonra delaminasyon çapı 13 mm olan numunenin az miktar artış ile daha fazla enerji absorbe ettiği görülmektedir. Delaminasyonun, vurucunun (impactor) çapından büyük olduğu durumda delaminasyonun etkisi görülmektedir.



Şekil 5.15 Delaminasyon malzemesi vakum infüzyon filesi olan ve ön delaminasyon olmayan numuneye ait a) Maksimum temas kuvvetinin, b) Maksimum deformasyonun, c) Absorbe enerjinin artan darbe enerjisi ile değişim grafikleri

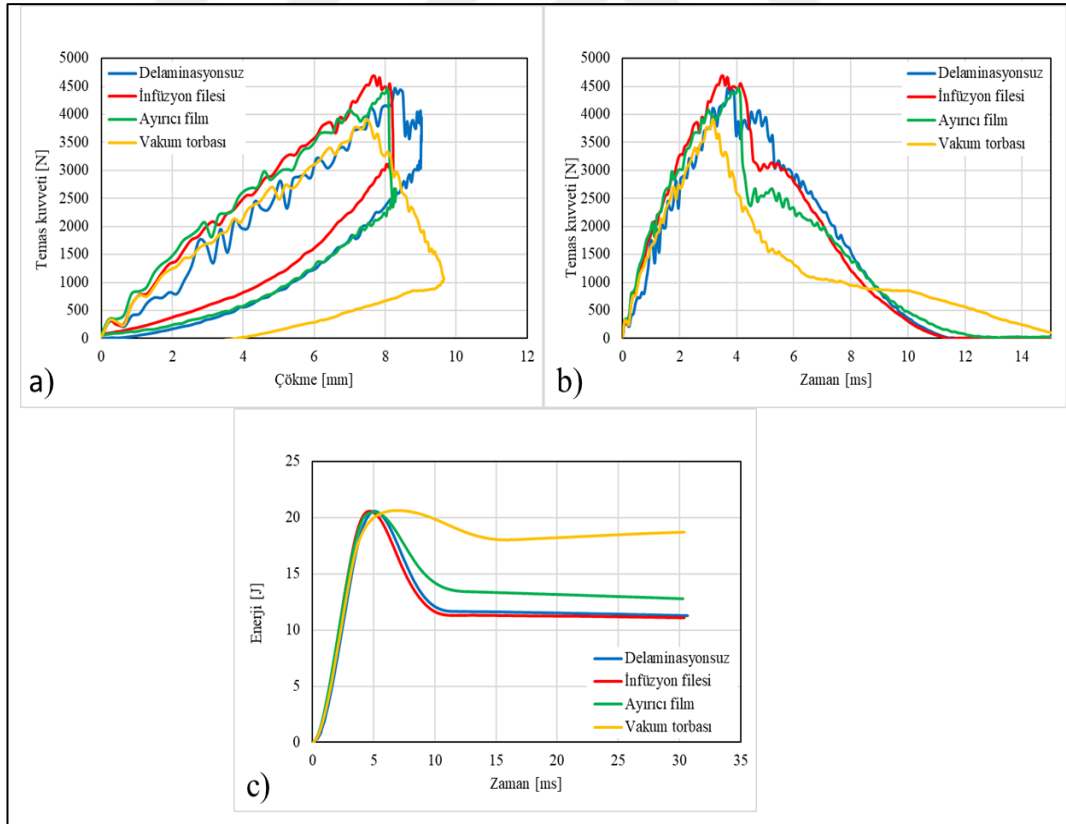
5.2 Delaminasyon Malzemesi Etkisi

Bu bölümde hangi malzemenin daha belirgin delaminasyon etkisi oluşturduğu incelenmiştir. Buna göre temas kuvveti-yer değiştirme, temas kuvveti-zaman, enerji-zaman, maksimum temas kuvveti-darbe enerjisi, maksimum deformasyon-darbe enerjisi ve absorbe enerji-darbe enerjisi grafikleri çizilerek yorumlanmıştır.

5.2.1 13 mm Delaminasyon Çapı İçin Karşılaştırma

5.2.1.1 20J Enerji Seviyesinde Karşılaştırma

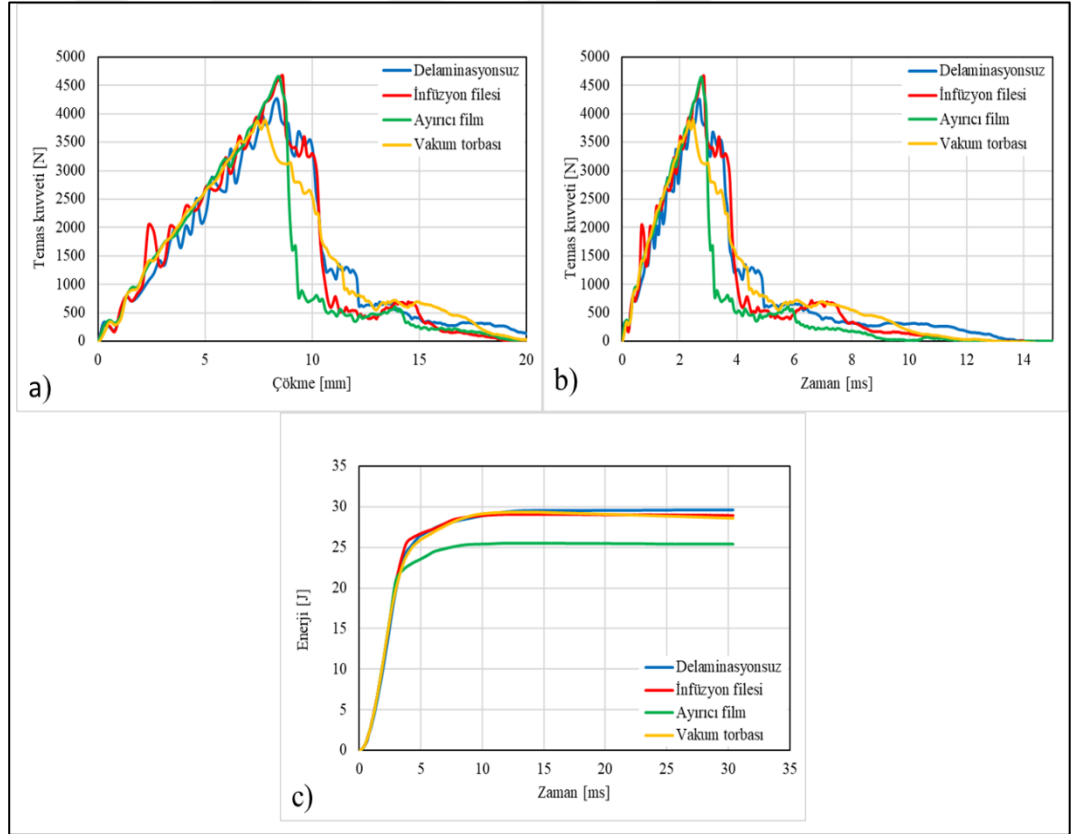
20J enerji değeri grafiklerinden Şekil 5.16-a'ya bakıldığında tüm eğrilerin kapalı formda olduğu görülmektedir. Bu durumda hiçbir numune de delinme görülmemiştir. Vakum torbasının delaminasyon malzemesi olduğu numunenin maksimum temas kuvveti diğerlerine göre daha düşük olduğu gözlemlenmektedir. Diğer üç numunenin birbirlerine yakın olduğu için belirgin bir fark olmadığı söylenebilir. Bu durumda bu enerji değeri için delaminasyon etkisinin vakum torbasında daha belirgin olduğu söylenilebilir. Şekil 5.16-c bakıldığında, vakum torbası kullanılan numune daha fazla enerji absorbe ederken, diğerlerinin birbirine yakın ve daha düşük olduğu görülmektedir.



Şekil 5.16 20J enerji seviyesinde 13 mm delaminasyon çapı için a) Temas kuvveti-yer değiştirme, b) Temas kuvveti-zaman, c) Enerji-zaman grafikleri

5.2.1.2 30J Enerji Seviyesinde Karşılaştırma

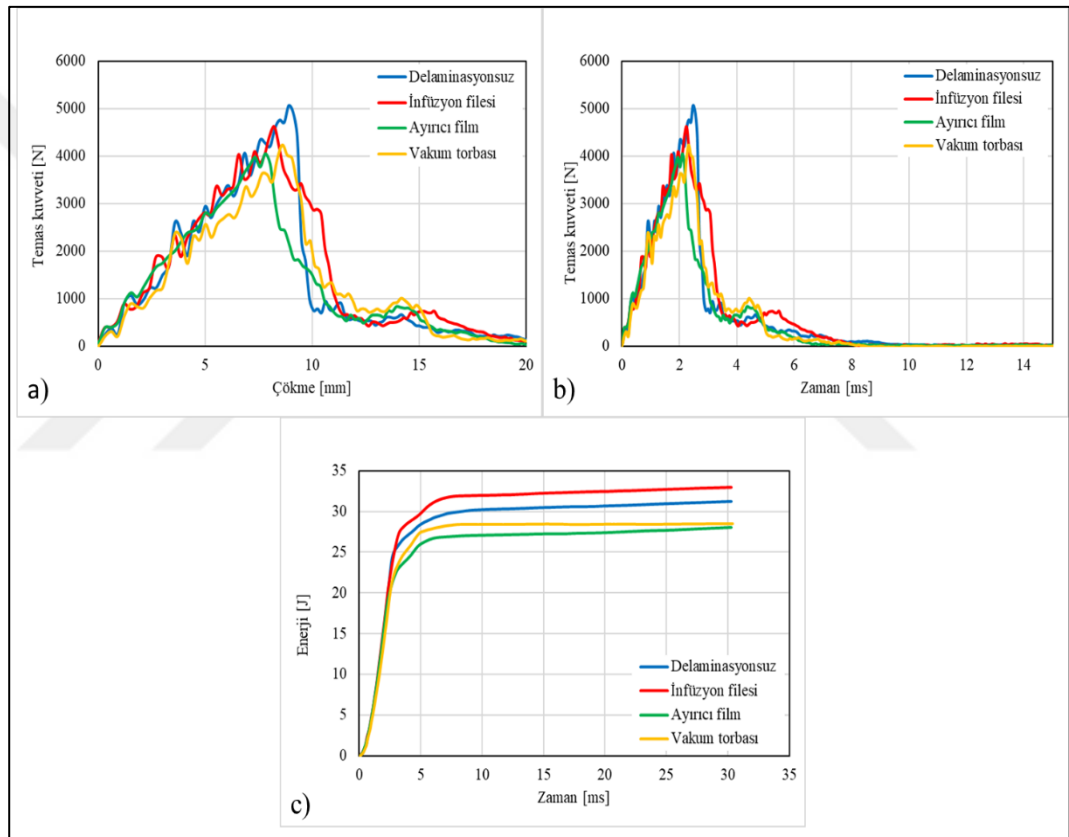
Şekil 5.17-a'ya bakıldığında tüm eğrilerin açık bir formda olduğu görülmektedir. Bu enerji seviyesi durumunda tüm numuneler delinmiştir. Maksimum temas kuvveti değerlerine bakıldığında, vakum torbalı delaminasyonlu numunenin delaminasyonsuz numuneye göre daha düşük olduğu ve infüzyon fileli ile ayırıcı filmli delaminasyonlu numunelerin birbirine yakın ve diğerlerinden yüksek olduğu görülmektedir. Bu enerji değeri için vakum torbasının etkisinin daha belirgin olduğu söylenebilir. Şekil 5.17-c'de enerji grafiğinde, ayırıcı film kullanılan delaminasyonlu numunenin daha düşük enerji absorbe ettiği fakat diğer eğrilerin çakışık olduğu görülmektedir.



Şekil 5.17 30J enerji seviyesinde 13 mm delaminasyon çapı için a) Temas kuvveti-yer değiştirme, b) Temas kuvveti-zaman, c) Enerji-zaman grafikleri

5.2.1.3 40J Enerji Seviyesinde Karşılaştırma

Bu enerji seviyesinde Şekil 5.18-a ve b'deki grafiklerde, maksimum temas kuvvetinin en yüksek delaminasyonsuz numune de olduğu görülmektedir. Tüm delaminasyonlu numunelerde maksimum temas kuvvetinde düşüş olduğu görülürken, en fazla düşüş ayırıcı filmin kullanıldığı numunede daha sonra ise vakum torbası kullanılan numunede olmuştur. Enerji-zaman grafiğinde (Şekil 5.18-c), absorbe edilen enerji bakımından belirgin bir fark görülmemektedir.

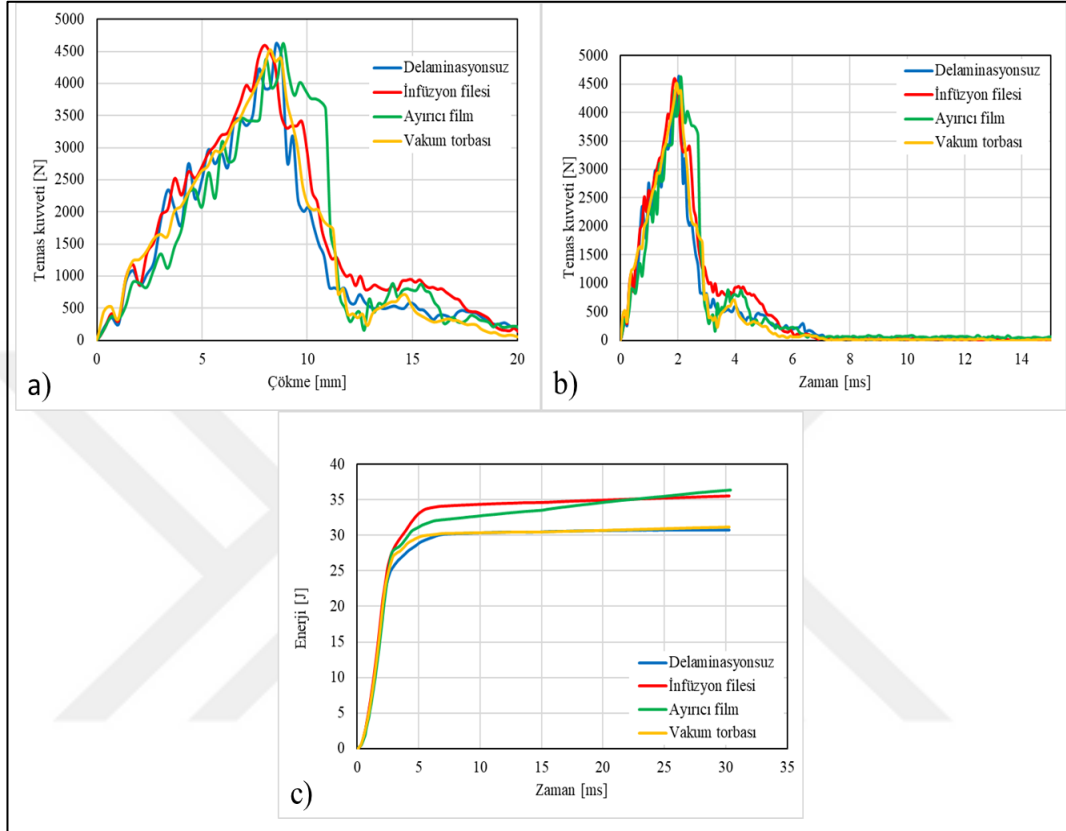


Şekil 5.18 40J enerji seviyesinde 13 mm delaminasyon çapı için a) Temas kuvveti-yer değiştirme, b) Temas kuvveti-zaman, c) Enerji-zaman grafikleri

5.2.1.4 50J Enerji Seviyesinde Karşılaştırma

Şekil 5.19-a ve b grafikleri incelendiğinde, tüm numunelerin maksimum temas kuvvetinin birbirine yakın olduğu görülmektedir. Bu durumda kullanılan hiçbir malzemenin delaminasyon etkisi için belirgin bir fark oluşturmadığını söyleyebiliriz.

Enerji-zaman grafiğinde (Şekil 5.19-c) ise, delaminasyonsuz numune ile vakum torbalı delaminasyonlu numunenin eğrileri birbirine yakın iken infüzyon fileli ile de ayırıcı filmin kullanıldığı numuneler birbirine yakın eğrilere sahiptirler.

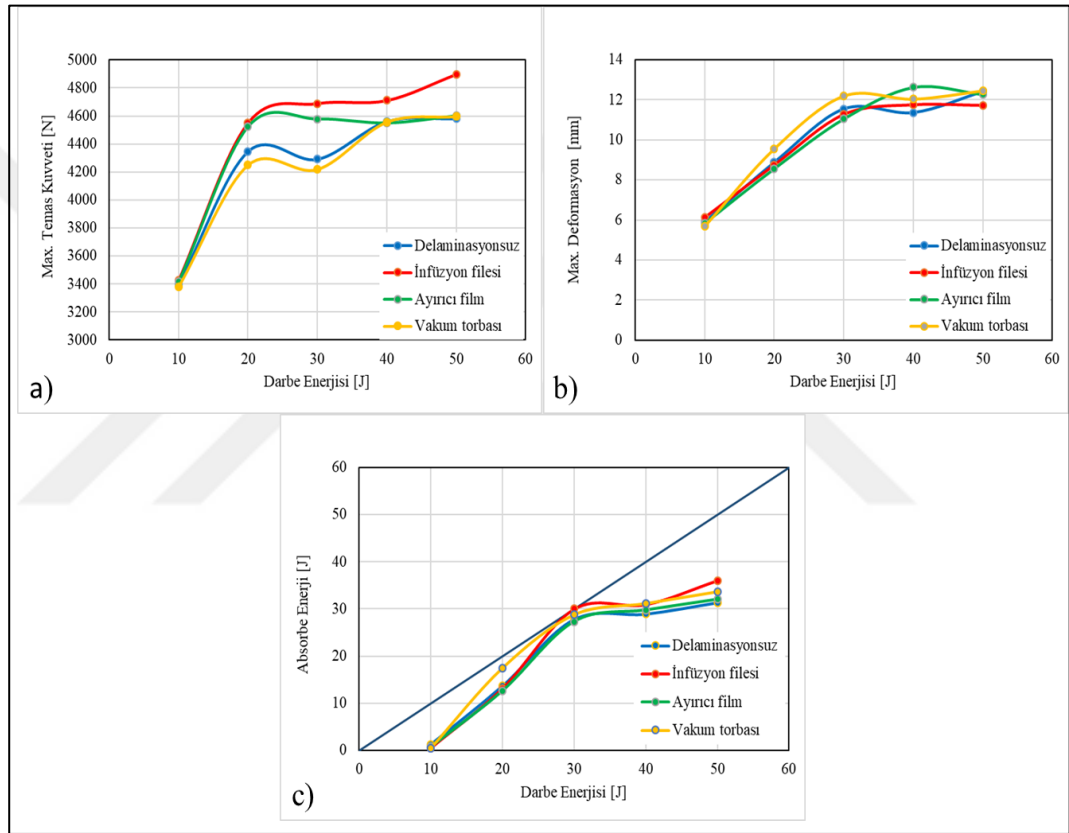


Şekil 5.19 50J enerji seviyesinde 13 mm delaminasyon çapı için a) Temas kuvveti-yer değiştirme, b) Temas kuvveti-zaman, c) Enerji-zaman grafikleri

5.2.1.5 Artan Darbe Enerjisine Bağlı Grafikler

Şekil 5.20’de delaminasyon malzemesi farklı fakat delaminasyon çapları aynı (13 mm) olan numunelere ait ortalama maksimum temas kuvveti, ortalama maksimum deformasyon ve absorbe enerjinin artan darbe enerjisine göre grafikleri verilmiştir. Şekil 5.20-a’ya bakıldığında, yükselen darbe enerjisi ile maksimum temas kuvveti artarken delinme enerjisi olan 30J de tüm numunelerde maksimum temas kuvvetinde bir düşüş olmuştur. İnfüzyon filesi kullanılan numune diğerlerine göre maksimum temas kuvvetinde daha yüksek değerlere ulaşmıştır. Vakum torbası kullanılan numune ile delaminasyonsuz numune birbirine yakın eğriler sahiptir. İnfüzyon filesi

hariç hepsi 40J ve 50J enerji seviyelerinde yakın nokta kesişmişlerdir. Şekil 5.20-b’de tüm numunelerde delinme enerjisi 30J’e kadar birbirine yakın eğriler oluşmuştur. Tüm numuneler 50J’de birbirlerine yakın bir noktada maksimum deformasyon göstermişlerdir. Şekil 5.20-c’de eş enerji diyagramları çizilmiştir. Tüm numunelerin delinme enerjisi olan 30J’e kadar absorbe edilen enerjilerinde artış olduğu görülmektedir. Delinme enerji seviyesinden sonra da tüm numuneler daha çok yatay yönde ilerleyen birbirine yakın eğrilere sahiptirler.



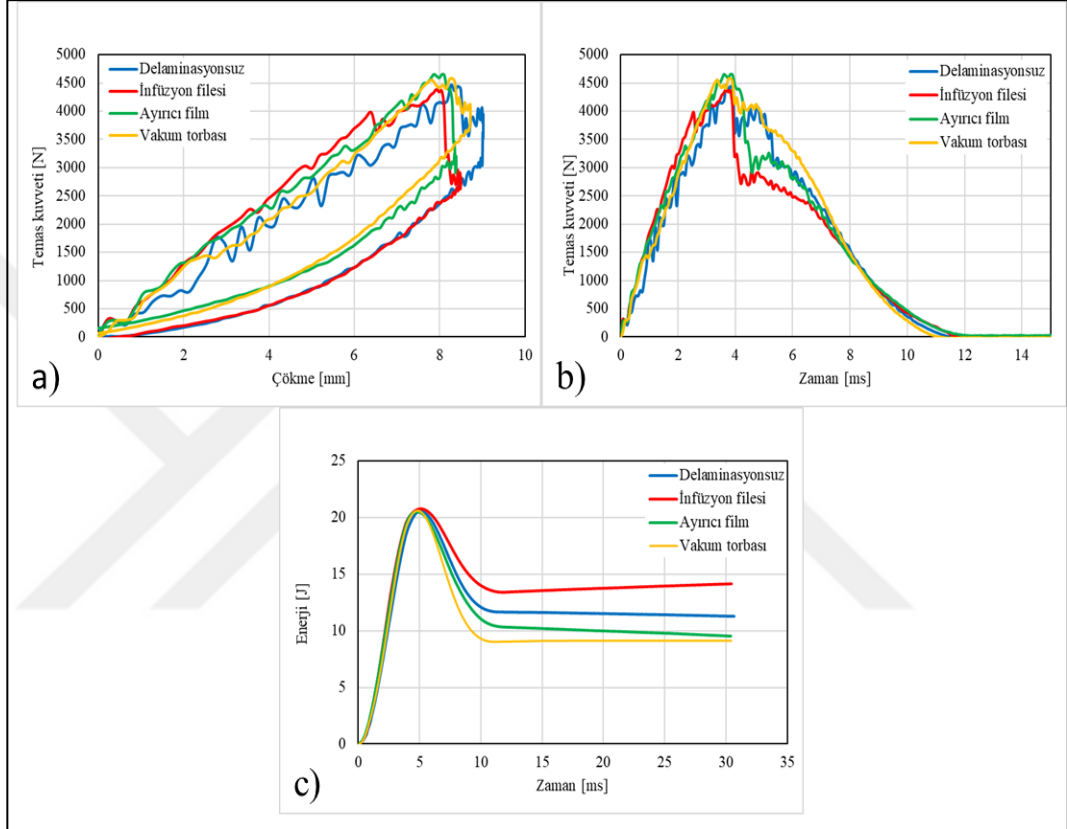
Şekil 5.20 13 mm delaminasyon çapı için a) Maksimum temas kuvvetinin, b) Maksimum deformasyonun, c) Absorbe enerjinin artan darbe enerjisi ile değişim grafikleri

5.2.2 26 mm Delaminasyon Çapı İçin Karşılaştırma

5.2.2.1 20J Enerji Seviyesinde Karşılaştırma

20J enerji değeri grafiklerinden Şekil 5.21-a’ya bakıldığında tüm eğrilerin kapalı formda olduğu görülmektedir. Buna göre hiçbir numune de delinme durumu

olmamıştır. Maksimum temas kuvvetleri incelendiğinde, tüm numunelerin birbirine yakın olduğu görülmektedir. 26 mm çapı için delinme öncesi enerji seviyesinde kullanılan numunelerde belirgin delaminasyon etkisi olmadığı söylenilebilir. Şekil 5.21-c grafiğine bakıldığında, infüzyon filesi kullanılan numune daha fazla enerji absorbe ederken, diğerlerinin birbirine yakın ve daha düşük olduğu görülmektedir.

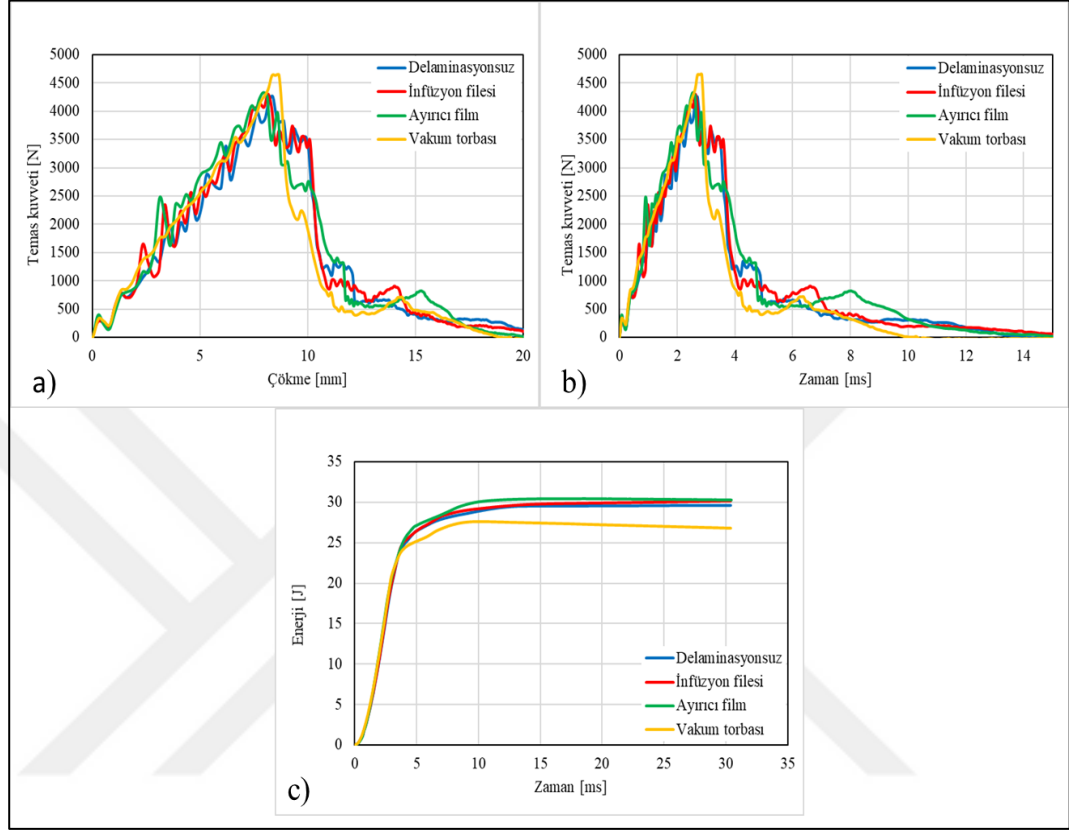


Şekil 5.21 20J enerji seviyesinde 26 mm delaminasyon çapı için a) Temas kuvveti-yer değiştirme, b) Temas kuvveti-zaman, c) Enerji-zaman grafikleri

5.2.2.2 30J Enerji Seviyesinde Karşılaştırma

Şekil 5.22-a'ya bakıldığında, tüm eğrilerin açık bir formda olduğu görülmektedir. Bu enerji seviyesinde tüm numuneler delinmiştir. Maksimum temas kuvveti değerlerine bakıldığında, vakum torbalı delaminasyonlu numunenin diğer tüm numunelere göre daha yüksek olduğu ve diğer numunelerin birbirine yakın olduğu görülmektedir. Bu enerji değeri için 26 mm delaminasyon çapının vakum torbalı numune de az da olsa mukavemet sağladığını söyleyebiliriz. Şekil 5.22-c'de enerji

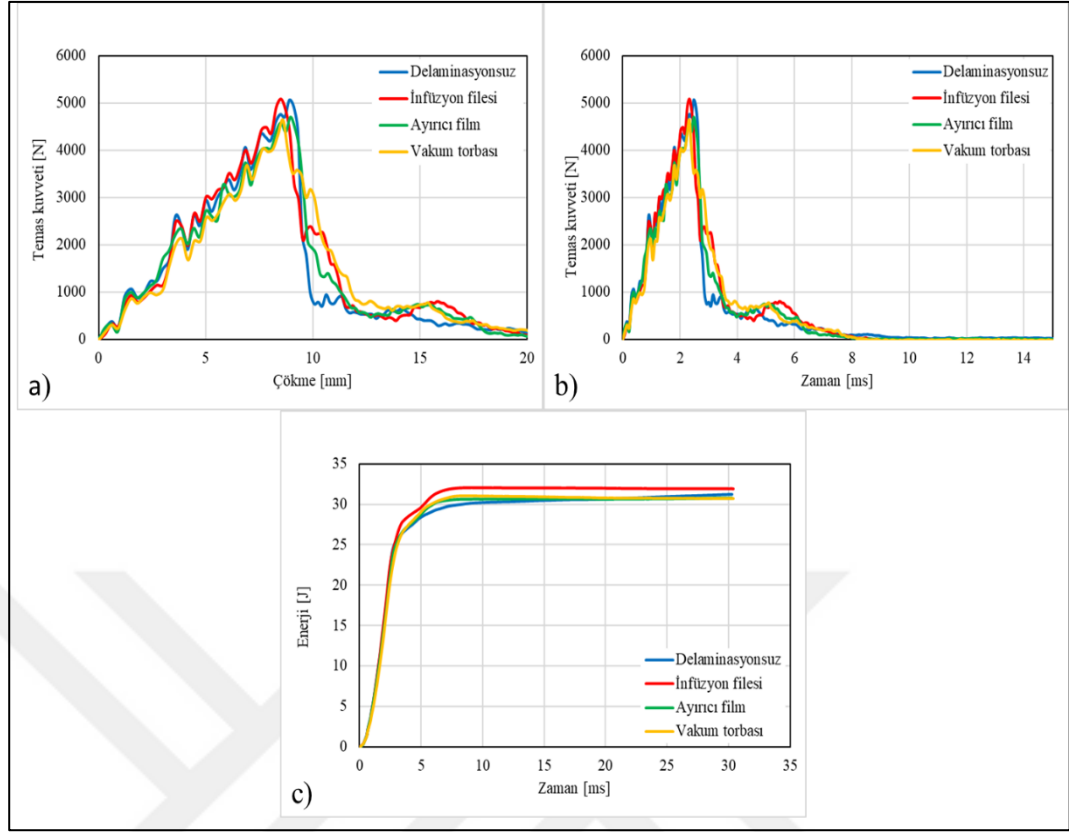
grafiğinde, vakum torbalı numune diğerlerine göre az miktarda farklılık göstererek daha az enerji absorbe ederken diğer numunelerin eğrileri birbirine çakışıktır.



Şekil 5.22 30J enerji seviyesinde 26 mm delaminasyon çapı için a) Temas kuvveti-yer değıştirme, b) Temas kuvveti-zaman, c) Enerji-zaman grafikleri

5.2.2.3 40J Enerji Seviyesinde Karşılaştırma

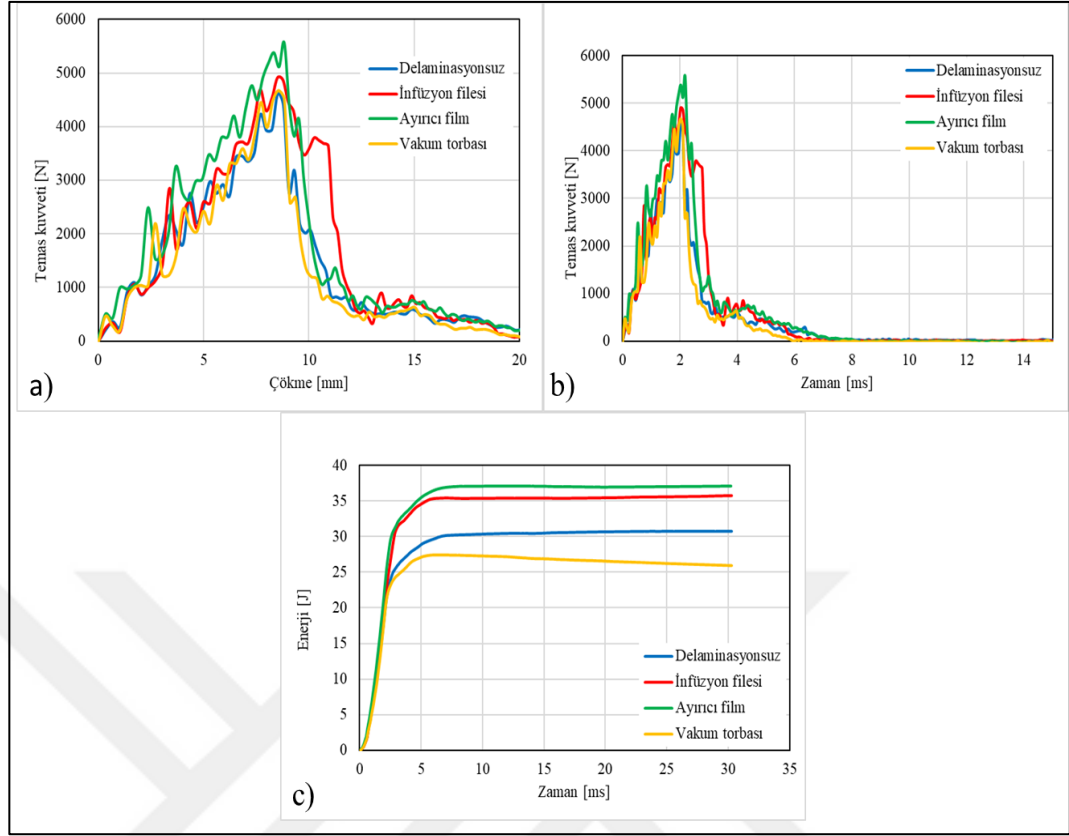
Bu enerji seviyesinde Şekil 5.23-a ve b'deki grafiklerde, maksimum temas kuvvetinin, delaminasyonsuz numune ile infüzyon fileli delaminasyonlu numune de birbirine yakın ve daha yüksek olduğu görülmektedir. Vakum torbası ve ayırıcı filmin kullanıldığı delaminasyonlu numunelerde delaminasyonun etkisi ile maksimum temas kuvvetinde düşüş gözlemlenmiştir. Enerji-zaman grafiğinde (Şekil 5.23-c), absorbe edilen enerji bakımından belirgin bir fark yoktur ve eğriler birbirine neredeyse çakışıktır.



Şekil 5.23 40J enerji seviyesinde 26 mm delaminasyon çapı için a) Temas kuvveti-yer değiştirme, b) Temas kuvveti-zaman, c) Enerji-zaman grafikleri

5.2.2.4 50J Enerji Seviyesinde Karşılaştırma

Şekil 5.24-a ve b grafikleri incelendiğinde, ayırıcı filmin kullanıldığı delaminasyonlu numune hariç diğer numunelerin maksimum temas kuvvetinin birbirine yakın olduğu görülmektedir. 26 mm çaplı delaminasyonlu numunelerde, bu enerji seviyesi için ayırıcı filmin kullanıldığı numune de vurucu uca olan dirençte artma olmuştur. Enerji-zaman grafiğinde (Şekil 5.24-c) ise, infüzyon fileli ile ayırıcı filmin kullanıldığı numuneler birbirine yakın eğrilere sahipken diğer numunelerin daha az enerji absorbe ettiği görülmektedir.

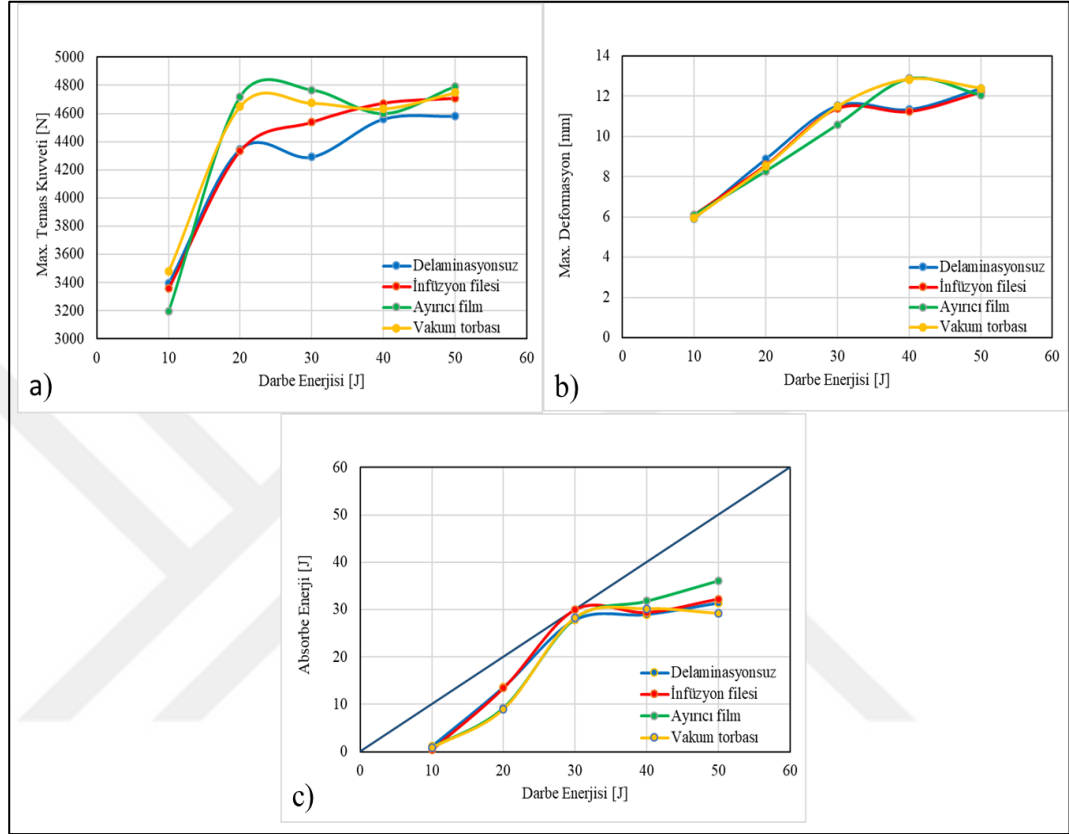


Şekil 5.24 50J enerji seviyesinde 26 mm delaminasyon çapı için a) Temas kuvveti-yer değiştirme, b) Temas kuvveti-zaman, c) Enerji-zaman grafikleri

5.2.2.5 Artan Darbe Enerjisine Bağlı Grafikler

Şekil 5.25'te delaminasyon malzemesi farklı fakat delaminasyon çapları aynı (26 mm) olan numunelere ait ortalama maksimum temas kuvveti, ortalama maksimum deformasyon ve absorbe enerjinin artan darbe enerjisine göre grafikleri verilmiştir. Şekil 5.25-a'ya bakıldığında, yükselen darbe enerjisi ile maksimum temas kuvveti artarken delinme enerjisi olan 30J de tüm numunelerde maksimum temas kuvvetinde bir düşüş olmuştur. 40J de tüm numuneler birbirine yakın maksimum temas kuvveti değerine sahiptirler. 40J'den 50J'e geçişte maksimum temas kuvvetinde delaminasyonsuz numune de belirgin bir değişim yokken diğer numunelerde artış olmuştur. Şekil 5.25-b'de tüm numunelerde delinme enerjisi 30J'e kadar birbirine yakın eğriler oluşmuştur. Tüm numuneler 50J'de birbirlerine yakın bir noktada maksimum deformasyon göstermişlerdir. Şekil 5.25-c'de eş enerji diyagramları çizilmiştir. Tüm numunelerin delinme enerjisi olan 30J'e kadar absorbe edilen

enerjilerinde artış olduğu görülmektedir. Delinme enerji seviyesinden sonra da tüm numuneler daha çok yatay yönde ilerleyen birbirine yakın eğrilere sahipken ayırıcı filmli numunenin az bir farkla daha fazla enerji absorbe etmiştir.



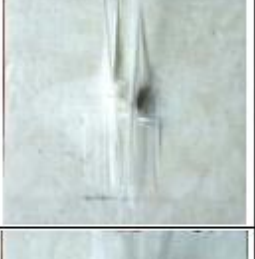
Şekil 5.25 26 mm delaminasyon çapı için a) Maksimum temas kuvvetinin, b) Maksimum deformasyonun, c) Absorbe enerjinin artan darbe enerjisi ile değişim grafikleri

5.3 Hasarlı Numunelerin İncelenmesi

Kompozit malzemeler kullanım yeri ve amacına göre farklı darbe yüklerine maruz kalabilirler. Kompozit malzemelerin bileşenleri kullanılacak yere ve amaca göre seçilmektedir. Çünkü, kullanılan matris veya takviye malzemesinin özelliklerine göre malzeme darbeye karşı tepki vermektedir. Örneğin, metal malzeme kullanarak üretilen bir kompozit plastik şekil değiştirme kabiliyetin dolayı daha fazla enerji absorbe eder. Metallerin akma özelliğinden dolayı ani ve beklenmedik kopmalar meydana gelmez. Darbe hasarı, genellikle metallerde darbe yüzeyinde başladığından tespit edilmesi daha kolay olur. Bunun yanı sıra plastik matrisli kompozitler

kırılımandır ve bu özelliklerinden dolayı sadece elastik deformasyon ile enerji absorbe edebilirler. Kompozitlerde çeşitli hasar modları oluşabilmektedir. Bu hasarların çoğu gözle görülemeyecek veya gözle tespiti çok az olan boyutlarda olabilir. Tabakalı kompozitlerde darbe etkisiyle oluşan hasarlar; elyaf hasarı, delaminasyon ve matris çatlağıdır. Düşük hızdaki darbeler her zaman kompozitin delinmesine yol açmaz ve üretimde veya yapının ömrü boyunca gerçekleşmesi beklenir. Düşük hızlı darbelerde öncelikle gerçekleşen hasar modu matris çatlaması hasarıdır. Malzemeye uygulanan darbe şiddetinin artmasıyla delaminasyon oluşumu meydana gelir ve daha sonraki evrede ise elyaf hasarları oluşmaktadır.

Aşağıdaki Şekil 5.26, 5.27 ve 5.28 de tez kapsamında üretilen numunelere uygulanan 10J, 20J, 30J, 40J ve 50J darbe enerjileri sonrası numunelerin alt ve üst yüzeylerinde oluşan hasarlar görülmektedir. 10J enerji seviyesinde üretilen tüm numunelerin üst yüzeyinde vurucu ucun temas ettiği yerde küçük matris hasarı meydana gelmiştir. Alt yüzeyde ise eğilmeden dolayı fiber gerilimi etkili olmuştur. 20J enerji seviyesinde, delaminasyon hasarı olmuştur. Bunun sebebi 0/90 fiber doğrultularından dolayı eğilme rijitliğindeki uyumsuzluktan kaynaklanmış olabilir. Bunun yanı sıra numune delinmeye yaklaştığı için vurucu ucun numunenin alt tabakasından sekmesinden dolayı numunenin alt yüzeyinde matris hasarları meydana gelmiştir. 30J enerji seviyesi incelendiğinde, tüm numunelerin delindiği gözlenmektedir. Delinmeyle birlikte numunelerde matris hasarı, delaminasyon ve elyaf kırılması meydana gelmiştir. 40J ve 50J enerji seviyelerinde ise numunelerin tamamen delinmesiyle tüm hasar modlarının meydana geldiği görülmektedir. Darbe enerji seviyesi arttıkça numunelerin yüzeyindeki hasarlarda artış olduğu görülmekle birlikte delinme sonrasında gözle görülür belirgin farklar azdır.

Darbe Enerjisi	Vakum Torbası			
	13 mm		26 mm	
	Üst Yüzey	Arka Yüzey	Üst Yüzey	Arka Yüzey
10J				
20J				
30J				
40J				
50J				

Şekil 5.26 Delaminasyon malzemesi vakum torbası olan numunelerin deney sonrası hasar şekilleri

Darbe Enerjisi	Ayırıcı Film			
	13 mm		26 mm	
	Üst Yüzey	Arka Yüzey	Üst Yüzey	Arka Yüzey
10J				
20J				
30J				
40J				
50J				

Şekil 5.27 Delaminasyon malzemesi ayırıcı film olan numunelerin deney sonrası hasar şekilleri

Darbe Enerjisi	Vakum İnfüzyon Filesi			
	13 mm		26 mm	
	Üst Yüzey	Arka Yüzey	Üst Yüzey	Arka Yüzey
10J				
20J				
30J				
40J				
50J				

Şekil 5.28 Delaminasyon malzemesi vakum infüzyon filesi olan numunelerin deney sonrası hasar şekilleri

BÖLÜM ALTI

YARGILAR VE SONUÇLAR

Bu tez çalışması kapsamında, cam elyaf takviyeli granül ve prepreg laminalar kullanılarak üretilen termoplastik kompozitlerin düşük hızlı darbe davranışları ve yapay delaminasyon etkileri üzerinde çalışılmıştır. Dizilim konfigürasyonu [0/90/Granül/90/0] olup 3 farklı delaminasyon malzemesi (ayırıcı film, vakum torbası ve vakum infüzyon filesi) farklı çaplarda (13 ve 26 mm) laminalar arasına yerleştirilmiştir. Numunelere 10J, 20J, 30J, 40J ve 50J enerji seviyelerinde darbe deneyleri uygulanmıştır. Elde edilen veriler karşılaştırılmış ve çıkarılan genel yargılar aşağıda sıralanmıştır:

- 10J ve 20J enerji seviyelerinde tüm numunelerde (delaminasyonlu ve delaminasyonsuz) geri sekme (rebounding) durumu gözlemlenmiştir. Bu enerji seviyelerinde maksimum temas kuvvetlerinde belirgin bir farklılık görülmemiştir.
- Delaminasyonsuz numune ve gömülü delaminasyonlu numunelerin hepsi uygulanan 30J enerji seviyesinde delinmiştir (perforation). Delaminasyon çapı 13 mm olan numuneler arasında malzemesi ayırıcı film olan numune 25J enerji seviyesine yakın delinirken diğerleri 29J seviyesine yakın bir değerde delinmiştir. Delaminasyon çapı 26 mm olan numuneler arasında ise malzemesi vakum torbası olan numune 27J enerji seviyesinde delinirken diğerleri 29J'e yakın olduğu gözlemlenmiştir.
- Gömülü delaminasyon olarak vakum infüzyon filesi kullanılan numuneler delaminasyonsuz numunelerle kıyaslandığında artan darbe enerjisi (10J-50J) ile birlikte maksimum temas kuvvetinde artış olduğu görülmüştür (Delaminasyon çapı 13 mm olan numune için yaklaşık %33). Delaminasyon çapının artışı ile bu malzeme mukavemet vermiştir.
- Darbe enerjisi artışı ile birlikte absorbe edilen enerji ve maksimum deformasyonda, vakum infüzyon fileli numuneler ve delaminasyonsuz numuneler arasında belirgin bir fark gözlemlenmemiştir.
- Gömülü delaminasyon olarak ayırıcı film kullanılan numuneler

delaminasyonsuz numuneler ile kıyaslandığında delinme enerjisi sonrasındaki enerji seviyelerinde, 13 mm çapındaki delaminasyonda maksimum temas kuvvetinde (40J'de 4093N ve 50J'de 4651N) azalma görülürken 26 mm 'de (40J'de 4780N ve 50J'de yaklaşık 5610N) mukavemet verdiği gözlemlenmiştir.

- Darbe enerjisi artışı ile birlikte absorbe edilen enerji ve maksimum deformasyonda, gömülü delaminasyon olarak ayırıcı film kullanılan numuneler ve delaminasyonsuz numuneler arasında belirgin bir fark gözlemlenmemiştir.
- Gömülü delaminasyon olarak vakum torbası kullanılan numuneler delaminasyonsuz numuneler ile kıyaslandığında delinme enerjisi sonrasındaki enerji seviyelerinde, delaminasyonlu numunelerin maksimum temas kuvvetinde azalma görülmüştür. Fakat çap artışından dolayı belirgin bir farklılık tespit edilememiştir.
- Darbe enerjisi artışı ile birlikte absorbe edilen enerji ve maksimum deformasyonda, gömülü delaminasyon olarak vakum torbası kullanılan numuneler ve delaminasyonsuz numuneler arasında belirgin bir fark gözlemlenmemiştir.
- 13 mm çapındaki delaminasyonlu tüm numunelerle delaminasyonsuz numuneler karşılaştırıldığında, vakum torbası delaminasyon etkisi oluştururken diğerlerinde belirgin değişim gözlemlenmemiştir (vakum torbası için 30J'de ve 50J'de temas kuvveti sırasıyla 3960N, 4550N iken delaminasyonsuz da ise 4290N ve 4696N'dur).
- 26 mm çapındaki delaminasyonlu tüm numunelerle delaminasyonsuz numuneler karşılaştırıldığında, malzemenin etkisiyle maksimum temas kuvvetlerinde artış görülmektedir (30J ve 50J enerji seviyelerinde delaminasyonsuz numune için temas kuvveti sırasıyla 4297N, 4696N iken diğerlerinde daha yüksektir).

Kompozit malzemelerde meydana gelen delaminasyonların malzemenin mekanik özelliklerinden düşmeye sebep olduğu bilinmektedir. Önceki yapılan araştırmalar incelendiğinde delaminasyon çapı değişiminin termoset malzemeler için davranışı incelenmiştir. Bu durum göz önüne alındığında diğer çalışmalardan farklı olarak

termoplastik kompozitlerde test edilmiştir. Farklı delaminasyon malzemeleri kullanılarak uygun malzeme seçimi yapılmıştır. Yukarıdaki elde edilen yargılar sonucunda gömülü delaminasyon için vakum torbasının diğer malzemelere göre daha uygun sonuçlar verdiği tespit edilmiştir.



KAYNAKLAR

- Abrate, S. (2011). *Impact engineering of composite structures* (1. Baskı). Italy: CISM, Udine.
- Arıkan, V. ve Sayman, O. (2015). Comparative study on repeated impact response of E-glass fiber reinforced polypropylene and epoxy matrix composites. *Composites Part B*, 83, 1-6.
- Aslan, Z., Karakuzu, R. ve Okutan, B. (2003). The response of laminated composite plates under low-velocity impact loading. *Composite Structures*, 59 (2003), 119–127.
- Balasubramanian, M. (2013). Introduction to composites. *Composite materials and processing* (1-10). London: CRC Press.
- Barbero, E. J. (2017). *Introduction to composite materials design* (3. Baskı). Boca Raton: CRC press.
- Boria, S., Scattina, A., ve Belingardi, G. (2017). Impact behavior of a fully thermoplastic composite. *Composite Structures*, 167 (2017), 63–75.
- Campbell, F.C. (2010). *Structural composite materials* (1. Baskı). Ohio: ASM International.
- Carillo, J.G., Gonzalez-Canche, N.G., Flores-Johnson, E.A., ve Cortes, P. (2019). Low velocity impact response of fibre metal laminates based on aramid fibre reinforced polypropylene. *Composite Structures*, 220 (2019), 708–716.
- Castanie, B., ve Abrate, S. (2013). *Dynamic failure of composite and sandwich structures*. London: Springer Science and Business Media.

- Chawla, K.K. (2012). *Composite materials: Science and engineering* (3. Baskı). London: CRC Press.
- Doğan, A. ve Arıkan, V. (2017). Low-velocity impact response of E-glass reinforced thermoset and thermoplastic based sandwich composites. *Composites Part B*, 127, 63-69.
- Esendemir Ü. ve Caner A.Y. (2017). Tabakalı kompozit malzemelerin darbe davranışının deneysel olarak incelenmesi. *Journal of Natural and Applied Sciences*, 22, (1), 207-215.
- Evci, C. ve Gülgeç, M. (2011). An experimental investigation on the impact response of composite materials. *International Journal of Impact Engineering*, 43 (2012), 40-51.
- Exportersindia (1997). *Vacuum bagging film*. 7 Temmuz 2019, <https://www.exportersindia.com/vactechcomposites/vacuum-bagging-film-3453449.html>.
- Fontijnepresses (2018). *LabEcon 300/600*. 11 Temmuz 2019, <https://www.fontijnepresses.com/wpcontent/uploads/2019/04/BrochureFontijne2019-DIGITAL-1.pdf>.
- Jeon, B.S., Lee, J.J., Kim, J.K., ve Huh, J.S. (1998). Low velocity impact and delamination buckling behavior of composite laminates with embedded optical fibers. *Smart Materials and Structures*, 8 (1999), 41–48.
- Kaw, A. K. (2006). *Mechanics of composite materials* (2. Baskı). Boca Raton: CRC press.

Kompozitsan (2017). *Vakum infüzyon filmi*. 7 Temmuz 2019, <http://www.kompozitsan.com/tr/vakum-infüzyon-malzemeleri/481-vakum-infuezyon-files-i-extrude-5m-120cm.html>.

Mallick, P.K. (2007). *Fiber-reinforced composites: materials, manufacturing and design*. London: CRC Press.

Mazumdar, S. (2001). *Composites manufacturing: materials, product, and process engineering*. U.S: CRC Press.

Mortensen, A. (2007). *Concise encyclopedia of composite materials* (2. Baskı). Boca Raton: Elsevier.

Nagappa, R.S. (2015). *Numerical analysis of low velocity impact on fibre reinforced laminated composite plates*. Lisans Tezi, Kharagpur Teknoloji Enstitüsü, Hindistan.

Njuguna, J. (2016). *Lightweight composite structures in transport*. Cambridge: Woodhead publishing.

Özdemir, O. ve Kandaş, H. (2018). Cam lifi takviyeli polipropilen kompozitlerde kalınlığın ve sıcaklığın darbe davranışına etkileri. *Tekstil ve Mühendis*, 25, (110), 103-112.

Özdemir, O., Öztoprak, N. ve Kandaş, H. (2018). Single and repeated impact behaviors of bio-sandwich structures consisting of thermoplastic face sheets and different balsa core thicknesses. *Composites Part B*, 149, 49–57.

Patil, S., Reddy, D.M., ve Reddy, M. (2018). Low velocity impact analysis on composite structures–A review. In *AIP Conference Proceedings*, 1943, (1), 020009.

- Qu, J. (1993). The effect of slightly weakened interfaces on the overall elastic properties of composite materials. *Mechanics of Materials*, 14(4), 269-281.
- Reyes, G. ve Sharma, U. (2009). Modeling and damage repair of woven thermoplastic composites subjected to low velocity impact. *Composite Structures*, 92 (2010), 523–531.
- Russo, P., Langella, A., Papa, I., Simeoli, G., ve Lopresto, V. (2017). Thermoplastic polyurethane/glass fabric composite laminates: Low velocity impact behavior under extreme temperature conditions. *Composite Structures*, 166 (2017), 146–152.
- Russo, P., Langella, A., Papa, I., Simeoli, G., ve Lopresto, V. (2016). Low velocity impact and flexural properties of thermoplastic polyurethane/woven glass fabric composite laminates. *Procedia Engineering*, 167 (2016), 190 – 196.
- Sabancı, E. ve Karakuzu, R. (2013). Effect of embedded delaminations on impact behavior of laminated composites. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 19 (7), 303-309.
- Sawal, N., Rahman, M.H., Sabri, M., ve Hazizan, M.A. (2017). Low velocity impact properties of polypropylene (PP) honeycomb core sandwich structure with glass fiber reinforced plastic (GFRP) laminated facesheet. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, 12 (4), 1299-1303.
- Silberschmidt, V.V. (2016). *Dynamic deformation, damage and fracture in composite materials and structures*. United Kingdom: Woodhead Publishing.
- Sorrentino, L., Davi Silva de, V., D'Auria M., Sarasini, F., ve Tirill, J. (2017). Effect of temperature on static and low velocity impact properties of thermoplastic composites. *Composites Part B*, 113 (2017), 100-110.

Staab, G.H. (2015). *Laminar composites* (2. Baskı). London: Elsevier.

Sun, X.C., Kawashita, L.F., Kaddour, A.S., Hiley, M.J., ve Hallett, S.R. (2018). Comparison of low velocity impact modelling techniques for thermoplastic and thermoset polymer composites. *Composite Structures*, 203 (2018), 659–671.

Vieille, B., Casado, V.M., ve Bouvet, C. (2013). About the impact behavior of woven-ply carbon fiber-reinforced thermoplastic and thermosetting-composites: A comparative study. *Composite Structures*, 101 (2013), 9–21.

