



T.C.
EGE ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü



**KAYMA GERİLİMİ ALTINDA
YOĞUNLAŞAN SIVI (STF) VE TERMOSET
REÇİNE İLE İŞLENMİŞ YÜKSEK
PERFORMANSLI KUMAŞLARIN
BALİSTİK DAYANIMLARININ
İNCELENMESİ**

Yüksek Lisans Tezi

Meriç SARIÇALI

Malzeme Bilimi ve Mühendisliği

İzmir
2022

T.C.
EGE ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü

**KAYMA GERİLİMİ ALTINDA
YOĞUNLAŞAN SIVI (STF) VE TERMOSET
REÇİNE İLE İŞLENMİŞ YÜKSEK
PERFORMANSLI KUMAŞLARIN
BALİSTİK DAYANIMLARININ
İNCELENMESİ**

Meriç SARIÇALI

Danışman : Prof. Dr. Bikem ÖVEZ

Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalı
Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Yüksek Lisans Programı

İzmir
2022

EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

EÜ Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin ilgili hükümleri uyarınca Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum **“Kayma Gerilimi Altında Yoğunlaşan Sıvı (Stf) ve Termoset reçine İle İşlenmiş Yüksek Performanslı Kumaşların Balistik Dayanımlarının İncelenmesi”** başlıklı bu tezin kendi çalışmam olduğunu, sunduğum tüm sonuç, doküman, bilgi ve belgeleri bizzat ve bu tez çalışması kapsamında elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara atıf yaptığımı ve bunları kaynaklar listesinde usulüne uygun olarak verdiğimi, tez çalışması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını, bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya diğer bir üniversitede başka bir tez çalışması içinde sunmadığımı, bu tezin planlanmasından yazımına kadar bütün safhalarda bilimsel etik kurallarına uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul edeceğimi beyan ederim.

31 / 08 / 2022

Meriç SARIÇALI

ÖZET

KAYMA GERİLİMİ ALTINDA YOĞUNLAŞAN SIVI (STF) VE TERMOSET REÇİNE İLE İŞLENMİŞ YÜKSEK PERFORMANSLI KUMAŞLARIN BALİSTİK DAYANIMLARININ İNCELENMESİ

SARIÇALI, Meriç

Yüksek Lisans Tezi, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Bikem ÖVEZ

Ağustos 2022, 101 sayfa

Günümüz savunma sanayinde çelik gibi geleneksel malzemelerin yerini daha hafif, daha sağlam ve yeni üretim teknolojileri ile elde edilen kompozit malzemeler almaktadır. Dünya savunma sanayinde balistik plaka üretiminde yapılan birçok Ar-Ge ve Ür-Ge çalışmalarının temel amacı en az ağırlık ve üretim maliyeti ile en iyi balistik dayanımı ile kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin daha çok nasıl geliştirilebileceği üzerine yapılmaktadır. Bu çalışmada Kayma gerilimi altında kalınlaşan sıvıların (STF-shear thickening fluid) ve termoset reçinelerin, balistik plaka üretiminde kullanılan kumaşlar UHMWPE ve KEVLAR' ın darbe dayanımlarını ve özgül enerji emilimlerini nasıl etkilediği araştırılmıştır.

Malzemelerin üretiminde 15 cm çapında dairesel çelik bir kalıp özel olarak imal ettirilmiş ve her bir numune 140 Bar basınç altında tutularak Tam Faktöriyel Deney Tasarımı'na uygun formüle edilmiş planlı standarta göre aynı esaslar ile üretilmiştir. STF ve termoset reçineler ile işlenmiş yüksek performanslı kumaş numunelerinin darbe dayanımlarının ölçümü için ise 9 Eylül Üniversitesi Makine Mühendisliği / İzmir- Kompozit Araştırma ve Test Laboratuvarı' ndaki **Yüksek Enerji Sistemli CEAST-Fractovis Plus 9350 darbe test cihazı** kullanılmıştır. Farklı parametreler ile hazırlanan toplam 22 adet numunenin darbe dayanımları incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kompozit, STF, termoset, Kevlar, UHMWPE, darbe dayanımı, özgül enerji, nanokompozit.



ABSTRACT

BALLISTIC RESISTANCE INVESTIGATION OF SHEAR-THICKENING FLUID AND THERMOSETTING RESINS TREATED HIGH-PERFORMANCE FABRICS

SARIÇALI, Meriç

Master of Science Thesis, Department of Materials Science and Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Bıkem ÖVEZ

August 2022, 101 pages

In today's defense industry, traditional ballistic materials such as steel are replaced by composite materials which are lighter, higher strength, and obtained with new production technologies. The main purpose of many R&D and P&D studies for ballistic plate production in the global defense industry is on how to improve the mechanical properties of composite materials with the lowest weight and production cost obtaining the best ballistic strength. In this study, it was investigated how Shear thickening fluids (STF) and thermoset resins affect the impact strength and specific energy absorption of UHMWPE and KEVLAR fabrics used in the production of ballistic plates.

In the production of the materials, a circular steel mold with a diameter of 15 cm was specially manufactured and each sample was kept under 140 Bar pressure and produced with the same principles according to the planned standard formulated by Full Factorial Experimental Design parameters. To measure the impact resistance e of STF and thermoset resin-treated fabric samples, a High Energy System CEAST-Fractovis Plus 9350 impact test device was used in Dokuz Eylül University Mechanical Engineering / İzmir-Composite Research and Test Laboratory. The impact resistance of 22 samples prepared with different parameters were investigated.

Keywords: Composite, STF, thermoset, Kevlar, UHMWPE, impact resistance, specific energy absorption, nanocomposite.

ÖNSÖZ

Savunma Sanayi teknolojisi, tüm dünya ülkelerinin kullandığı uluslararası politikaya yön veren en güçlü caydırıcı gereçler arasında yer almaktadır. Bu sebeple geçmişten günümüze devletler her yıl savunma sanayilerini geliştirebilmek için bütçelerinden önemli miktarda kaynağı yeni teknolojilerin araştırılması için ayırmaktadırlar. Türk Silahlı Kuvvetlerinde görev yapmış bir subay olarak belirtmek isterim ki, içinde yer aldığımız ve uzun süren görevlerde enerjimizi birebir etkileyen en büyük parametrelerden birinin taşınan teçhizatın ağırlığıdır. Bu sebeptir ki gelişen mühimmatlara karşı personel korumasını sağlayabilecek en hafif ve en dayanıklı sistemler üzerinde Ar-Ge ve Ür-Ge çalışmaları sürekli devam etmektedir. Aynı zamanda bu çalışmalarda balistik koruyucu malzemelerin yüksek maliyetleri de dikkate alınarak toplam maliyetin en aza indirilmesi de amaçlanmaktadır.

Bu çalışmada, balistik plaka üretiminde kullanılan yüksek performanslı kumaşların, daha önce incelenmiş kaynaklarda ulaşılan sonuçlar dikkate alınarak, iki farklı matris olan STF ve Termoset emdirilerek darbe dayanımlarını ne ölçüde arttırılabileceği incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre en iyi performansa sahip olan numune, hiç işlem görmemiş ve aynı esaslar ile üretilen kumaş numuneleri ile kıyaslanarak, özgül enerji emiliminde ve darbe dayanımında ne ölçüde artış sağladığı gözlenmiştir. Elde edilen sonuçlardan, yüksek basınç altında kontrollü ısıtılıp soğutularak üretilen balistik plakaların maliyetini önemli ölçüde düşüreceği, dayanıklılığını arttırılabileceği anlaşılmıştır.

İZMİR

31/08/2022

Meriç SARIÇALI



İÇİNDEKİLER

Sayfa

İÇ KAPAK	i
KABUL VE ONAY SAYFASI.....	iii
ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI	v
ÖZET	vii
ABSTRACT	ix
ÖNSÖZ	xi
İÇİNDEKİLER.....	xiii
ŞEKİLLER DİZİNİ	xv
TABLolar DİZİNİ.....	xviii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xix
1. GİRİŞ	1
1.1 Kompozitin Tanımı ve Kullanım Alanları	1
1.1.1 Kompozitin tanımı	1
1.2 Yüksek Performanslı Kompozitler	5
1.2.1 Polimer matrisli kompozitler	6
1.2.2 Polimer matrisli kompozitlerin özelliklerine etki eden faktörler.....	7
1.2.3 Polimer matrisli kompozitlerin üretim şekilleri.....	9
1.3 Balistik ve Balistik Koruyucu Plakalar	11
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	13
2.1. Yüksek Mukavemetli Lif Takviye Elemanları	13
2.1.1. Balistik koruyucu plaka üretiminde kullanılan elyaf malzemeler	13
2.1.1.1 Cam elyaf.....	14
2.1.1.2 Aramid elyaf	16
2.1.1.3 Yüksek molekül ağırlıklı polietilen (Ultra High Molecular Weight Polyethylene-UHMWPE)	19
2.2 Matris Elemanları	21
2.2.1 Termoset reçineler	23
2.2.2 Termoplastik reçineler.....	25
2.2.3 Kayma gerilimi altında yoğunlaşan sıvılar (Shear Thickening Fluids - STF)	26

İÇİNDEKİLER (Devam)

Sayfa

2.3 STF ve Termoset İşlenmiş Elyaf Çalışmaları	29
2.4 Balistik Koruyucu Plakalarda Darbe Dayanımına Etki Eden Parametreler	38
2.4.1. Hedef malzemenin yapısı ve özellikleri	38
2.4.2 Projektilin fiziksel özellikleri ve hedefte yarattığı etki	40
2.5. Balistik Performans Değerlendirmesi	44
2.5.1 Perforasyon (delinme) testi.....	45
2.5.2 Balistik limit altı (non-perforation) test.....	46
2.5.3 Balistik Limit Testi.....	48
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	49
3.1 Materyal.....	49
3.2 Kompozit Numunelerinin Üretimi	53
3.2.1 Kayma Gerilimi Altında Yoğunlaşan Sıvı (STF) emdirilmiş numunelerin üretimi	53
3.2.2 Termoset reçine emdirilmiş numunelerin üretimi.....	56
3.3 Analiz Metodları	58
3.3.1 Darbe testi.....	58
3.3.2 Darbe testi sonucunda elde edilen Kuvvet – Deformasyon Grafikleri.....	63
3.3.3 Darbe Test Sonucu oluşan Kuvvet – Deformasyon Grafikleri	64
4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	76
KAYNAKLAR.....	87
TEŞEKKÜR	100
ÖZGEÇMİŞ.....	101

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil

Sayfa

1.1. Boeing 787 Dreamliner Uçağı Bileşenleri	2
1.2. Kompozit Otomotiv Parçaları.....	3
1.3. Altyapıda Kullanılan Kompozit Malzemeler	3
1.4. Personel Koruyucu Balistik Plaka	4
1.5. Yat İmalatında Kompozit Malzeme	4
1.6. Dış Dolgularında Kullanılan Kompozit Malzeme	5
1.7. Takviye Malzemesi ve Matris	7
2.1. Aramid liflerin üretiminde kullanılan Kuru Jet-Yaş Lif Çekim yöntemi.....	17
2.2. Değişik formlarda işlenmiş Aramid Lifler.	18
2.3. Yüksek Moleküler Ağırlıklı Polietilen (HMWPE) lifler ile üretilen balistik yelek	20
2.4. Stres altında STF' nin oluşturduğu zincir yapılar.....	28
2.5. Stres altında STF'nin oluşturduğu hidrokümeler	28
2.6. Quastatik Needle Puncture testinde kullanılan hipodermik iğneler.....	30
2.7. Düz ve STF işlenmiş kumaşların absorbe ettiği balistik enerji grafiği	31
2.8. STF işlenmiş HMPP ile düz HMPP kumaşların balistik test sonrası delinme görüntüleri a) İşlenmemiş HMPP ön kat, b) İşlenmemiş HMPP arka kat, c) STF-HMPP ön kat, d) STF-HMPP arka kat.....	35
2.9. STF işlenmiş Twaron ile işlenmemiş kumaşların balistik test sonrası delinme görüntüleri a) İşlenmemiş Twaron ön ve arka katman görüntüsü, b) STF-Twaron ön ve arka katman görüntüsü.....	35
2.10. 9 mm mermi ile balistik test atışı yapılan numunelerin travma derinlikleri.	36
2.11. Darbe sonrası tek bir lifte gerçekleşen etki	39
2.12. Balistik testlerde kullanılan farklı mermi ucu geometrileri.....	41
2.13. Kompozit yapıda balistik darbenin oluşturduğu hasar şekilleri	44
2.14. Balistik test düzeneğinin şematik gösterimi	45
2.15. Darbe sonrası destek malzemesi üzerinde oluşan travmayı ölçme metodu .	47
3.1. Deneylerde kullanılan yüksek performanslı kumaşlar a) Kevlar, b) UHMWPE.....	50
3.2. STF üretiminde kullanılacak malzemeler a) Aerosil 200, b) PEG-200, c) PEG-400.....	51
3.3. Termoset üretiminde kullanılan polyeşter polioller.....	52
3.4. Numune üretiminde kullanılan kalıp.....	52
3.5. STF işlenmiş Balistik Plaka Üretim Akış Şeması.	53
3.6. STF çözeltisinin kap içerisinde mekanik karıştırıcı ile karıştırılması.	54
3.7. STF çözeltisinin 2 L kap içerisinde homojenize edilmesi.....	55

ŞEKİLLER DİZİNİ (Devam)

3.8. STF işlenmiş kumaşların kurutulması işlemi a) UHMWPE, b) KEVLAR. ...	55
3.9. STF işlenmiş kumaşların Presleme işlemi ve üretilen numune örneği a) Kurutulan kumaşların kalıp içine yerleştirilmesi, b) Presleme işlemi, c) Basınç göstergesi, d) Dairesel kalıpta üretilen numuneler	56
3.10. STF işlenmiş Balistik Plaka Üretim Akış Şeması.	57
3.11. Termoset işlenmiş kumaşların preslenmesi a) Fazla termoset reçinenin kalıptan dışarı atılması, b) Termosetli numunenin kalıptan çıkarılışı.	58
3.12. Darbe Testi için hazırlanmış STF'li numuneler.	61
3.13. Darbe Testi için hazırlanmış Termosetli numuneler.	61
3.14. Darbe Testi için hazırlanmış işlem görmemiş numuneler.	62
3.15. CEAST-Fractovis Plus darbe test cihazı.	62
3.16. Darbe Ucu a) Çapı, b) Boyu, c) Pneumatic Kısaç ve Numuneye Temas Anı.	63
3.17. STF-1 Numunesinin Kuvvet – Deformasyon Grafiği.	64
3.18. STF-2 Numunesinin Kuvvet – Deformasyon Grafiği.	65
3.19. STF-3 Numunesinin Kuvvet – Deformasyon Grafiği.	65
3.20. STF-4 Numunesinin Kuvvet – Deformasyon Grafiği.	66
3.21. STF-5 Numunesinin Kuvvet – Deformasyon Grafiği.	66
3.22. STF-6 Numunesinin Kuvvet – Deformasyon Grafiği.	67
3.23. STF-7 Numunesinin Kuvvet – Deformasyon Grafiği.	67
3.24. STF-8 Numunesinin Kuvvet – Deformasyon Grafiği.	68
3.25. STF-9 Numunesinin Kuvvet – Deformasyon Grafiği.	68
3.26. STF-10 Numunesinin Kuvvet – Deformasyon Grafiği.	69
3.27. STF-11 Numunesinin Kuvvet – Deformasyon Grafiği.	69
3.28. STF-12 Numunesinin Kuvvet – Deformasyon Grafiği.	70
3.29. TS-1 Numunesinin Kuvvet – Deformasyon Grafiği.	70
3.30. TS-2 Numunesinin Kuvvet – Deformasyon Grafiği.	71
3.31. TS-3 Numunesinin Kuvvet – Deformasyon Grafiği.	71
3.32. TS-4 Numunesinin Kuvvet – Deformasyon Grafiği.	72
3.33. TS-5 Numunesinin Kuvvet – Deformasyon Grafiği.	72
3.34. TS-6 Numunesinin Kuvvet – Deformasyon Grafiği.	73
3.35. TS-7 Numunesinin Kuvvet – Deformasyon Grafiği.	73
3.36. TS-8 Numunesinin Kuvvet – Deformasyon Grafiği.	74
3.37. UHMWPE Numunesinin Kuvvet – Deformasyon Grafiği.	74
3.38. KEVLAR Numunesinin Kuvvet – Deformasyon Grafiği.	75
4.1. PEG-200 ve PEG-400 İle Oluşturulan STF' lerin Özgül Enerji Emilimi Üzerindeki Etkileşimi.	79
4. 2. PEG-200 ve PEG-400 İle Oluşturulan STF' lerin Darbe Dayanımı Üzerindeki Etkileşimi.	80
4.3. Termoset Reçinelerin Özgül Enerji Emilimi Üzerindeki Etkileşimi	81
4.4 Termoset Reçinelerin Darbe Dayanımı Üzerindeki Etkileşimi	81

4.5. UHMWPE -KEVLAR Numunelerinin Özgöl Enerji Emilimi (SEA) -Kuvvet Grafiği.	82
4.6. STF İşlenmiş Numunelerinin Özgöl Enerji Emilimi (SEA) -Kuvvet Grafiği.	83
4.7. UHMWPE / STF-3 Numunelerinin Kuvvet – Deformasyon Grafiği.	83
4.8. KEVLAR / STF-12 Numunelerinin Kuvvet – Deformasyon Grafiği.	84
4.9. Termoset İşlenmiş Numunelerinin Özgöl Enerji Emilimi (SEA) -Kuvvet Grafiği.	85
4.10. UHMWPE / TS-8 Numunelerinin Kuvvet – Deformasyon Grafiği.	85
4.11. KEVLAR / TS-2 Numunelerinin Kuvvet – Deformasyon Grafiği.	86



TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo

Sayfa

2.1. Cam elyafın avantaj ve dezavantajları.....	15
2.2. Endüstride kullanım amaçlarına göre üretilen cam elyafın mekanik ve fiziksel özellikleri.....	15
2.3. Piyasada üretilen Para-aramid elyafın mekanik özellikleri	18
2.4. Piyasada üretilen Yüksek Molekül Ağırlıklı Polietilen elyafın mekanik özellikleri.....	19
2.5. Yüksek molekül ağırlıklı elyafın avantaj ve dezavantajları	20
2.6. Matris malzemesi çeşitleri ve uygulama alanları	21
2.7. Termoset reçinelerin avantajları ve dezavantajları	24
2.8. Termoset ve termoplastik reçinelerin özellikleri	26
2.9. Epoksi işlenmiş Kevlar ve Cam elyaf kumaşlardan oluşturulan numunelerin özellikleri ve absorbe edilen balistik enerji.....	32
2.10. STF işlenmiş Kevlar Kompozitlerin Farklı Deneysel Sonuçları	37
2.11. Mermi ve hedef yönünden balistik performans parametreleri.....	38
2.12. NIJ-STD-0101.06 standartında belirtilen balistik koruyucular için koruma seviyeleri	47
3.1. Darbe Testi için hazırlanacak STF işlenmiş numunelerin Experimental Design tablosu	59
3.2. Darbe Testi için hazırlanacak Termoset işlenmiş numunelerin Experimental Design tablosu	59
4.1. Numunelerin Darbe Test Sonuçları.....	78

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
L	Litre
ml	Mililitre (1×10^{-3} Litre)
g	gram
mg	Miligram (1×10^{-3} gram)
cm	Santimetre (1×10^{-2} metre)
mm	Milimetre (1×10^{-3} metre)
μm	Mikrometre (1×10^{-6} metre)
nm	Nanometre (1×10^{-9} metre)
m^2	Alan
cm^3	Hacim (1×10^{-6} metreküp)
g/mol	Atom ağırlığı birimi, bir gram molün gram ağırlığı
$^{\circ}\text{C}$	Sıcaklık birimi, Celcius,
V	Velocity (Hız)
Cal/ $^{\circ}\text{C} \cdot \text{g}$	Özgöl ısı birimi
kg/cm	Çarpma Direnci birimi
g/cm^3	Öz kütle

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (Devam)

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
g/ m ²	Alan yoğunluğu
J/g	Özgül Enerji Emilimi birimi
kJ	Enerji, kilo Joule (1x10 ³ Joule)
kW	Güç, kilovat (1x10 ³ Watt)
kcal	Enerji, kilokalori (1x10 ³ kalori)
L/dak	Debi, dakikada geçen litre
m/s	Hız Birimi (Saniye başına kat edilen metre)
MHz	Frekans, megahertz (1x10 ⁶ Hertz)
ms	Süre, milisaniye (1x10 ⁻³ saniye)
w/w	Ağırlıkça yüzde derişim
wt	Weight
ASTM	American Society for Testing and Materials
BF	Boron Fiber (Bor Elyafı)
CaCO ₃	Kalsiyum Karbonat
CF	Carbon Fiber (Karbon Elyafı)

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (Devam)

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
DAS	Veri Toplama Sistemi (Data Acquisition System)
FMJ	Tam Metal Kaplamalı Kovan (Full metal jacket)
GF	Glass Fiber – (Cam Elyafı),
GPA	Giga Pascal
HDPP	Yüksek yoğunluklu polipropilen
HPPE	Yüksek performanslı polietilen
IBC	Intermediate Bulk Container
MDI	Metilen Difenil Diizosiyanat
MPA	Mega Pascal
NF	Natural Fiber (Doğal Elyaf)
NIJ	National Institute of Justice
PBO	Poli-p-fenilenbenzobisoksazol
PEG	Polietilen Glikol
PMDI	Polimerik Metilen Difenil Diizosiyanat
PMK	Polimer Matrisli Kompozitler
PMK	Polimer Matrisli Kompozitler PP Polipropilen

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (Devam)

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
QS	Quasi-static
RPM	Revolutions (Rounds) per minute
SEA	Specific Energy Absorption
SiC	Silisyum Karbür
SiO ₂	Silika, Silisyum Dioksit
STF	Shear Thickening Fluid
TS	Termoset
UHMWPE	Ultra High Molecular Weight Polyethylene (Yüksek molekül ağırlıklı polietilen)

1. GİRİŞ

1.1 Kompozitin Tanımı ve Kullanım Alanları

1.1.1 Kompozitin tanımı

Malzemeler her zaman insanlığa bir armağandır, ancak bir malzemenin yeni bir teknolojiyi doğurup doğurmadığı konusu hala bir çelişki olmaya devam etmektedir. Farklı özelliklerinin kombinasyonu ile yeni malzeme üretmenin bir yolu da bilindiği üzere malzemenin kompozit malzemeler olarak adlandırılan katı halde birleştirilmesidir. (Kumar ve Davim, 2018)

Tanım olarak kompozit; “dizayn amacına uygun olarak (ısı, mekanik, fiziksel, vb.) istenilen bir veya birden fazla özelliği içeren bileşenlerin bir araya makro düzeyde getirilmesi ile oluşturulan, istenen özellikleri baskın, istenmeyen özelliklerin yok edilmesini sağlayan malzemelere” verilen genel addır. Kompozit malzemeler mikroskopik açıdan heterojen bir malzeme özelliği göstermekte, ancak makroskopik açıdan homojen bir malzeme gibi davranmaktadır (Soy, 2009).

Kompozit malzemeler, farklı fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip katı halde bir veya daha fazla malzemedan oluşan gelişmiş malzeme sınıfıdır. Ağırlıkları daha hafiftir ve mekanik özellikleri yüksektir. Günümüzde kompozitler, uzay aracından ve uçaktan binalara ve köprülere kadar çeşitli yapılarda kullanılmaktadır. Kompozitlerin bu geniş kullanımı, yeni malzemelerin tanıtılması, üretim süreçlerindeki iyileştirmeler ve yeni analitik ve test yöntemlerinin geliştirilmesi ile kolaylaştırılmıştır.

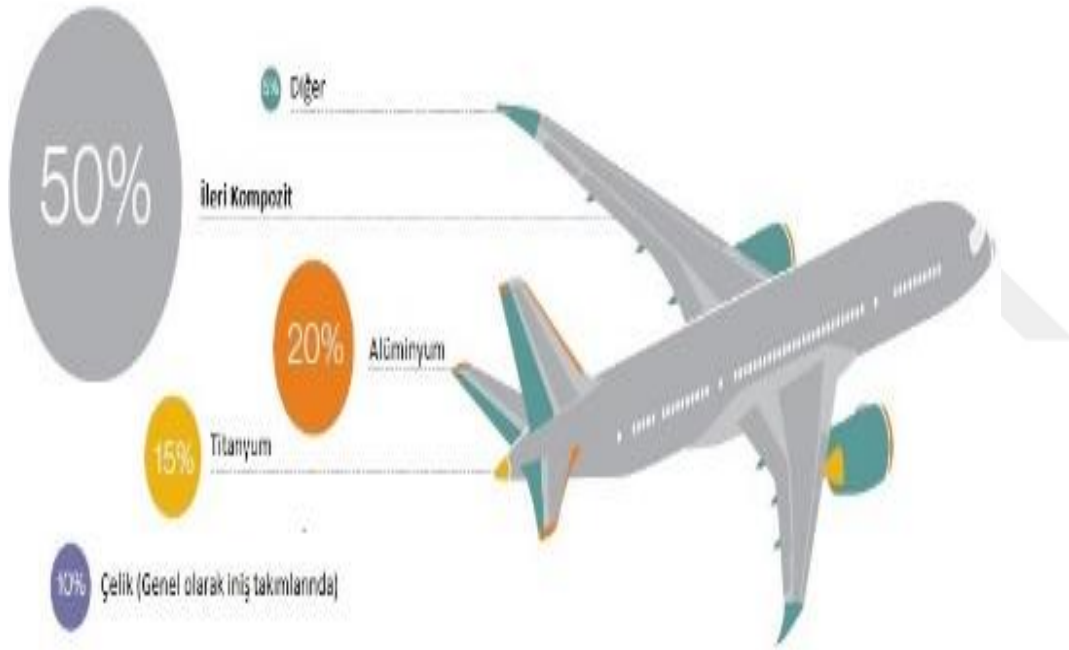
1.1.2 Kompozitlerin kullanım alanları

Kompozitlerin endüstriyel uygulamaları çok yönlüdür ve neredeyse tüm endüstrilerde görülebilir. Birkaç örnek aşağıdaki gibidir;

Korozyona Dirençli Ekipmanlar (Tanklar, kanallar ve davlumbazlar, pompalar, fanlar, ızgaralar, kimyasal işleme, kağıt hamuru ve kağıt, petrol ve gaz ve su / atık su arıtma pazarları gibi kimyasallara dayanıklı servis ürünleri.)

Elektrik (Bu pazar alanında, kutup hattı donanımı, trafo merkezi ekipmanları, mikrodalga antenleri, baskılı kablo panoları vb. elektrikli ve elektronik uygulamalar için bileşenler bulunmaktadır.)

Hava araçları/Askeri (Havacılık ve ilgili uygulamalar için bileşenler de dahil olmak üzere ticari ve askeri uçaklar)



Şekil 1.1. Boeing 787 Dreamliner Uçağı Bileşenleri (Hale, J., 2014).

Otomotiv/Ulaştırma (Pazarlar içinde en büyük olanıdır; otomobil, kamyon, demiryolu ve çiftlik uygulamaları için parçalar gibi büyük bir ürün portföyünü içerir.)

Kabin içi parçalar	Ön panel (dashboard)	
Fonksiyonel parçalar	Yakıt ve su deposu	
Dış gövde parçaları	Kapı panelleri, tamponlar	
Yarı-yapısal parçalar	Front end, koltuk çerçevesi, taban	
Yapısal Parçalar	Şasi, kokpit	

Şekil 1.2. Kompozit Otomotiv Parçaları (Composites Turkey, 2014).

Altyapı (Kompozitler için nispeten yeni bir pazar olan bu uygulamalar, binalar, yollar, köprüler, kazık vb. dahil olmak üzere sivil altyapının onarımı ve değiştirilmesini içerir)



Şekil 1.3. Altyapıda Kullanılan Kompozit Malzemeler (Kalender, 2018).

İnşaat (Evlerin, ofislerin ve mimari bileşenlerin inşası için malzemeleri içerir. Ürünler arasında yüzme havuzları, banyo armatürleri, duvar panelleri, çatı kaplama, mimari kaplama vb. yer alır.)

Genel Tüketim (Ürünler; golf ekipmanları, tenis raketleri, kar motosikletleri, kamp malzemeleri, mobilya, mikrodalga pişirme kapları gibi spor ve eğlence ekipmanlarını içerir.)

Savunma Sanayi (Askeri bina, araç ve personel korumasında kullanılan ürünler)



Şekil 1.4. Personel Koruyucu Balistik Plaka (Kalender, 2018).

Denizcilik (Ticari, eğlence ve deniz botları ve gemileri için vb. ürünler)
(Kumar ve Davim, 2018)



Şekil 1.5. Yat İmalatında Kompozit Malzeme (Kalender, 2018)

Sağlık Sektörü (Diş dolgusu ve implantları ile ortopedik protezlerde yaygın olarak kullanılır.



Şekil 1.6. Diş Dolgularında Kullanılan Kompozit Malzeme (Kalender, 2018)

1.2 Yüksek Performanslı Kompozitler

Yüksek Performanslı Kompozitler matris fazı ve dağılık fazdan oluşur. Matris fazı sürekli karaktere sahiptir ve birincil fazdır. Matris fazı dağılmış fazı tutmaya yarar ve yükü onunla paylaşır. Öte yandan, dağılmış faz ortamda süreksizdir ve matrise gömülüdür. Dağılmış faz takviye olarak bilinir ve ikincil fazdır. Dağılmış faz tipik olarak matris fazından daha yüksek mukavemete sahiptir. En bilinen örnekler arasında yapı sanayinde kullanılan betonarme yapılar yer alır. Betonarme yapı, çeliğin dağılma fazı ve betonun matris olduğu kompozit malzemenin başlıca örneğidir.

Hafifliği, yüksek mukavemeti, yüksek sertliği, mükemmel yorulma direnci ve korozyon direnci ile Gelişmiş Kompozit Malzemeler (GKM) birçok mühendislik alanında yaygın olarak uygulanmaktadır. Bu kompozitler: demir, çelik vb. metalleri içeren Metal Matrisli Kompozitler (MMK), silisyum karbür, bor karbür ve alüminyum oksit vb. gibi yüksek sertliğe sahip seramik malzemelerden oluşan Seramik Matrisli Kompozitler (SMK) ve epoksi, polyester, vinilester reçine vb. gibi reçinelerin kullanımı ile üretilen Polimer Matris Kompozitler (PMK) olmak üzere üç ana gruptan oluşmaktadırlar. Bunlar arasında PMK, daha yüksek özgül mukavemeti ve modüle sahip olması ile birlikte düşük hammadde ve üretim maliyeti sayesinde daha hızlı gelişen, geniş kullanım alanına sahip önemli bir kompozit sınıfı haline gelmiştir. Şu anda PMK, havacılık, elektrikli ev aletleri, otomobiller, savunma sanayi, doğa sporları ve diğer alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Gu, Y. and Ran, Q., 2011)

Teknolojinin gelişmesi ile birlikte kökleri endüstriyel uygulamalara yayılan daha gelişmiş kompozitler icat edildi. Bu gelişmiş kompozitler, grafit/epoksi, Kevlar/epoksi ve bor/epoksi kompozitler gibi polimerik matriste ve daha yüksek performanslı bir donatıya sahip kompozitlerdir. Ayrıca, yapısal ihtiyaçlar, şekillendirilebilirlik, boyutsal kararlılık, termal ve akustik karakteristik vb. istenen mekanik özellikleri elde etme esnekliği; taşımacılık, endüstri, spor ve eğlence gibi çok çeşitli endüstriyel uygulamalar için polimerik kompozitlerin geliştirilmesini gerekli kılmıştır. (Kumar and Davim, 2018)

Örneğin, Yapı endüstrisi, epoksi, polyester, vinilester reçinelerinin matrislerinde cam, aramid elyaf gibi elyaf takviyeli polimerik kompozitlerin kullanımını göz önünde bulundurmaktadır. (Bunshell and Renard, 2005) Ek olarak Bazalt elyaf, inşaat endüstrileri tarafından yüksek sıcaklık koşullarına uygun olarak kullanımı düşünülmüş ve uygulanmıştır. (Şerbescu et al., 2006) Bunlara benzer kompozitlerin kullanımı, gelişmiş yük taşıma yetenekleri ile farklı bina yapılarının üretilmesini ve montajını kolaylaştırmıştır. (Taranu, 2009)

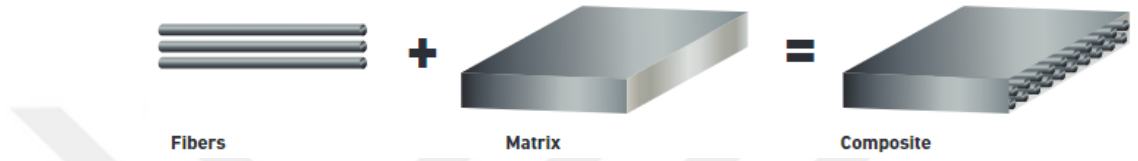
Benzer şekilde otomotiv endüstrisinde, geleneksel olarak kullanılan metallerin yerini, sadece bir trend değil aynı zamanda bir zorunluluk haline gelen polimerik kompozitler almıştır. Bu durumun en büyük sebebi, dünyadaki farklı düzenleyici kurumların veya devletlerin artan yasal kısıtlamaları olarak gösterilebilir.

Polimerik kompozitlerin kullanılması, farklı araç sınıflarının yakıt ekonomisini gözle görülür düzeyde artırmıştır. Böylece polimerik kompozitler (PMC) teknolojinin ve firmaların AR-GE tecrübeleri geliştikçe çok çeşitli endüstrilerin ayrılmaz bir parçası haline gelmiştir. Bu nedenle sanayideki uygulamaları sistematik olarak araştırılmaya devam etmektedir.

1.2.1 Polimer matrisli kompozitler

Polimer Matrisli Kompozitlerde (PMK) tipik olarak reçine çözeltisi olan bir matris malzemesi kullanır. Bu matris malzemeleri içinde Polyester, epoksi, vinil ester, poliamid, polipropilen vb. gibi çok çeşitli polimerik malzemeler mevcuttur.

Genel olarak, elyaf takviye malzemesi olarak kullanılır, ancak bazı durumlarda bu elyaf plaka halinde değil–tampon üretiminde cam elyafın belirli boyutlarda kesilerek reçine ile işlenmesi gibi–öğütülmüş olarak ta kullanılabilirler. (Mkaddem et al., 2008) Nihai malzemenin mukavemeti, iki birleşimin, yani matris ve takviye oranına bağlıdır. Farklı üretim tekniği farklı oranlara yol açar. Örneğin, elle yatırma tekniği ile %60 reçine ve %40 elyaf içeren PMK üretilirken, vakum infüzyon işlemi kullanılarak yapılan üretimin bileşimi %40 reçine ve %60 elyaftır. (Kumar and Davim, 2018)



Şekil 1.7. Takviye Malzemesi ve Matris (Dorworth et al., 2019).

Elyaf Polimer yapılarla takviyesi sonucu ortaya çıkan kompozitler; yüksek sertlik ve mukavemet, kırılmaya karşı direnç, düşük maliyet, iyi darbe, aşınma, yorgunluk ve korozyon direnci gibi özelliklere sahip olurlar. Bu iyi özelliklere karşılık dezavantajları ise bazılarında düşük termal direnç, yüksek termal genleşme katsayısı ve UV ışınlarına karşı düşük dayanım olarak karşımıza çıkmaktadır.

1.2.2 Polimer matrisli kompozitlerin özelliklerine etki eden faktörler

Matris özellikleri: PMK' nin uygulanması, imalat için kullanılan polimer tipine göre belirlenir. Polimerik matrisin sahip olduğu düşük maliyet, düşük özgül ağırlık ve yüksek kimyasal direnç gibi bazı avantajların yanı sıra düşük mukavemet ve düşük çalışma sıcaklığı gibi dezavantajlara da sahiptir (Huang ve Talreja, 2006). Termoplastik polimerler, elastomerler ve termoset polimerler gibi PMK'lerin üretimi için çok çeşitli polimerik malzemeler kullanılabilir.

Termoset polimerler: Yapıyı oluşturan parçacıkların molekülleri arasında kovalent bağlara sahip bir polimerik malzemedir. Bu nedenle termoset polimerleri bir çeşit ağ yapısına sahiptir. Isıtma ile kesinlikle yumuşamazlar ancak bazılarında ayrışma gözlemlenebilir. Çapraz bağlama işlemi ile katılaştırıldıktan sonra yeniden şekillendirilemezler. Isıyla sertleşen polimerlere örnek olarak epoksi, fenolik,

polyesterler reçineler ile melamin, poliamidler ve silikon verilebilmektedir. (Saw, S. K.,ve Datta, C., 2009)

Termoplastik polimerler: Termoplastik polimerler çok güçlü molekül içi bağ yapılarından meydana gelmelerine rağmen daha zayıf moleküller arası bağlara sahiptirler. Termoplastik polimerler ısı ve basınç altında yeniden şekillendirilebilir. Bu polimerlere örnekleri polietilen, polistiren, polikarbonatlar, poliamit, polisülfon, polieter amid vb. yapılarıdır. (Ning, H ve ark., 2007)

Elastomerler: Elastomerler, diğer malzemelere kıyasla daha yüksek veriminin yanında nispeten daha düşük elastiklik modülüne sahip olan viskoelastik polimerik malzemelerdir. Elastomerlerin bazı örnekleri doğal kauçuk, bütül kauçuk, sentetik poliizopren, silikon kauçuk, termoplastik elastomerler, fluroelastomerlerdir. (Wu, X ve ark., 2017)

Dağılmış faz-şekil ve konum: Parçacıklar için mekanik özellikleri arttıran ve malzemenin maliyetini düşüren tercih edilmiş bir konumlandırma yoktur. Dispersiyon fazı olarak kullanılan parçacıklar, küresel, trombosit, kübik veya başka bir düzensiz veya düzenli geometrik şekil gibi çok çeşitli şekillere sahip olabilir. Takviye olarak kullanılan parçacıklar tipik olarak tüm yönlerde aynı boyutlara sahiptir. (Bednarczyk, 2003)

Kayma gerilimi altında kalınlaşan sıvılar (Shear Thickening Fluid-STF): Polimer matrisli kompozitlerin oluşumuna, literatürde Shear Thickening Fluid (STF) olarak adlandırılan Kayma Gerilimi Altında Kalınlaşan Sıvıların da büyük ölçüde katkısı bulunmaktadır. STF, uygulanan stres ile viskozitede bir artış olarak gözlenen Newton kurallarının tersine bir davranış sergileyen akışkandır. Sıvı bir ortamda dağılmış katı parçacıklardan oluşan konsantre koloidal süspansiyonların, kayma gerilimi altında kalınlaşma sergilediği ve bunun sonucunda da kritik bir kesme hızının üzerinde viskozitede büyük, bazen süreksiz artışlar gösterdiği gözlenmiştir. Akan bir sıvıdan katı benzeri bir malzemeye bu geçiş, kayma geriliminin tetiklediği geçici bütünleşme veya sıvının viskozitesini önemli ölçüde artıran "hidrokümelerin" oluşumundan kaynaklanır. (Maranzano ve Wagner, 2001)

Ara yüzey yapışma: Kompozit malzemenin davranışı, takviyenin kümülatif davranışı ile birlikte polimerik matris ve takviye ile parçacık arasındaki arayüzey yapışmasına da bağlıdır. Ara yüzey yapışması, üstün mekanik özellikler elde etmek

için yeterli seviyede güçlü olmalıdır. Matris moleküllerinin lifle arayüzey yapışmasının derecesi, lif yüzeyinde meydana gelen kimyasal reaksiyon veya adsorpsiyon (yüzeyde tutunum) ile belirlenir. Ara yüzeyin araştırılması, atomik kuvvet mikroskopisi gibi teknikler kullanılarak yapılabilir. (Kumar and Davim, 2018)

1.2.3 Polimer matrisli kompozitlerin üretim şekilleri

Bu bölümde PMK' lerin elde edilmesi için kullanılan bazı önemli üretim süreçleri ele alınmıştır;

Elle Yatırma Yöntemi: Bu teknik, küçük ve büyük takviyeli ürünlerin üretimi için bilinen en eski ve en basit yöntemlerden biridir. Elle yatırma tekniği, düz yüzeylerde, boşluk içine veya metal, ahşap, plastik ya da bunların kombinasyonlarından yapılmış kalıplarda kullanılabilir. Elle yatırma yöntemini kullanmak için bir elle kılavuzlama, iki elle kılavuzlama, manuel katlama, kasnak kesme, çift gerilimli kesme, gerilmeye dayanıklı kesme, gerilim ve yapıştırma ve kalıp etkileşimi kesme gibi farklı teknikler vardır.

Torba Kalıplama İşlemi: Kompozit parçaların imal edilmesi için çok yönlü bir işlemdir. Kalıp, reçine ile işlenen sıralı tabakalar halinde yerleştirilir. Tabaka ve reçineden oluşan tüm kalıp diyafram veya bir torba ile kaplıdır. Daha sonra ısı ve basınç uygulanarak sürece devam edilir. Kalıp şeklindeki son ürün, gerekli sertleştirme döngüsü elde edildikten sonra son halini almış olur. (Tay ve ark., 2006)

Profil Çekme (Pultruzyon): Kompozit malzemeler otomatik olarak sabit ve sürekli profiller halinde üretilir. Nihai ürün, ürünü zorlamak için basınç kullanmak yerine kalıptan çekilir. Çubuklar, borular ve benzeri diğer profiller gibi çok çeşitli yapısal şekiller üretmek için uygun kalıplar kullanılır.

Filament Sarımı: Tüpler, borular, küre ve silindirler gibi döngüsel katı haldeki yapılar, filaman sargısı tekniği kullanılarak imal edilebilir. Filament sarım tekniği özellikle kimya endüstrisi için büyük tanklar ve borular üretmek için kullanılır. Filaman sargı tekniğinin temeli, takviyelerin önceden tanımlanmış desende yüksek hızda bırakılmasıdır.

Önceden Oluşturulmuş Kalıp Bileşikleri: Kalıp döküm işlemi ile uyumlu, enjeksiyon kalıplama, transfer kalıplama ve sıkıştırma kalıplama gibi yöntemler, güçlendirilmiş ısıyla sertleşen reçine ürünlerinin imalatı için kullanılabilir. Uyumlu kalıp işleminde, bileşenler ön-karışımına, yani önceden oluşturulmuş kalıplama bileşiğine eklenmektedir. Bu teknik kullanılarak daha hızlı üretim oranları elde edilebilir. (Friedrich ve ark., 2005)

Reçine Transferiyle Kalıplama: Bu işlem ile yüksek performanslı büyük ve entegre ürünler üretilir. İşlem esnasında, istenilen şekilde kesilmiş kuru takviye malzemesi olan bir ön kalıp, kalıp boşluğunun içine yerleştirilir. İçeri giren havaya dikkat etmek için, reçine en alt noktaya enjekte edilir ve kalıp yukarı doğru doldurulur. Reçine kaybını en aza indirmek için, tüpün kenetlenmesi, reçinenin reçine tuzağına sızmasıyla yapılır. Reçine, kalıbın havalandırma alanlarından akmaya başladığında reçine akışı durdurulur. Daha sonra kalıp bileşeninin sertleştirme işlemi başlar. Yeterli uygulama sonunda bileşik istenen seviyede mukavemet kazanır ve daha sonra sertleştirme sonrası işlem için çıkarılabilir.

Enjeksiyon ile Kalıplama: Enjeksiyon kalıplama yöntemi hem termoset hem de termoplastik malzemeler için kullanılır. Kompozit, istenen sıcaklığa ulaştığında ısıtılan bir hazneye doldurulur. Daha sonra karıştırma takip edilir ve kalıba aktarılır. Soğutma sırasında sertleşme gerçekleşir ve nihai ürün kalıbın şeklini alır. Enjeksiyon kalıplama, çok çeşitli ürünlerin üretimi için kullanılır ve yüksek üretim oranları, düşük işçilik maliyeti, zaman tasarrufu ve en aza indirilmiş sarfiyat gibi birçok avantaja sahiptir. Bununla birlikte, pahalı ekipman ve yüksek işletme maliyetleri, sürecin en büyük dezavantajlarıdır. (Kowalski ve ark., 1999)

Reaksiyon Enjeksiyon Kalıplama: Bu işlem, termoset polimerleri için kullanılır ve enjeksiyon kalıplama işlemine benzer. İlk başta iki parça polimer birlikte karıştırılır. Daha sonra karıştırıcı kullanılarak karışım yüksek basınç altında kalıba enjekte edilir. Reaksiyon enjeksiyon kalıplama işlemi, çamurluklar, spoylerler ve tamponlar gibi çeşitli otomotiv bileşenlerinin üretimi için kullanılmaktadır.

Takviyeli Reaksiyon Enjeksiyon Kalıplama: İşlemden reaksiyon enjeksiyon kalıplama için kullanılan karışıma ilave edilen bir takviye malzemesi kullanır. Takviye örnekleri arasında en yaygın olarak elyaf bulunmaktadır. Bu işlemle sert otomotiv panelleri kullanılır. Liflerin takviye edici maddeler olarak kullanılması durumunda, kalıba bir lif ağ yerleştirilir ve daha sonra kalıba polimer karışımı enjekte edilir.

Püskürtme: Sıvı reçine matrisi ve takviye lifleri için sırayla iki farklı sprej kullanılır. Elyaf 25-50 mm uzunluğunda kesilir ve daha sonra elyaf için kullanılacak sprej ile reçine spreji eşzamanlı olarak püskürtülür. Yöntemin ana avantajları, düşük maliyetli, daha az ucuz araç-gereç ve uzun yıllar yaygın olarak kullanılabilmesidir. Ana dezavantajları ise laminatlar reçine içeriği bakımından çok zengin olma eğilimindedir ve reçine düşük viskoziteli olmalıdır.

1.3 Balistik ve Balistik Koruyucu Plakalar

Fransızca “balistique” sözcüğünden gelen “balistik” kelimesi, bir merminin silahtan (namludan) çıkarak hedefe ulaşması, atışın yapıldığı ortamdaki değişkenlere bağlı olarak değişen hareketlerini, hedefe çarptıktan sonraki enerjinin soğurulması ve oluşan bozulma/deformasyon davranışlarını inceleyen bilim dalıdır.

Balistik bilimi, iç balistik, dış balistik ve hedef balistiği olmak üzere üç gruba ayrılır. İç ve dış balistikte merminin namlu ve havadaki hareketleri, hedef balistiğinde ise tanımda belirtildiği gibi hedefe çarpan mermi ve hedefte oluşan deformasyonlar incelenir. Bütün bu tanımlamalardan sonra zırh (koruyucu) tasarımı, karakteristiği ve deformasyon alanlarının araştırılması hedef balistiğinin konusudur. Genel tanımı ile balistik koruyucu plakalar; farklı ebatlardaki ve hızlardaki projektıl ve şarapnel parçalarından araç, teçhizat ve insanları korumaya yönelik üretilen askeri donanımlardır. Balistik koruyucu plakalar kullanım alanlarına göre üçe ayrılırlar (Candan, 2005)

- Kişisel Zırhlar (kurşun geçirmez yelekler, koruyucu başlıklar)
- Hafif Zırhlar (helikopter ve savaş uçaklarında kullanılan zırhlar)
- Ağır Zırhlardır (tanklarda kullanılan zırhlar).

Askeri araçlar, taktiksel olarak yer değiştirme gereksinimi duydukları için, birçok kompozit olmayan balistik panel (çelik gibi) nispeten ağır olmaları sebebi ile tercih edilmemektedir. Hafif ve etkili zırh üretim araştırmaları, seramik, yüksek mukavemetli kumaş, köpük ve metal gibi materyallerin çoklu tabakalar halinde kombinasyonları ile kullanımını ortaya çıkarmıştır (Kılıç, 2014). Yüksek mukavemetli kumaşlar, enerji soğurma, ısı iletkenliği, sert cisimlerde çatlak büyümesi (yayılması) gibi özellikleri ile balistik alanında da yaygın olarak kullanılmaya başlamıştır (Cavallaro, 2011).

Balistik alanında kullanılan kumaşları oluşturan liflerin tek başına bu potansiyeli sağlaması düşünülemez. Ancak liflerin iplikleri, ipliklerin kumaşı oluşturmasıyla yüksek performanslar elde edilmektedir (Powell and Zohdi 2009)

Balistik panel ve koruyucu plakaların enerji emilimini etkileyen en önemli faktörler malzeme cinsi, kumaş yapısı (dokuma, örgü vb.) ve sıklığı, mermi geometrisi, mermi hızı ve kullanılan katmanlarının sayısıdır. Bu materyallerin kişisel koruma için kullanılması ise bu materyallerin ve bileşenlerinin mekanik tepkilerinin anlaşılmasına yönelik daha ileri bilimsel yaklaşımları gerektirmektedir. Bunun için darbe etkisinin oluşturduğu deformasyon ve balistik dayanıma etki eden faktörler doğruluğu teyit edilmeli, balistik panel, zırhlı araç veya kişisel koruyucu zırh gibi farklı kullanım yerlerine uygun materyal seçimi yapılmalıdır.

Bu materyallerin seçilmesinden sonra ise karşı konulması istenen tehdide göre yukarıda bahsedilen üretim yöntemlerinden en uygunu seçilerek üretim yapılmalıdır.

Bu çalışmada ise yüksek performanslı, KEVLAR ve Yüksek Molekül Ağırlıklı Polietilen (UHMWPE) kumaşların takviye malzemesi olarak, termoset reçinelerin ve değişik derişiklerdeki STF karışımlarının ise matris olarak kullanıldığı polimer matrisli kompozit plakaların balistik özellikleri incelenecektir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1. Yüksek Mukavemetli Lif Takviye Elemanları

Kompozitlerin üretiminde kullanılan takviye malzemeleri arasında esas olarak Cam Elyafı (Glass Fiber - GF), Karbon Elyafı (Carbon Fiber - CF), Doğal Elyaf (Natural Fiber - NF) ve Bor Elyafı (Boron Fiber - BF) bulunmaktadır. Bu malzemeler arasından yukarıda da bahsedildiği üzere GF'lerin maliyeti diğerlerine nazaran oldukça düşük ve sivil maksatlı uygulamalarda en yaygın olarak kullanılan polimerik matrisli kompozit takviye elemanıdır. CF'ler ise tüm güçlendirici elyaf malzemeleri arasında en yüksek özgül modüle ve özgül mukavemete sahiptir. Ayrıca, yüksek sıcaklıklarda daha yüksek gerilme modülü ve mukavemetine sahiptirler (Callister, W.D., 2007). CF ile güçlendirilmiş kompozitler halen uçakların yapısal bileşenleri (uçak gövdesi – Boeing 787), roket motoru kasaları, spor ve eğlence ekipmanları (teniz raketi, kayak malzemeleri vb.) gibi askeri ve ticari alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. CF'lerin mekanik özelliklerinin geliştirilmesi ile büyük ölçüde üretim maliyetinde azalış ve ürünlerin dayanıklılığında artış sağlanabilmektedir. Cam ve CF'ler gibi geleneksel güçlendirici liflerle karşılaştırıldığında, NF'ler ise Pamuk, Hindistan cevizi, Keten, Kenevir, Jüt, Bambu, Kauçuk vb. gibi liflerdir. Doğal lifler, Cam ve Karbon elyaf gibi geleneksel güçlendirici liflerle karşılaştırıldığında, daha düşük yoğunluk, biyolojik olarak parçalanabilirlik ve düşük maliyet avantajlarına sahiptir (Saheb, D.N. ve Jog, J.P., 1999)

2.1.1. Balistik koruyucu plaka üretiminde kullanılan elyaf malzemeler

Günümüz Savunma Sanayindeki teknolojik gelişmelere bağlı olarak balistik koruyucu plaka üretimlerinde metal ve seramik gibi özgül ağırlığı yüksek malzemelerin yerini artık hafif koruyucu plakalarda tamamen, ağır koruyucu plakalarda ise kısmen, yüksek mukavemetli lifler ve polimer bazlı kompozitlerin kullanımı almış bulunmaktadır.

Bir polimer olan polipropilen (PP), yüksek yoğunluklu polipropilen (HDPP) ve yüksek performanslı polietilen (HPPE) kombinasyonları kullanılarak elde edilen balistik panel çalışmaları bulunmaktadır (Jacobs and Van Dingenen, 2001).

Balistik alanında kullanılan yüksek performanslı elyaf malzemelerin, metal ve seramik gibi balistik dayanımı yüksek materyallerin yerini almasındaki en büyük özellikleri hafiflikleri ve ağırlıklarına kıyasla daha yüksek balistik dayanımlarının olmasıdır. Hafif olmalarının ayrıca kattığı en büyük özellik, personeli veya bir askeri aracın muharebe sahasında hareket kabiliyetini önemli düzeyde arttırmasıdır.

Balistik koruma alanında en çok tercih edilen kumaş türleri ise, cam elyaf, aramid ve para-aramid kumaşlar, yüksek molekül ağırlıklı polietilen (HMWPE), PBO ve PPID kumaşlardır (Yumak ve ark., 2013).

2.1.1.1 Cam elyaf

Cam elyaf, polimer matrisli kompozitlerde en çok kullanım alanına sahip elyaf çeşitlerinden biridir. “Cam” terimi, inorganik camların geniş bir grubunu ifade etmek için kullanılır. Termoset reçinelerle birlikte kullanılan takviye elemanlarının 2/3' ünden fazlası ana maddesi silika olan cam elyaf olup erime noktaları yaklaşık 840 °C'dir. Bileşimi: %54 silika, %17,5 kalsiyum oksit, %14 alüminyum oksit, %8 bor oksit ve %4,5 magnezyum oksitten oluşan cam lifler; erimiş camın yüksek hızlarda, çok sayıda delik (100-1000 arası) içeren platin bir levha üzerinden geçirilmesiyle üretilmektedir. Üretilen uzun lifler hemen sonrasında yüksek hızda döndürülerek cam geçiş sıcaklığı civarında soğutulup katılaşır (Vasiliev ve Morozov, 2001).

Cam lifi, ince yapısı, yüksek termal kararlılığa sahip oluşu, suya karşı dayanıklılığı ve yüksek direnç özellikleri sayesinde tekstil ve plastik sektörleri başta olmak üzere birçok sektörde farklı yöntemlerle değişik amaçlar için kullanılmaktadır. Dokuma cam kumaşların üretilmesinde, hammadde halinde bulunan cam lifine üç aşamalı sıcaklık uygulanır. 1370 °C'den 1260 °C'ye kadar su vasıtasıyla soğutulan hammadde daha yoğun bir kıvama gelir ve üretim yöntemine göre dokuma, toz, kırılmış veya iplik şeklinde elde edilir (Sözen ve ark., 2016).

Cam liflerinin diğer liflere kıyasla avantaj ve dezavantajları ise aşağıdaki gibi özetlenebilir:

Tablo 2.1. Cam elyaf avantaj ve dezavantajları (Cheremisinoff, 1995)

Avantajları	Dezavantajları
Çekme mukavemeti yüksektir.	Kolay lekelenir
Düşük yoğunluktan dolayı hafiftirler.	Soğuk havaya maruz kaldığında direnci azalır
Bakım açısından maliyetleri düşüktür.	Proses imalatında ele alınması tehlikelidir
Kimyasal dirençleri ve dayanımları yüksektir	
Su geçirmez ve iletken değildir	
Nem tutma özellikleri yoktur	
Isı yalıtım özellikleri yüksektir.	
Korozyona karşı direnci yüksektir.	

Endüstride çok çeşitli kullanımlarına özel olarak geliştirilmiş birçok cam elyaf çeşidi bulunmaktadır. Farklı bileşimlere sahip cam elyafın mekanik özellikleri aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Tablo 2.2. Endüstride kullanım amaçlarına göre üretilen cam elyafın mekanik ve fiziksel özellikleri (Sathishkumar et al., 2014)

Malzeme	Yoğunluk (g/cm³)	Çekme Direnci (GPa)	Young Modülü (GPa)	Uzama (%)	Fiziksel Özellik
E-GLASS	2,58	3,445	72,3	4,8	Yüksek dayanım ve elektrik direnci
C-GLASS	2,52	3,310	68,9	4,8	Yüksek korozyon ve kimyasal direnç

S-2 GLASS	2,46	4,890	86,9	5,7	Çok yüksek mukavemet, modül ve dayanım
A- GLASS	2,44	3,310	68,9	4,8	Daha yüksek dayanıklılık, güç ve elektrik direnci
D- GLASS	2,11	2,415	51,7	4,6	Düşük dielektrik sabiti
R- GLASS	2,54	4,135	85,5	4,8	Daha yüksek mukavemet ve asit korozyon direnci
AR- GLASS	2,70	3,241	73,1	4,4	Yüksek alkali direnci

Yukarıdaki tablodan da anlaşılacağı üzere S-2 Glass'ın dayanım, yoğunluk ve elastikiyet özellikleri dikkat çekmektedir. S-2 Glass elyaf yüksek sertlik ve çekme direncine sahip olmasından ötürü ilk üretildiği yıllarda balistik koruyucu plaka üretiminde kullanılmaya başlanmıştır. Ancak gelişen teknoloji ile birlikte balistik dayanımı daha yüksek ve daha hafif elyaf (Karbon Elyaf, Aramid, Polietilen vb.) üretimi ile birlikte S-2 Glass elyaf çeşidi artık savunma sanayinde tercih edilmemektedir.

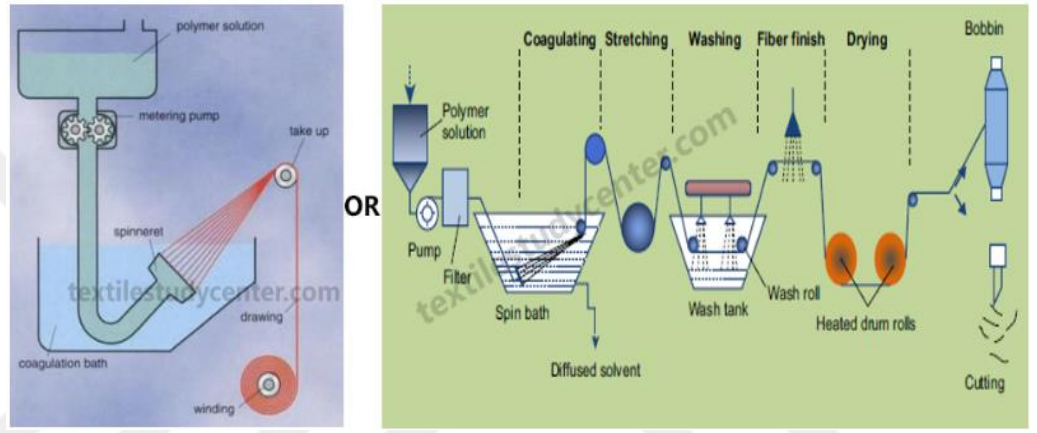
2.1.1.2 Aramid elyaf

Aramid elyaf, oldukça yüksek gerilme modülü ve mukavemetine sahip gelişmiş kompozitler içerisinde takviye elemanı olarak kullanılan ilk organik elyaftır. Eşit ağırlık bazında çelik ve cam liflerden çok daha iyi mekanik özelliklere sahiptirler. Aramid lifleri, doğası gereği ısıya ve aleve dayanıklıdır ve bu özelliklerini yüksek sıcaklıklarda korur.

Aramid “aromatik poliamid”in kısaltılmış adı olup, meta-aramidler ve para-aramidler olmak üzere iki sınıfta incelenmektedir. Para – aramidler en basit form olarak “poli p-fenilen -tereftalamid”dir ve piyasada Kevlar® ve Twaron® lifleri olarak bulunmaktadır. Meta-aramidler ise Nomex® adı altında ticarileşmiştir ve

“poli-m-fenilenisoflamid” yapısındadırlar. Meta-aramid lifleri düşük oryantasyon derecesi nedeniyle düşük modüllü olduklarından balistik koruma ürünlerinde tercih edilmemektedirler. (Hearle, 2001)

Kevlar, DuPont firmasında, 1965 yılında Stephanie Kwolek ve Herbert Blades adlı bilim adamları tarafından geliştirilen ve yüksek performanslı koruyucu giysilerin yapımında kullanılan bir para-aramid lifidir. Hafif ve dayanıklı kumaşlar üretilmesine olanak tanımaktadır. Kevlar lifleri, kuru jet-yaş lif çekim yöntemine göre elde edilmektedir.



Şekil 2.1. Aramid liflerin üretiminde kullanılan Kuru Jet-Yaş Lif Çekim yöntemi (Alagirusamy and Das, 2014)

Kevlar® lifleri, düşük ağırlıkta yüksek mukavemet, yüksek modül ve kesilmeye karşı yüksek dayanım göstermektedirler. Elektrik iletkenliği düşüktür, yüksek sıcaklığa ve kimyasallara karşı yüksek dayanıma sahiptir, sıcaklıkla büzülmesi azdır ve yüksek boyutsal stabilite göstermektedir. Bu nedenle Kevlar® lifleri, mayından koruyucu botlar, eldivenler, kurşun geçirmez yelekler ve miğferlerde kullanılan kompozitler başta olmak üzere, balistik koruma ürünlerinde yaygın olarak kullanılmaktadırlar (Tarakçıoğlu, 2007)

Kevlar 49, yüksek modülü nedeniyle günümüzde yapısal kompozitlerde kullanılan baskın formdur. Kevlar 29, daha yüksek tokluk, hasar toleransı veya balistik durdurma performansı istendiğinde kompozitlerde kullanılır (Akovalı, 2001) Kevlar 29'un dayanımı ve modülü, cam liflerinininkine (S veya E) eşdeğer

iken, öz kütlesi neredeyse cam liflerinin yarısı kadardır. Bu nedenle daha hafif bir kıyafet için kompozitlerde cam lifleri yerine Kevlar® kullanılabilmektedir.



Şekil 2.2. Değişik formlarda işlenmiş Aramid Lifler.

Twaron, Teijin firmasının piyasaya sürdüğü aramid lifidir. Para-aramid yapısındaki polimerlerden oluşan Twaron® lifleri de, yüksek enerji emebilmesi nedeniyle balistik koruma ürünlerinde kullanılmaktadır ve şu anda para-aramid lifleri içerisinde Kevlar®' dan sonra en büyük pazar payına sahip olan liftir (Tarakçıoğlu, 2007)

Tablo 2.3. Piyasada üretilen Para-aramid elyafın mekanik özellikleri (Mark, 1999)

Malzeme	Yoğunluk (g/cm ³)	Çekme Direnci (MPa)	Young Modülü (GPa)	Uzama (%)
Kevlar 29	1,44	2700 - 3000	70	3,5 - 4,2
Kevlar 49	1,44	2900 - 3400	112 - 135	2,4 - 2,8
Twaron	1,44	2600	60	3

Para-aramid liflerinin birçok özelliğinin yanında birtakım dezavantajları da bulunmaktadır;

- Bazı aramid elyaf türleri ultraviyole ışınlarla maruz kaldığında bozulma göstermektedir. Bu sebeple sürekli karanlıkta saklanmaları gerekmektedir.
- Elyaf çok iyi birleşmeyebilirler. Bu durumda reçinede mikroskobik çatlaklar oluşabilir. Bu çatlaklar malzeme yorulduğunda su emişine yol açmaktadır.
- Bunun yanı sıra Kevlar lifleri cam liflerinden oldukça daha pahalıdır.

- Nem absorbe edebildiklerinden, Kevlar takviyeli kompozitler, cam liflerinden yapılan kompozitlere göre çevre şartlarına karşı daha hassastırlar.
- Kopma dayanımı ve modülünün yüksek olmasına rağmen, sıkıştırılabilirlik değerleri nispeten zayıftır.
- Bunun yanı sıra, Kevlar® kumaşların kesilmesi oldukça zordur (Chocron ve ark., 2010)

2.1.1.3 Yüksek molekül ağırlıklı polietilen (Ultra High Molecular Weight Polyethylene-UHMWPE)

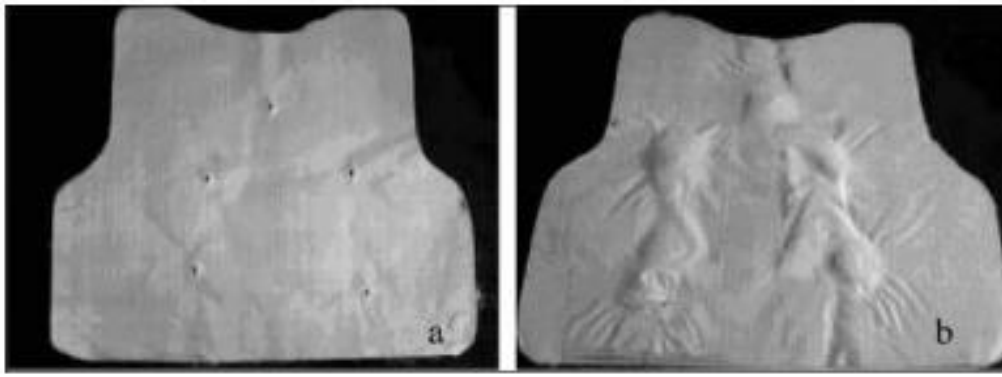
Polietilen olarak bilinen plastik maddelerin molekül ağırlıkları 10^4 iken yüksek molekül ağırlıklı polietilenler 10^6 düzeyinde bir molekül ağırlığına sahiptir. Bu sebeple isimleri Çok Yüksek Molekül Ağırlıklı Polietilen (UHMWPE) olarak bilinmektedir. Diğer yüksek performanslı liflere nazaran düşük kopma uzaması değerine sahip olmasına rağmen kopma enerjisi değeri son derece yüksektir (Bhatnagar, 2006)

Genel olarak Yüksek Molekül Ağırlıklı Polietilenler (HMWPE) olarak da adlandırılan bu lifler, piyasada Spectra ve Dyneema isimleriyle bilinir. Yüksek molekül ağırlıklı polietilenler 1 g/cm^3 den daha küçük (ortalama $0,97 \text{ g/cm}^3$) yoğunluklarıyla zırh sanayinde kullanılan en hafif malzemelerdir (Cavallaro, 2011). Her iki ürün de farklı üreticiler tarafından üretildiği için farklı üretim detayları da farklı olmakla birlikte her ikisi de yüksek performanslı polietilen (HPPE) liften elde edilmektedir. Molekül ağırlığına oranla çelikten 15 kat, Kevlardan ise %40 daha güçlüdür. Aşınma dayanımı, yüksek karbonlu çelikten daha yüksektir.

Tablo 2.4. Piyasada üretilen Yüksek Molekül Ağırlıklı Polietilen elyafın mekanik özellikleri (Mark, 1999)

Malzeme	Yoğunluk (g/cm^3)	Çekme Direnci (MPa)	Young Modülü (GPa)	Uzama (%)
DSM - Dyneema	0,97	2400 - 4100	65 - 155	3 - 4
Honeywell - Spectra	0,97	2600 - 3000	87 - 172	2,7 - 3,5

1990'lı yıllara gelindiğinde ultra-yüksek moleküler ağırlığa sahip polietilen (UHMWPE) lifleri balistik koruma amaçlı sistemlerde yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Yoğun moleküler yapıya sahip polietilen, **herhangi** bir balistik tehdide karşı savunma teçhizatlarının içerisinde (başlık ve kompozit yelek ilave koruma plakaları) yüksek koruma sağlamaktadır. Sıcaklık yönünden ise para-aramid yapıya kumaşlar kadar yüksek dayanıma sahip değildirler. Yüksek moleküler ağırlıklı liflerin erime sıcaklıkları 125-145 °C civarındadır. Ancak aşırı düşük sıcaklıklarda bile darbe mukavemetleri para-aramid liflerden daha yüksektir (Candan ve Akdemir, 2004)



Şekil 2.3. Yüksek Moleküler Ağırlıklı Polietilen (HMWPE) lifler ile üretilen balistik yelek (Liu ve ark., 2010)

Yüksek moleküler ağırlıklı polietilen, aramid ve S-Cam zırh uygulamalarında hibrid bir yapı olarak da kullanılan en önemli ileri kompozit malzemelerden biridir. Günümüzde bu malzemenin tek başına kullanılması ile, çelik çekirdekli mermiler haricinde olan 7,62 mm ve altı mermilere karşı en hafif balistik koruma çözümlerinin elde edildiği görülmektedir. Ayrıca, seramik destek katmanı olarak kullanılmaları ile aynı zamanda zırh delici mermi tehditlerine karşı da hafif balistik koruyucu plakalar üretilebilmektedir. Hafiflikleri ve kolay şekil verilebilmeleri sayesinde personel zırhlarında yaygın olarak kullanılırlar (Parnas ve ark., 2005)

Tablo 2.5. Yüksek molekül ağırlıklı elyafın avantaj ve dezavantajları (Sabir, 2018)

Avantajları	Dezavantajları
Yüksek mukavemet	Düşük ısı direnci
Düşük özgül ağırlık	Yüksek maliyet

Mükemmel kimyasal direnç	
UV ışınlarına karşı son derece dayanıklı	
Neme karşı dayanıklı	
Daha uzun ömürlü	

2.2 Matris Elemanları

Kullanılan matris malzemesine göre kompozit malzemeler; polimer, seramik ve metal matrisli olarak üç ana başlık altında sınıflandırılırlar. Değişik mekanik ve yapısal özelliklere sahip matris malzemeleri amaca göre farklı uygulama alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bazı uygulama alanları örnekleri için kullanılan matris malzemesi çeşitleri Tablo 2.6’da verilmiştir.

Tablo 2.6. Matris malzemesi çeşitleri ve uygulama alanları (Lee ve ark., 2001)

MATRİS GRUBU	MATRİS ÇEŞİDİ	UYGULAMA ALANI
Polimer	Termoset Termoplastik	Uzay-havacılık, spor malzemeleri, vb. Balistik koruma, mekanik parçalar, vb.
Metal	Alüminyum Titanyum Bakır	Uzay-havacılık, spor malzemeleri, elektrik devreleri, vb. Türbinler, vb. Yüksek mukavemetli elektrik iletkenleri, vb.
Seramik	Alümina Silisyum Karbür Bor Karbür	Yüksek sıcaklık mekanik uygulamaları, vb. Kesici uçlar, parlatma malzemeleri, vb. Savunma sanayi

Matris malzemelerin kompozitlerin içerisinde yarattığı faydaları ise aşağıdaki gibidir:

- Malzemenin şekil ve geometrisini oluşturmak ve sürdürmek
- Takviye elemanlarını dış etkilere korunma (aşınma, korozyon vb.)
- Kompozite gelen yükü üniform bir şekilde dağıtmak
- Takviye elemanlarını bir arada tutmak
- Takviye elemanlarını burkulmadan korumak
- Boyutsal stabiliteyi sağlamak
- Kompozitin termal özelliklerini belirlemek
- Termomekanik stabilite (De Luca et al., 1998)

Polimer matrisli kompozitlerin en önemli özelliğinden bir tanesi de geleneksel malzemelerden çok yüksek “mukavemet/ağırlık” oranına sahip olmalarıdır. Minimum ağırlıkla çok fazla yük taşıyabilme kabiliyetleri yüksektir. Matris malzemesi başlangıçta akışkan halde iken akabinde takviye elemanına çok iyi sararak ıslatabilmeli ve katı forma kolaylıkla geçebilmelidir. Kompozit yapılarda yükü taşıyan elyafın görevlerini yapabilmeleri açısından matrisin mekanik özelliklerinin rolü oldukça fazladır. Matris malzemesi, projektinin çarpması ile liflerinin üzerinde oluşan dikey enerjinin yarattığı güçlü yanıl itme hareketini olabildiğince önleyerek, projektinin enerjisini sönümleyebilecek maksimum life temas etmesini sağlamaktadır. Bu durum, elyaf tabakalar tarafından sönümlenebilen kinetik enerjinin artmasına sebep olmaktadır. (Kocer, 2007).

Genel olarak incelendiğinde polimer bir matrisin kompozit üzerinde beklenen özellikler aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Düşük viskozite ve lifler arasında iyi sızabilme
- Lifler arasında yüksek yapışabilme kabiliyeti (Yapışma kabiliyeti arttıkça, yüklerin matristen takviyeye yeterli miktarda aktarılması ve gerilme altında lif-reçine ara yüzeyinde ayrılma veya kırılmalara engel olunması mümkün olur.)
- Yüksek deformasyon karşı iyi direnç ve tokluk gösterme (Kırılma tokluğu malzemenin çatlak ilerlemesine gösterdiği direncin bir ölçüsü olup matrisin hasar uzaması arttıkça tokluğu genel olarak artar, aksi durumda matris gevrek karakter gösterir ve kolayca kırılır.)

- Yüksek ısıl direnç, elektriksel özellikler ve korozyon direnci
- Yüksek darbe ve yorulma dayanımı
- Yüksek “mukavemet/ağırlık” oranı
- Minimum ağırlıkla çok fazla enerji sönümleyebilme,
- Düşük elastisite modülü (Jovicic et al., 2000).

2.2.1 Termoset reçineler

Elyaf takviyeli kompozitlerin üretiminde ekzotermik bir reaksiyon ile katı bir form oluşturan reçineler arasında, doymamış polyester, epoksi reçine, fenolik reçine, vinil ester vb. reçineler yer almaktadır. Yüksek teknoloji uygulamalarında malzemelerin performans gereksinimlerindeki sürekli iyileştirme çalışmaları ile birlikte ile, gelişmiş Polimerik Matrisli Kompoziti' in hazırlanması için yüksek mukavemetli, yeterli tokluğa erişebilen ve yüksek sıcaklık performansına ve iyi işlenebilirliğe sahip matris reçinelere halen ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu ihtiyaca yönelik olarak mükemmel performans elde etmek için araştırmacılar, doymamış polyester, epoksi reçine, fenolik reçine ve vinil ester gibi reçine sistemlerini farklı yöntemlerle geliştirmeye çalışmışlardır.

Termoset matrisli kompozit malzemeler, reçineler ile sertleştiricilerin - istenilen reaksiyon hızına göre katalizörlerin- belli bir oranlarda karıştırılarak takviye malzemesine nüfuz ettirilmesi ile elde edilmektedirler. Reçineler ile sertleştirici/katalizörlerin karıştırılması ile birlikte ortaya çıkan ekzotermik reaksiyon sonucu tekrar geri dönüşümü olmayan bağlar meydana gelmektedir. Katılaştırıcı ilavesi ile sıvı durumdan önce jel haline gelir ve sonra da katılaşır. Termoset reçineler izotropiktirler. Plastikler arasında kalıpta şekil verilebilen, ısıl direnci en yüksek polimerlerdir (Staab, 1999).

Reaksiyon sonucu meydana gelen rijit termosetler ısı ile tekrar eski formlarına dönüştürülemezler. Ancak yeni yapılarının dayanımlarına göre belli bir sıcaklık üzerinde mekanik özellikleri değişmektedir. Bu sıcaklık cam geçiş sıcaklığı olarak bilinmektedir ve kullanılan reçine türüne, pişirme derecesine ve doğru bir karışım elde edilip edilmediğine bağlı olarak değişmektedir. Cam geçiş

sıcaklığından büyük sıcaklıklarda, reçine elastisite modülü ve sonuç olarak basma ve kayma mukavemeti keskin bir şekilde düşüş gösterir. (Bhatnagar, 2006)

Termoset reçinelerin bilinen avantaj ve dezavantajlar ise aşağıdaki gibidir;

Tablo 2.7. Termoset reçinelerin avantajları ve dezavantajları

AVANTAJLARI	DEZAVANTAJLARI
Termoplastiklere göre yüksek sıcaklıklara daha dayanıklıdır	Reaksiyon hızı ile bağlantılı olarak oda sıcaklığındaki sınırlı çalışma zamanı
Son derece esnek tasarım	Rijit bir hale gelene kadar geçen uzun fabrikasyon zamanı
Mükemmel estetik görünüm	Elastisite modülünün düşük olması
Yüksek düzeyde boyutsal kararlılık	Geri dönüştürülemez
Metal kullanarak fabrikasyona göre daha düşük üretim maliyetleri	Yeniden şekillendirilemez
Yüksek mukavemet-ağırlık oranı ve performans	
Olağanüstü dielektrik dayanımı	
Düşük termal iletkenlik ve mikrodalga şeffaflığı	
Korozyon etkilerine ve suya karşı direnç	

En yaygın kullanılan termoset matris malzemeler arasında epoksiler, polyesterler, vinilesterler, fenolikler, silikonlar, poliüretanlar ve akrilikler yer almaktadır. Yüksek mukavemet beklenmeyen durumlarda ise endüstride en çok kullanılan matris malzemesi polyester reçinedir (Hearle, 2001).

2.2.2 Termoplastik reçineler

Termoplastik polimer, ısıya maruz kaldığında yumuşayan ve belli bir sıcaklık aralığında soğutularak sertleştirilebilen doğrusal zincir moleküllere sahip bir malzeme türü olarak tanımlanmaktadır (Akça ve Gürsel, 2015; Mondal, 2013)

Diğer bir faktör olarak, termoplastik polimerler, yumuşatılmış yapılarından dolayı istenildiği tasarıma göre şekillendirilebilmektedirler (Mondal, 2013).

Termoplastik malzemeler, kovalent bağlara göre daha zayıf olan Van der Waals bağlarının bir arada tuttuğu uzun hidrokarbon molekülleri içermektedir. Lineer polimerler grubuna dahil olan termoplastikler tekrar tekrar kullanılabilirliğine sahiptirler. Şekillendirilme sırasında herhangi bir kimyasal değişikliğe uğramayıp birden fazla ısıtma ve soğutma işlemine tabi tutularak kalıplanabilen termoplastikler üretim sırasında eritilerek elyafa emdirilir (Springler ve Kollar, 2003).

Üretim maliyetinin azaltılması ve deformasyonun iyileştirilmesine katkı sağlayan özel yetenekleri sayesinde termoplastik reçine sistemleri için çeşitli uygulama alanları mevcuttur. Üstelik, bu polimerler, yeniden ısıtılmalarına veya yeniden biçimlendirilmelerine bakılmaksızın, genellikle ilk özelliklerini korumaktadırlar. Ayrıca doğrusal moleküler yapıları nedeniyle termoplastik polimerler, yüksek çapraz bağlı moleküler yapıya sahip termosetlere göre daha serttirler. Bu lineer yapı, moleküllerin birbirleri arasında kolay kaymasını sağlar, böylece mekanik enerji tüketimi ve tokluğun iyileştirilmesi için bir mekanizma oluşmuş olur. Dolayısı ile bir termoset malzeme yerine termoplastik bir polimer matris kullanılarak, kompozitin hem elastikliği hem de tokluğu iyileştirilebilecektir (Chung, 2017).

Termosetlerin bir başka mekanik özelliği ise yüksek sıcaklık aralığında ısıyla sertleşen polimerlere karşı daha az mukavemete ve kimyasal stabiliteye sahip olmalarıdır. Ancak darbe hasarına ve çatlamaya karşı daha dirençlidirler (Congress of the U.S., 1988).

Bu matrisler kullanılarak termoplastik kompozitler karbon, cam, metal, biyo bazlı malzemeler vb. ile güçlendirilebilirler. Bu alanda, günümüz endüstrisi, zaman ve maliyetleri azaltmak amacı ile farklı tiplerde termoplastik kompozit çeşidi elde edebilmek için yeni araştırmalara yönelik yatırımlarına devam etmektedir (Tan and Falzon, 2016)

Tablo 2.8. Termoset ve termoplastik reçinelerin özellikleri

Özellikler	Epoksi	Polyester	Fenolik	Poliamid
Yoğunluk (g/cm ³)	1,2-1,4	1,04-1,46	1,24-1,25	1,3-1,4
Çekme Mukavemeti (GPa)	60-85	50-75	60-80	70-120
Elastisite Modülü (GPa)	2,6-3,8	3,1-4,6	3-4	3,8-4,8
Kopma Uzaması (%)	1,5-8	1-6,5	1-1,8	1,5-3,2
Basma Mukavemeti (MPa)	100-200	90-250	70-200	-
Çarpma Direnci (kg/cm)	0,01-0,05	-	0,27-0,35	0,37-0,54
Kullanım sıcaklığı (°C)	110-290	121-176	100-125	250-300
Özgül ısı (Cal/°C.g)	0,21	0,55	0,37	0,19

2.2.3 Kayma gerilimi altında yoğunlaşan sıvılar (Shear Thickening Fluids - STF)

STF'leri daha iyi anlamak için, akışkanlar mekaniğinin bazı temel kavramlarını ve bu akışkanların reolojik davranışlarını bilmek gereklidir. Reolojik akışkanların, üzerlerine etki eden kesme geriliminin, kayma gerilimi oranıyla doğrusal olarak ilişkili olmadığı bir şekilde davrandıkları bilinmektedir. Kesme gerilmelerine maruz kaldığında, sıvıların çoğu, sabit viskozite ile Newton yasasına uyar. Ancak, bazı akışkanlar bu stres altında yoğunlaşabilir ve sonuç olarak, kayma gerilmeleri altında alışılmadık (Non- Newtonian) bir davranış sergilerler. Bu

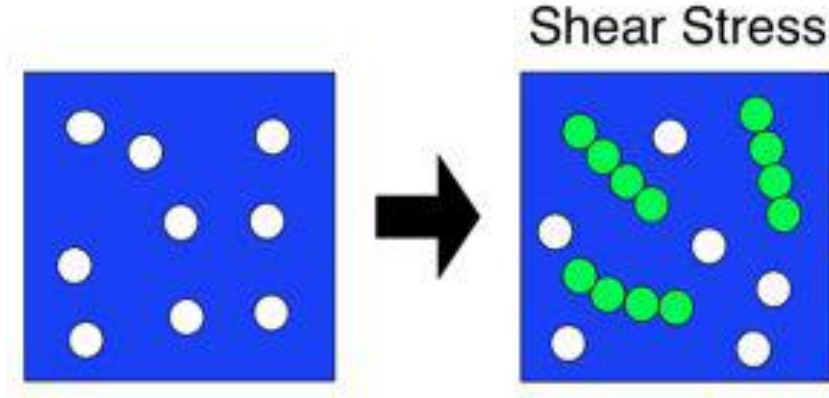
maddeler STF olarak bilinir, viskoziteleri, sırasıyla bir kesme kalınlaşması ve kayma incelmesi olarak adlandırılan değişken kesme gerilimi büyüklüğü altında artabilir veya azalabilir (Xu, 2016).

STF, bir sıvı faz (sürekli faz) içinde küresel küçük parçacıkların (dağınık faz) dağılımıyla elde edilen bir Non-Newtonian akışkandır. Daha anlaşılır bir şekilde STF, viskozitesi kayma gerilmesine (veya gerilme oranına) bağlı olan spesifik bir sıvı tipidir. (Painter and Coleman, 1997)

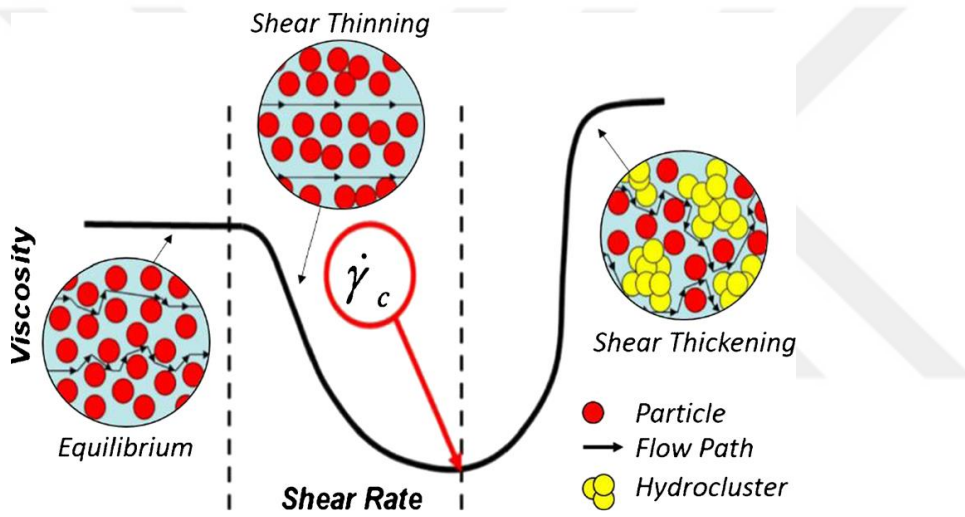
STF'ler, viskozitesi kayma gerilimine (veya gerinim hızına) bağlı olan spesifik bir Newton olmayan sıvı türüdür. Başka bir deyişle, bir darbe gibi bir kesme kuvveti yaşadığında katı gibi davranan bir akışkandır. Bu son derece büyüleyicidir, çünkü sıvıdan katıya geçiş için herhangi bir sıcaklık veya basınç değişikliği gerektirmez.

Günümüzde STF'lerin neden böyle davrandığına dair açıklanan iki teori bulunmaktadır ve bunların her ikisi de STF' nin moleküler yapısıyla ilgili teorilerdir. Bunlardan bir tanesi, STF'lere bir kuvvet uygulandığında yapılarının oldukça sert bir kristalize yapıya dönüştüğünü ifade etmektedir. Bu durum STFlerin, neden bir kesme kuvveti tarafından hareket ettirildiklerinde katı gibi davrandıklarını ve neden bu kuvvet uygulaması sona erdiğinde sıvı formlarına geri döndüklerini açıklamaktadır.

Diğer teori ise sıvı ani bir strese maruz kaldığında kuvvet uygulanan bölgede hidrokümelerin oluştuğunu belirtmektedir. Bu durum bir stres altında sıvının uzun zincirler oluşturmak için kendini sıkı bir zincir halinde düzene soktuğu anlamına gelir (Şekil 2.4). Bu zincirler hemen ardından üst üste gelerek kırılması zor bir yapı oluşturmaktadırlar (Price, 2012)



Şekil 2.4. Stres altında STF' nin oluşturduğu zincir yapılar (Hassan ve ark., 2010)



Şekil 2.5. Stres altında STF'nin oluşturduğu hidrokümeler (Pinto ve Meo, 2017).

Son 10 yıldır sektörde, mevcut malzeme sistemlerinden daha üstün balistik dayanıklılık özelliklerine sahip yeni, esnek ve hafif bir malzeme üretmek için STF ve Epoksi nin yüksek performanslı kumaşların üzerindeki etkisi dikkat çekmektedir. (Asija ve ark., 2018)

STF uygulamalarından biri de, "Sıvı Balistik Koruyucu Plaka" üretimidir. STF, nano koloidal silika (SiO_2) parçacıklarının polietilen glikol içerisine değişik oranlarda dağıtılmasıyla elde edilmektedir. (Khodadadi ve ark., 2019) Plakalar, Kevlar, naylon veya diğer kumaşlara, silika nano parçacıklarından STF' nin emdirilmesi ile elde edilir. İşlem gören kumaşların, sade hallerinden çok daha fazla

koruma sağladığı yapılan çalışmalar sonucunda görülmüştür. Bu tip üretilen bir plaka, belirli bir esneklik ve korumanın gerekli olduğu durumlarda, güvenlik güçlerinin boynunu, dirseklerini ve dizlerini korumak için kullanılabilir. STF'nin emdirilmesi ile elde edilen elyaf kumaşların mukavemetinde yaklaşık 7 kat penetrasyon korumasının arttırdığı gözlemlenmiştir. STF'nin sertleşmesi sadece anlık bir tepki olduğundan işlem görmüş kumaşlar sadece gerilimi hissettikleri küçük bir süre için rijit bir yapıdadır, bu da bu kumaşların stresten kurtulduğunda eski hallerine döndüğü anlamına gelmektedir (Price, 2012).

2.3 STF ve Termoset İşlenmiş Elyaf Çalışmaları

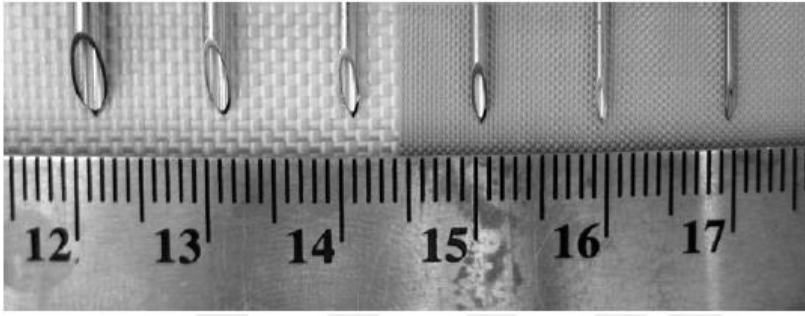
STF'nin balistik kompozitlerin performansı üzerindeki etkisini araştıran birtakım çalışmalar aşağıdaki gibidir:

Lee ve arkadaşları (2003) STF emdirilmiş aramid kumaşların balistik performanslarını incelemiş ve aramid kumaşların balistik dayanımlarının STF ile artırılabilirliğini bulmuşlardır. Araştırmaları sonucunda 4 kat STF/Kevlar kompozitin 10 kat düz Kevlardan daha fazla enerji absorbe ettiğini görmüşlerdir. (Lee ve ark., 2003)

Asija ve arkadaşları (2018), STF'nin UHMWPE kumaşın yüksek gerilme oranı özelliği üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Yaptıkları çalışmada kendilerinin dizayn ettikleri Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB) adında deney düzeneği kullanılmış olup, STF işlenmiş ve düz iki ayrı numuneyi test etmişlerdir. Yapmış oldukları deneylerde; STF ile işleme tabi tutulmuş örnekler, işlenmemiş örneklerle kıyasla daha yüksek tepe gerilimi, tepe noktası, gerilme hızı ve darbe dayanıklılığı değerleri sergilemiştir. Sonuç olarak STF ile takviye edilmesi durumunda UHMWPE kompozitlerin yüksek gerilimli darbe altında balistik dayanımlarının arttığı tespit edilmiştir.

STF nin Kevlar kumaşlar üzerindeki dayanımını inceleyen bir diğer çalışma ise Houghton ve arkadaşlarına aittir. Bu deneyde “Quasistatic Needle Puncture” testini benzerlerine nazaran delici etkisi çok daha yüksek olan farklı boyutlarda deri altı (hypodermic needles 22-20-18-16-14-12 size) iğnesi kullanılmıştır (Şekil-3).

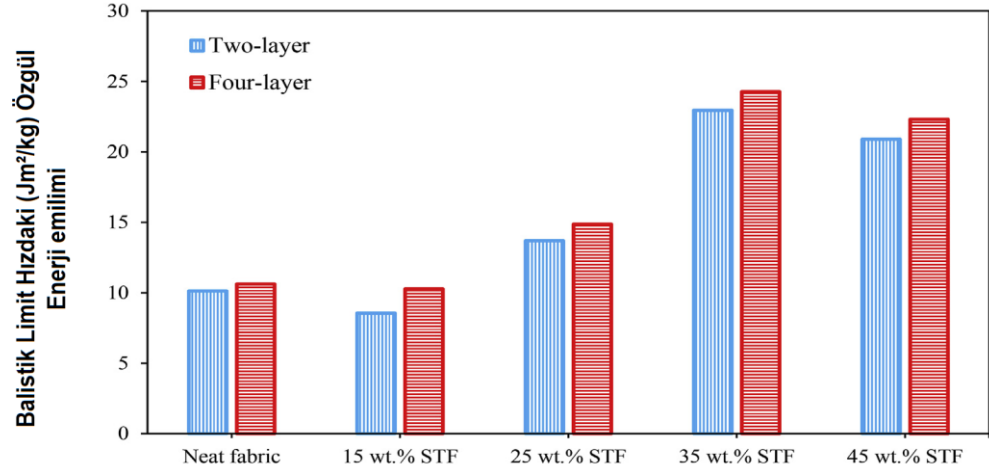
Deney materyali olarak STF için PEG 200, 450 nm çapa sahip koloidal silika ve etanol; kumaş olarak da 180 g/m² ve 132 g/m² gramaja sahip iki farklı KEVLAR kullanılmıştır. 180 g/m² Kevlara %20,2 wt STF; 132 g/m² Kevlara ise %15,1 wt STF işlenmiştir. Aynı teste işlenmemiş kumaşlar da dahil edilip toplamda 4 farklı numune üzerinde deney yapılmıştır. Quasistatic Needle Puncture testi sonucunda en yüksek direnci gösteren STF'li 132 g/m² Kevlar olmuştur (Şekil-2.6). Bu çalışma, STF ilavesinin kumaştaki iplik hareketini kısıtlanmasını sağlayarak, kumaşların iğne delinme direncini arttırdığını ortaya koymuştur (Houghton ve ark., 2007).



Şekil 2.6. Quasistatik Needle Puncture testinde kullanılan hipodermik iğneler (Houghton ve ark.,2007).

Khodadadi ve arkadaşları (2019), yapmış oldukları çalışmada, STF takviyeli Kevlar kumaşın yüksek hız etkisi altında dayanımını incelemişlerdir. Çalışma esnasında %15, 25, 35 ve 45 ağırlık oranlarında nano silika parçacıklarını polietilen glikol içerisinde homojen bir şekilde dağılımını sağlayarak 4 farklı STF elde etmişler ve ardından STFler 1:2 hacimsel oranda etanol içinde seyreltilerek Kevlar kumaşlara emdirilmesi sağlanmıştır. Deneylerde 183 g/m² yoğunluğunda Kevlar kullanılmıştır. İkişer ve dörder kat olmak üzere toplam 8 deney üzerinde yapılan çalışmalar sonucunda; %15'lik STF takviyeli kumaşın spesifik enerji emilimi, işlenmemiş kumaşa kıyasla daha düşük olduğu tespit edilirken, en yüksek spesifik enerji emilimini, düz kumaşa oranla 2.3 kat daha iyi olan, ağırlık olarak %35 STF içeren 4 katlı Kevlar kumaş sergilemiştir (Şekil 2.7). Bunun nedeni katmanların sayısı arttıkça, tabakalar arasında daha iyi etkileşimlerin oluşması ve kumaşın mermi çarpmasından sonra enerjiyi daha verimli bir şekilde dağıtması olarak açıklanmıştır. Sonuç olarak STF takviyeli kumaşların düz kumaşlara oranla çok

daha iyi balistik performans ortaya koyduğu gözlemlenmiştir. (Khodadadi ve ark., 2019)



Şekil 2.7. Düz ve STF işlenmiş kumaşların absorbe ettiği balistik enerji grafiği (Khodadadi ve ark., 2019).

Ayrıca STF nin Aramid kumaş üzerine etkilerini gösteren birtakım araştırmaların karşılaştırma tablosu ise aşağıda gösterilmektedir:

Zhu ve arkadaşları (1992) ise farklı sivri-konik mermilerin farklı hızlarında maruz kalınan Kevlar/Polyester laminatların quasi-statik ve dinamik deneysel araştırmalarını yapmışlar ve lif parçalanmasının ve lokal deformasyonun ana enerji emici mekanizmalar olduğu sonucuna varmışlardır. Ayrıca genel ve kesme sertliğinin dinamik penetrasyonda en az etkili olmasına rağmen quasi-statik penetrasyona karşı önemli rol oynadığını gözlemlemişlerdir.

Mines ve arkadaşlarının (1999) Cam Elyaf ve Polyester kompozitler üzerinde mermi kütlelerinin Cam / Polyester plakalar üzerindeki etkisini deneysel olarak araştırmış, plakaların kalınlığı arttıkça, delaminasyon tarafından absorbe edilen enerjinin de önemli rol oynadığını göstermiştir.

Sikarwar ve arkadaşları (2017) ise Kevlar/Cam Elyaf ve Epoksi materyallerinden oluşan kompozitlerin, düşük hızda projektinin yarattığı enerji absorpsiyonlarını incelemişlerdir. Deneysel sonuçlara göre, düşük balistik hızlarda tüm plaka tipleri için, plakaların arka yüzündeki ayrışmanın, çarpma hızının artmasıyla artarken, yüksek balistik hızlarda ise azaldığı görülmüştür. Aynı

başlangıç hızında (170 m/s) eşit sayıda tabakaya (sekiz tabaka) için, kevlar/epoksi laminantlar tarafından emilen spesifik enerji [absorbe edilen enerji/ (g/m²)], cam/epoksi laminatlardan %36 daha yüksektir. Aynı zamanda, Kevlar liflerinin cam liflerine ağırlıkça %27,5 oranında ilavesi, cam/epoksi plakalara kıyasla, cam/kevlar/epoksi plakaların absorbe edilen spesifik enerjisinde (J/(g/m²)) **%20 iyileşme** göstermiştir.

Tablo 2.9. Epoksi işlenmiş Kevlar ve Cam elyaf kumaşlardan oluşturulan numunelerin özellikleri ve absorbe edilen balistik enerji (Sikarwar ve ark., 2017).

Materyal	Kalınlık (mm)	Alan Yoğunluğu (g/m ²)	Artık Hız (m/s)	Emilen Enerji (J)	Özgül Enerji Emilimi Kapasitesi (J/(g/m ²))
Cam Elyaf/ Epoksi	5,4	8750	45	103,3	1,18E-02
Cam Elyaf/ Kevlar/ Epoksi	3,6	4914	105	69,5	1,41E-02
Kevlar/ Epoksi	2,4	2832	132	45,6	1,61E-02

Petel ve arkadaşları (2015), sıvı etilen glikol içerine altı farklı SiO₂ ve SiC partikül süspansiyonlarının ve saf etilen glikolün balistik tepkilerini incelemişlerdir. Aynı hacme sahip silindirik bir kapsül içine değişik konsantride hazırlanan STF sıvılarına atışlar yapılmış ve yapılan test sonucu projektile en iyi yavaşlatan karışımlar %61 SiO₂ atışlar (hacimce) ve %61 SiO₂/SiC (hacimce) karışımları olduğu görülmüştür. Buna karşılık 500 m/s değerinin üzerine çıkılan atışlarda en iyi sonucu %61 SiC karışımının verdiği ifade edilmiştir.

Majumdar ve arkadaşları (2013), 100 nm boyutundaki SiO₂ ile PEG-200' ü %50, %60 ve %70 oranlarında karıştırarak 3 farklı STF elde etmiştir. Elde edilen STF karışımlarını 200 g/m² yüzey yoğunluğuna sahip bezayağı dokuma Kevlar

kumaşa emdirmişlerdir. İşlenmemiş Kevlar ile STF emdirilmiş Kevlar numuneleri 6 m/s hızında dinamik darbe direnç testine tabi tutulmuştur. Yapılan testler sonucunda %83,3 toplam enerji absorblayan %50 konsantredeki STFli Kevlar numunesi en iyi sonucu verirken, işlenmemiş Kevlar %40 enerji absorlayabilmiş ve STFli kumaşlara nazaran yarı yarıya performans düşüklüğü gösterdiği kaydedilmiştir.

Avila ve arkadaşları (2018), 144 g/m² yüzey yoğunluğuna sahip bezayağı dokuma Kevlar kumaşa tek faz ve CaCO₃ ekleyerek çift faz STF karışımları yaparak, STF işlenmemiş değişik katman sayılarında 40 adet numuneyi test etmişlerdir. 9 mm ve 357 Magnum mermisi ile yapılan atış testlerinde, hem balistik plaka arkasındaki deformasyon hem de toplam enerji absorbsiyonu olarak en iyi sonucu %25 SiO₂ + %75 CaCO₃ (ağırlıkça) karışımı vermiş olup STF işlenmemiş numunelere göre %40 daha iyi balistik performans sergilediği gözlemlenmiştir. 19 kat %25 SiO₂ + %75 CaCO₃ STF işlenmiş numunenin 32 kat işlem görmemiş kumaşın balistik değerlerine sahip olduğu ayrıca belirtilmiştir.

Srivastava ve arkadaşları (2011), yüzey alan yoğunluğu 200 ve 465 g/m² Kevlar kumaşlara 278 nm boyutunda SiO₂ ve PEG-200 ile elde ettikleri değişik derişimlerdeki STF'yi emdirmişler ve kumaşlara STF emdirildikten sonra 0,5, 1,0 ve 2,0 Bar basınç uygulayarak aynı zamanda basıncın da absorlanan enerjiyi ne seviyede etkilediğini test etmişlerdir. CEAST marka FRACTOVIS PLUS model düşen ağırlık darbe test cihazında 8 m/s çarpanın etkisi sonucu, en iyi darbe enerjisini %60 STF derişimine sahip 2 Bar basınç altında işlenmiş numunenin emdiği gözlemlenmiştir. Sonuç olarak STF ile işlenmiş kumaşların balistik etkisinin düz kumaşlara nazaran daha iyi olmasının yanı sıra işlem sırasında artan basıncında bu etkiye katkısı olduğu belirtilmiştir.

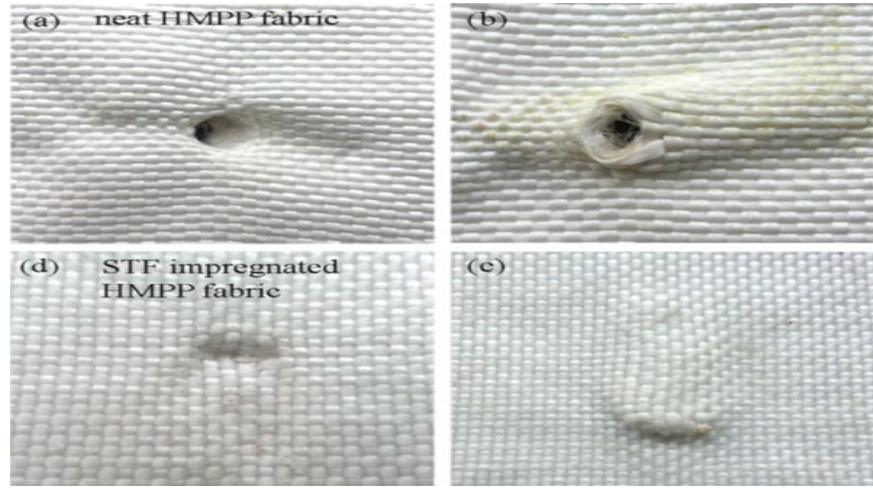
Baharvandi ve arkadaşları (2014) ise STF işlenmiş para-aramid kumaşların yarı-statik delinme direnci (quasi-static puncture resistance) performansını incelemişlerdir. Testlerinde 235 g/m² yüzey alan yoğunluğuna sahip Twaron marka aramid kumaş kullanılmıştır. STF için ise 12nm ve 60 nm SiO₂ ile PEG-200 kullanılarak %15-25-35 (ağırlıkça) konsantrasyonları elde edilmiştir. Yarı-statik delinme testlerinde elde edilen sonuca göre 12 nm boyutunda SiO₂ den üretilen %35

konsantre STF emdirilmiş Twaron kumaşın 40,1 J enerji absorbladığını ve bu enerjinin işlem görmemiş Twaron kumaşın sönümlediği 14,3 J enerjinin yaklaşık 3 katı daha fazla olduğu gözlemlenmiştir.

Valença ve arkadaşları (2015) cam elyaf ve aramid kumaşa epoksi uygulayarak elde ettikleri kompozitin üzerinde araştırma gerçekleştirmişlerdir. Malzeme olarak Dupont firmasının aramid elyaf markası Kevlar, Fibertex firmasının cam elyaf ürünü S-cam elyaf kullanılmıştır. Elyafa epoksi, elle yatırma yöntemi (hand lay-up) tatbik edilmiştir. Sonuç olarak mekanik testlerden elde edilen verilere göre epoksi ile işlenmiş Kevlar ve S-cam elyaf hibrid kompozitin mukavemet ve özgül sertlik bakımından iyi değerlere sahip olduğu gözlemlenmiş, endüstride yapı kompozitlerine alternatif olarak kullanılabileceği değerlendirilmiştir.

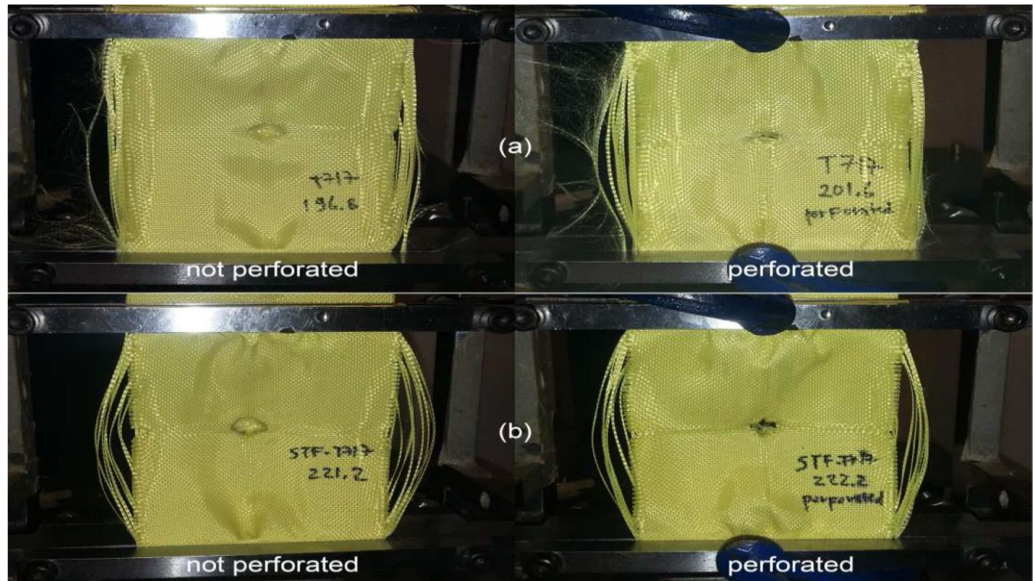
Yeh ve arkadaşları (2019) 15 nm SiO₂ ve PEG-200 den %20 ile %50 arasında değişen konsantrelerde üretilen STF' leri 223 g/m² yüzey alanına sahip Kevlar kumaşa tatbik etmişler ve 4 er katmandan oluşan numune üretmişlerdir. Kompozitlerin mekanik özellikleri 180 m/s hızında balistik delinme testi ve bıçak düşme kulesi testlerine tabi tutularak incelenmiştir. Balistik penetrasyon testleri açıkça STF işlenmesi ile enerji dağılımının artırabileceğini göstermiş olup işlenmemiş bir balistik koruyucu plakaya oranla ağırlığın %37 azaltılabileceği gözlemlenmiştir. Bıçak düşme kulesi testlerine göre ise STFnin %20 oranında enerji emilimini arttırdığı ifade edilmiştir.

Hasanzadeha ve arkadaşları (2017) yaptıkları çalışmada STF emdirilmiş yüksek modüllü Polipropilen (HMPP) kumaşların hem deneysel hem de sayısal olarak balistik darbe direncini incelemişlerdir. Numunelerin her biri dörder kat olacak şekilde hazırlanmıştır. Gaz tabancası ile NIJ-01.01.04 balistik test standartlarına göre ve 90 m/s atış hızı altında gerçekleştirilen testlerde STFnin balistik performansı kayda değer bir şekilde arttırdığı değerlendirilmiş olup işlenmemiş HMPP kumaşlarda delinme olurken STF işlenmiş HMPP kumaşlarda delinme olunmadığı görülmüştür (Şekil 2.9). Ek olarak arka tarafta oluşan travmanın işlenmemiş kumaşa kıyasla %40 oranında azalma olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 2.8. STF emdirilmiş HMPP ile düz HMPP kumaşların balistik test sonrası delinme görüntüleri (Hasanzadeha ve ark., 2017) a) Emdirilmemiş HMPP ön kat, b) Emdirilmemiş HMPP arka kat, c) STF-HMPP ön kat, d) STF-HMPP arka kat.

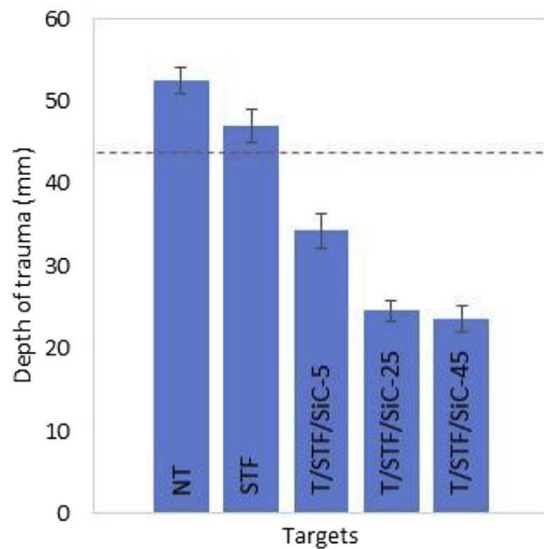
Haris ve arkadaşları (2015) da benzer bir çalışma olarak 285 g/m² Twaron marka aramid elyafa 12 nm SiO₂ ve PEG-200 den üretilmiş STF tatbik ederek balistik darbe dayanımlarını incelemişlerdir. İki kattan oluşan numunelere yapılan atışlarda işlem görmemiş düz katmanlar 199.2 m/s hıza kadar dayanabilirken, %20 konsantre (ağırlıkça) STF işlenmiş kumaşların 221.7 m/s hıza kadar delinme direncine karşı koyabildiği gözlemlenmiştir (Şekil 2.10).



Şekil 2.9. STF işlenmiş Twaron ile işlenmemiş kumaşların balistik test sonrası delinme görüntüleri (Haris ve ark., 2015) a) İşlenmemiş Twaron ön ve arka katman görüntüsü, b) STF-Twaron ön ve arka katman görüntüsü.

Faur-Csukat (2006) termoset bir malzeme olan epoksi ile yaptığı çalışmalarda iki farklı epoksi malzemeyi karbon elyaf, E-cam elyaf, S-cam elyaf, Kevlar ve UHMWPE elyafa tatbik etmiştir. Kullanılan epoksilerin birbirinden farkı reaksiyon sona erdikten sonra birinin diğerine oranla daha rijit bir yapı sahip olması olarak belirtilmiştir. 10 m/s ile 20 m/s arasında gerçekleştirilen düşük hızlı balistik test sonuçlarına göre matrisin esnekliğinin kompozit yapıların enerji yutma kapasitesini büyük ölçüde etkilediği kanıtlanmıştır. Sert epoksi matrisli kompozitler, esnek epoksi matrisli kompozitlere kıyasla daha düşük balistik performans sergilemişlerdir.

Gürgen ve Kuşhan (2017) ise Avila ve arkadaşları (2018)'nin yapmış olduğu çalışmaya benzer tek faz ve çift faz STF işlenmiş numuneler üzerinde balistik incelemelerde bulunmuşlardır. 400 g/m² yüzey yoğunluğuna sahip Twaron marka aramid elyafa 20 nm boyutundaki SiO₂ + SiC ve PEG-400 ile hazırlanan tek ve çift fazlı STF tatbik edilmiştir. 6, 8, 12 ve 16 kattan oluşan işlenmemiş numunelere yapılan atışlarda sadece 16 katmandan oluşan numunenin mermiyi durdurabildiği görüldüğü için tüm numuneler 16 kat olacak şekilde hazırlanmıştır. Her biri 16 katmandan oluşan numunelere 5 metre mesafeden 9 mm Parabellum mermi ile yapılan atışlarda en iyi balistik performansın %20 STF konsantrasyonuna ağırlıkça %45 SiC eklenen çift fazlı numunenin sahip olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 2.11).



Şekil 2.10. 9 mm mermi ile balistik test atışı yapılan numunelerin travma derinlikleri.

Tablo 2.10. STF işlenmiş Kevlar Kompozitlerin Farklı Deneysel Sonuçları

Numerical Investigations on Shear Thickening Fluids (STF) Treated Fabric Composites								
Reference	Sample Materials				Layer	Test Type		
	STF			Fabric & Density (g/m²)				
	Aerosil Diameter	PEG (g/mol)	Aerosil - PEG Concentration					
Khodadadi et al. (2019)	500	N/S	35 wt. %	Aramid 183	4	High Velocity Impact Test		
						Projectile Velocity (m/s)	Energy Absorption(J)	Penetration (mm.)
						157	77.46	N/S
						Yarn Pull Out Test		
						Speed (mm/min.)	Peak Load (N)	
						100	16.30	
Gürgeç and Kuşhan (2017)	20	400	20 wt. % + 5 wt. % SiC	Aramid 400	16	Ballistic Test - NIJ 0101.06 - Level IIA		
						Projectile Velocity (m/s)	Energy Absorption(J)	Penetration (mm.)
						330	413.09	35
						Yarn Pull Out Test		
						Speed (mm/min.)	Peak Load (N)	
						100	11.00	
Avila et al. (2018)	100	N/S	25 % w/w STF + 75 % w/w CaCO3	Aramid 144	19	Ballistic Test - NIJ 0101.06 - Level II		
						Projectile Velocity (m/s)	Indentation mark/Mass [mm/g]	Trauma Cavity volume/Mass [mm3/g]
						376.73	0.08	21.66
Yeh et al. (2018)	15	200	40 wt. %	Aramid 0.223 g/cm2	4	High Velocity Impact Test		
						Projectile Velocity (m/s)	Energy Absorption	Penetration (mm.)
						250	52.11	NA
						Yarn Pull Out Test		
						Speed (mm/min.)	Peak Load (N)	
						80	35.34	
Haris et al. (2014)	12	200	20 wt. %	Aramid 285	2	Ballistic Test - NIJ 0101.06 - Level II		
						Projectile Velocity (m/s)	Indentation mark/Mass [mm/g]	Trauma Cavity volume/Mass [mm3/g]
						221.2	Not perforated	Not perforated

Majzoobi ve Zaheri (2017) ise epoksi matris ile üretilen kompozitlerin, epoksi işlenmemiş kumaşlara kıyasla göstermiş olduğu balistik performansı incelemişlerdir. Deneylerinde 1.44 g/cm³ yoğunluğa sahip Kevlar kumaş ile Araldite LY 5052/Aradur 5052 adında epoksi kullanmışlardır. Bez ayağı dokuma Kevlar ile Kevlar/epoksi numunelerine 60 m/s ile 178 m/s ve 76 m/s ile 140 m/s arasında artan hızlarla atış testleri yapılmıştır. 140 m/s düzeyinde darbe hızı için Kevlar kumaşı, mermi enerjisinin %100'ünü absorbe ederken (delinme yok), Kevlar/epoksi kompoziti, darbe enerjisinin yalnızca %50'sini absorbe edebilmiştir. Bunda kullanılan malzemeler ve test koşulları için Kevlar kumaşı ve Kevlar/epoksi kompoziti için balistik limit sırasıyla 140 ve 64 m/s olduğu gözlemlenmiş ve sonuç

olarak çekme ve delme testleri, Kevlar/Epoksi kompozitin daha yüksek mukavemete sahip olmasına rağmen, Kevlar kumaştan daha düşük deformasyona uğradığını ortaya koymuştur.

2.4 Balistik Koruyucu Plakalarda Darbe Dayanımına Etki Eden Parametreler

Tabiei ve Nilakantan, (2008) balistik koruyucu malzemelerle yapılan testler sonucunda darbe dayanımına etki eden parametreleri kullanılan malzeme özellikleri, kumaş yapısı (dokuma tipi), tabaka sayısı (katman), mermi geometrisi, darbe hızı, sürtünme ve sınır koşulları olarak sınıflandırmıştır.

Balistik dayanıma etki eden faktörlere değinen diğer bir araştırmada Gellert ve arkadaşları (2000), parametreleri hedef ve mermi özellikleri açısından iki ana başlık altında toplayarak Tablo 2.10 da görüleceği üzere alt başlıklar ile detaylandırmışlardır.

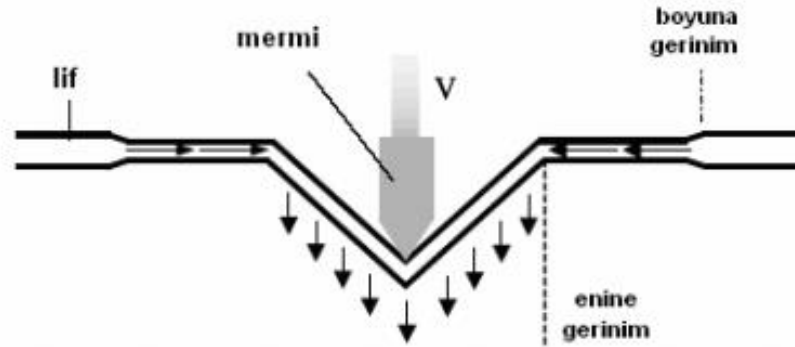
Tablo 2.11. Mermi ve hedef yönünden balistik performans parametreleri (Gellert ve ark., 2000)

HEDEF	Malzeme Özellikleri ve Yapısı	Elastisite Modülü
		Alansal Yoğunluk
		Kalınlık
		Tabaka Sayısı
MERMİ	Fiziksel Özellikler	Ağırlık
		Kalibre
		Uç Geometrisi
		Sertlik
		Hız
		Vuruş Açısı

2.4.1. Hedef malzemenin yapısı ve özellikleri

İster dokuma ister dokuma olmayan karbon türevi lif ve polietilen lif yapılardan oluşan balistik kullanım maksatlı üretilen kompozit malzemelerin koruyucu özellikleri, liflerin fiziksel özelliklerine göre değişiklik göstermektedir. Kompozit bir plakanın yüksek ve düşük hızlardaki çarpma etkisine gösterdiği direnç lifin elastiklik modülü, kopma uzaması gibi lif özellikleri ile lifin bu kompozit yapı içerisindeki kullanım şekline ve kompozitin alansal yoğunluğuna bağlıdır (Campos ve ark., 2003).

Kullanılan kumaş yapısı ile de ilgili olarak Yumak ve arkadaşları (2013), bir malzemenin genel özelliklerini belirlemek için o malzemeyi oluşturan birimlerin incelenmesi gerektiğini belirterek, kumaşı oluşturan en küçük yapı olan lifin özellikleri, önce ipliğe, iplikten örgüye iplikten kumaşa aktararak bir dizi zincir halinde devam ettiğini ve bu birimlerin bireysel özellikleri teşekkül ettikleri malzemede farklı (düşük veya yüksek) performans gösterebileceğini ifade etmişlerdir. Lifin elastisite modülü ne kadar yüksek olursa, oluşacak deformasyonun yayılması o kadar hızlı olmaktadır. Sistemin enerji absorbe edebilme yeteneği, lifin elastisite modülü ile doğru orantılıdır. (Briscoe ve Motamedi, 1990).



Şekil 2.11. Darbe sonrası tek bir lifte gerçekleşen etki (Cheeseman ve Bogetti, 2003).

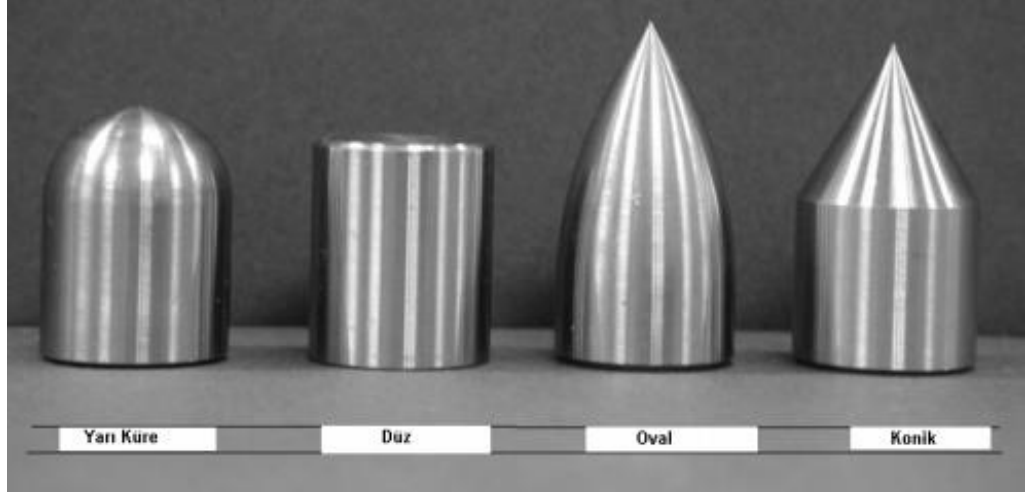
Sistemin spesifik enerji emilimi ise merminin çarpma anındaki toplam kinetik enerjisi ile malzemenin alan yoğunluğuna bağlıdır. Dolayısı ile katman sayısı arttıkça matris ve kumaş ağırlıklarından ötürü yoğunlukta doğru oranla artarak balistik dayanıma olumlu etki yapmaktadır. Larsson ve Svensson, (2002) çalışmalarında, balistik darbenin çok katlı dokuma yapılarına etkisinin, katlar arası açılma ile kompozit yapının dayanımı yönünden negatif şekilde olabildiğini ancak

enerjinin dağıtılması yönünden pozitif bir etki yarattığını gözlemlemişlerdir. Böylece tabakalı kompozitlerde darbenin etkisi ve meydana gelen hasar tabakaların yapısına, cinsine ve matrisin sünek davranışına bağlı olduğu ifade edilmektedir.

2.4.2 Projektilin fiziksel özellikleri ve hedefte yarattığı etki

Günümüz teknolojisinde güvenlik güçlerin tarafından kullanılan birçok değişik silahlar geliştirilmiştir. Bununla paralel olarak yeni teknoloji silahlarda kullanılmadığı için hız, şekil, çekirdek yapısı gibi özellikleri birbirinden çok farklı, değişik amaçlara hizmet eden birçok mermi türü geliştirilmiştir. Geliştirilen yeni mermi ve silah cinsine paralel olarak savunma sanayinde de balistik koruyucu malzemelerin gelişimi üzerine her geçen gün yeni tasarımlar geliştirilmeye devam edilmektedir. Tasarım esnasında balistik koruyucu malzemenin özelliklerini, tehlike arz eden mühimmatın özelliklerini bilerek geliştirmek oldukça önemlidir. Merminin hedefe penetrasyonu ve deformasyonu; merminin yapısal özelliklerine, uç geometrisine ve hızına, çekirdek malzemesi ve kaplama özelliklerine bağlıdır.

Balistik koruyucu kompozit yapıların delinmesine etki eden en temel unsurların başında merminin uç geometrisi gelmektedir. Merminin yüksek hızla gelerek zırha çarpması esnasında hedef üzerinde baskı ve kesme kuvvetine neden olarak koruyucu plaka üzerinde delinmeye sebep olur. Mermi yavaşlayarak plakayı deforme etmeye başlar ve bu durum delaminasyona ve liflerin çekilmesine neden olur. Bu esnada merminin plakaya temas yapacağı mermi ucu geometrisi basıncı arttırıp azaltacağı için deformasyon ne ölçüde oluşacağı konusunda oldukça önem arz etmektedir (Jovicic, 2003). Naik ve Doshi (2008), mermi geometrisinin etkisi incelendiğinde mermi ağırlığı, mermi yarıçapı ve mermi uç geometrisi etkileri incelenmesi gerektiğini ifade etmişlerdir. Sabit kütledeki farklı yarıçaplarda aynı mermi geometrisine sahip mermiler ile yapılan deneyler sonucunda görülmüştür ki, artan mermi yarıçapıyla balistik limit hızı artmaktadır. Sabit yarıçap ve aynı mermi geometrisine sahip mermiler ile yapılan testlerde balistik hız limitinin artan kütleyle birlikte düştüğü görülmüştür.



Şekil 2.12. Balistik testlerde kullanılan farklı mermi ucu geometrileri (Tan ve ark., 2003).

Balistik plaka üzerinde delinme esnasında meydana gelen hasarın büyüklüğünü etkileyen mermi geometrisinin, perforasyona (Delinme) enerjisine de etkisi büyüktür. Keskin kenarlı projekliller yüksek hızlarda yapıyı esnetip uzatarak delmek yerine keserek delme eğilimindedirler. Düşük çarpma hızlarında koruyucu yapı geniş bir alanda buruşmaya ve gerilmeye uğrar, bu da enerjinin dağıtılmasına yardımcı olur. Yüksek hızlı darbelerde ise hasar bölgeseldir ve lifler yeterli derecede enine yönde uzamadan delinme gerçekleşir. Yüksek hızlarda sivri uçtan küt uca gittikçe merminin yavaşlatılması daha kolay olmaktadır. Küt uçlu mermiler vuruş esnasında daha fazla iplik ile temas etmekte ve dolayısıyla enerji daha çabuk yayılmaktadır. Sivri uçlu ve konik uçlu mermiler ise daha az lifle temas ederek sıyrılacağından absorbe edilen enerjinin miktarı daha az olacaktır. Kevlar ve yüksek moleküler ağırlıklı polietilen malzemeler ile yapılan deneylerde, yüksek hızlardaki çarpmanın lifleri makas gibi kestiği, yapının eridiği gözlenmiştir (Gellert ve ark., 2000).

Uslu (2007), mermi ucu geometrisinin balistik malzemeler üzerine etkilerini aşağıda maddeler halinde özetlemiştir;

- Hedef malzemenin balistik hız limiti merminin uç geometrisinden doğrudan etkilenir. Bu değer yarım daire ve konik uç geometrilerine sahip mermilerde 300 m/s iken, küt mermi uçları için 185 m/s ye kadar düşer.

- Artık hız eğrileri mermi ucu geometrisinden etkilenir. Küt ve yarım daire şeklindeki mermi uçlarında mermi hızı arttıkça artık hız değerleri birbirine yaklaşır. Diğer taraftan konik mermi ucunda ise çarpma hızı arttıkça bu değer diğer iki mermi ucunu aşar.
- Küt uçlu mermilerde hedef malzeme mermiye en az direnç gösterirken yarım dairesel ve konik uçlu mermiler sırayla bunu takip eder.
- Enerjinin soğurulmasına bağlı olarak merminin hedefte bıraktığı tahribat konik uçlu mermilerde en fazla, küt uçlu mermilerde en azdır.
- Artık hız eğrileri mermi deformasyonu ile ilişkilendirilebilir. Küt mermi uçları artan çarpışma hızına bağlı olarak doğrusal bir deformasyon grafiği çizerler. Konik mermi uçları ise artan çarpışma hızıyla büyük hasar görür. Yüksek çarpışma hızlarında konik mermi uçları hedefi delmek için daha az enerjiye ihtiyaç duyarlar. Düşük çarpışma hızlarında ise küt mermi ucu daha az enerji tüketir.

Merminin çarpma hızının balistik performansa etkiyeceği aşıkardır. Fakat bununla birlikte farklı hızlarda gerçekleşen mekanizmanın incelenmesi gerekir. Daha önceden de belirtildiği üzere keskin uçlu ve yüksek hıza sahip olan mermiler kumaş kalınlığı boyunca lifleri uzatıp koparmaya zorlamak yerine keserek kopuşa neden olmaktadır (Ani bir şekilde kopmaya yol açan hız değeri kritik hız olarak tanımlanmaktadır). Düşük hız ve yüksek hız çarpmaları üzerine yapılan deneysel çalışmalara göre düşük hızlı çarpmalarda ani gerilim artışında iplikte bir kopuş olmamaktadır. Bu nedenle enine eğilme kenarlara kadar ulaşabilme imkanı bulabilmektedir. Düşük hız çarpmaları enerji dağılımını kolaylaştıran geniş eğilme ve gerilme davranışı ile karakterize edilirler. Yüksek hızlı çarpmalarda ise bölgesel hasar meydana gerçekleşmekte ve belirli enine eğilme oluşmadan iplikte kopuşlar meydana gelmektedir (Çerkez, 2007).

Yüksek hızlı çarpmalarda bir takım potansiyel mekanizmalar da gerçekleşmektedir. Tek lif Kevlar ve UHMWPE üzerinde yapılan araştırmalara göre yüksek hızlarda liflerde kesilme meydana gelmekte ve üstelik UHMWPE’de erime hasarları oluşmaktadır. Benzer sonuçlar PBO ve Dyneema® liflerinde de elde edilmiştir. Nylon panellerde balistik darbe esnasında filamentlerde yumuşama, erime, dekompoze olma, yanma ve fibrilasyon meydana gelmektedir.

Hiermaier ve arkadaşlarının (1999) lastikleri yüksek hızlı çarpmalarda korumak amacıyla geliştirilen tampon amaçlı Kevlar-epoksi kompozitinde 788 m/s hızında gerçekleşen bir çarpışmada Kevlar-epoksi kompozitinde faz değişimine maruz kaldığını, termal bozunmaya uğrayarak bütün epoksinin buharlaştığını ortaya çıkarmışlardır (Cheeseman ve Bogetti, 2003).

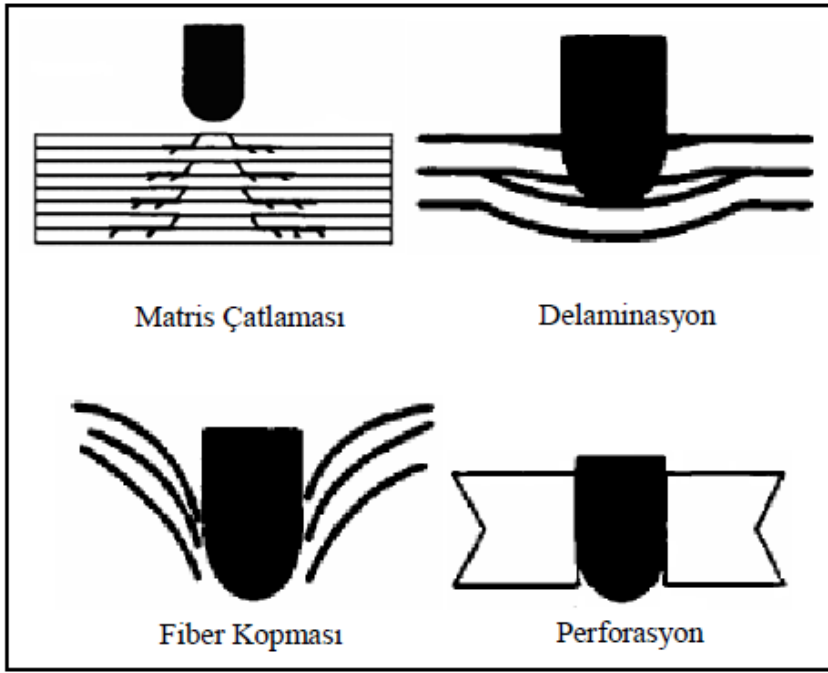
Mermi geometrisinin ve hızının yanında çekirdek sertliğinin önemli etkisi vardır. Çekirdek sertliği, çarpma hızının yaratmış olduğu darbenin etkisi ile hedef üzerinde sebep olduğu deformasyon ve delinmeyi doğrudan etkilemektedir.

Mermi çekirdekleri bakır, çelik vb. malzemeden kaplamasız olarak veya pirinç gövdeli ve bu gövdenin üzerine bakır, çelik alaşım vb. metal kaplamalı olarak da (FMJ, Full metal jacket) üretilmektedir. Kullanılma maksatlarına göre farklı alaşımlar kullanılarak imal edilen mermiler mevcuttur. Metal kaplamalı bir merminin polimer matrisli lif takviyeli bir hedefe penetrasyon kabiliyeti kaplamasız bir çekirdekten daha yüksek, ancak hedefin arkasında meydana getirdiği çöküntü miktarı daha düşüktür (Gower vd., 2008).

Balistik darbeye maruz kalan kompozit malzemelerde görülen hasarlar, kesme delinmesi, matris kırılması, delaminasyon, lif kırılması ve kopması, yarıma ve perforasyon olarak bilinmektedir (Turan, 2003). Projektilin hedefte yarattığı darbe ile birlikte, kompozit malzeme projektil altında şiddetli baskıya maruz kalır ve oluşan çukur kısmında kalınlık boyunca meydana gelen kesme gerilmelerinden dolayı deformasyon oluşmaktadır. Yüksek darbe hızlarında meydana gelen ilk hasar şekli olan kesme delinmesi kompozit yapılarda balistik darbe esnasında ilk birkaç katında görülebilir. Perforasyon durumunda darbe noktasında görülebilen ilk hasar şekli de kesme delinmesi ve bunu takiben liflerde ani kopmadır. Kesme delinmesi genel olarak mermi ucu geometrisine ve liflerin birim uzama miktarının kritik değerin üzerine çıkmasına bağlıdır (Karahana, 2008).

Delaminasyon, kompozit malzemenin her bir katmanının ayrılmasıdır. Tabakalı yapılarda en belirgin enerji soğurma mekanizması olan delaminasyonlar, tabakalar arası ara yüzey bölgelerinde, aynı katman grubundaki tabakalar arasından daha ziyade, farklı lif oryantasyonlarına sahip tabakalar arasında meydana gelen bir

hasar tipidir (Grujicic ve ark., 2006). Matris kırılması delaminasyonun başlaması açısından gerekli bir faktördür. Matris kırılmaları çapraz kesme çatlama ve eğilme çatlama şeklinde 2 tip olup, her ikisi de delaminasyon için başlangıç mekanizmasıdır. Çapraz kesme çatlama, darbe noktasının hemen dışındaki yakın çevresinde yaklaşık 45° açı yaparak meydana gelir. Meydana gelen bu açının sebebi tabakalar arası meydana gelen kayma gerilmesi ve enine normal gerilmelerin bileşke etkisidir. (Kumar ve ark., 2009)



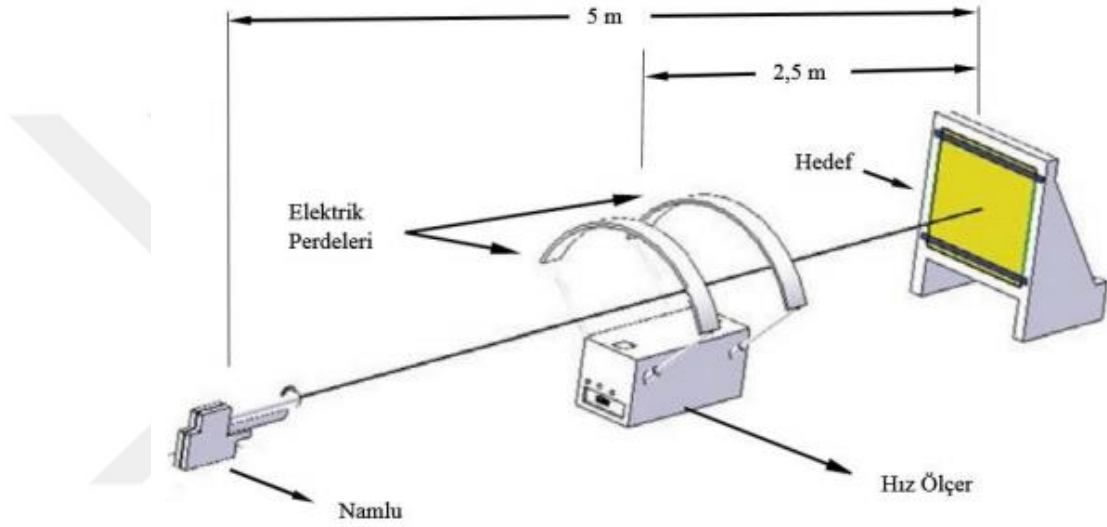
Şekil 2.13. Kompozit yapıda balistik darbenin oluşturduğu hasar şekilleri (Karakan, 2008).

2.5. Balistik Performans Değerlendirmesi

Balistik koruyucu yelek giyen bir kişiye mermi isabet ettiği sırada ortaya çıkan darbenin hayati organlara nüfuz etmesi genellikle ölümcüldür. Balistik plaka deformasyonunun kunt travmaya neden olduğu delici olmayan bir yaralanma bile ciddi iç organ hasarlarına neden olabilmektedir. Bu sebeple bir balistik koruyucu malzemeden hem merminin nüfuz etmesini önlemesi hem de darbe enerjisini absorbe ederek kunt travmayı azaltması kabiliyetlerine sahip olması istenmektedir.

Balistik etkinin araştırmaları ilerledikçe, balistik koruyucu plakaların da balistik performansını değerlendirmek için kullanılan değerlendirme yöntemleri

oluşturulmuştur. Balistik plakanın gerekliliklerine göre sıklıkla kullanılan üç test yöntemi vardır. Perforasyon (delinme) testi, Balistik limit altı test ve balistik limit testidir. Bu üç yöntem, balistik performansın farklı yönlerini değerlendirmek için uygulanır. Perforasyon testi esas olarak enerji emilimini değerlendirmektir. Balistik limit altı testi, gerçek uygulama sırasında yumuşak vücut zırhının deformasyonundan kaynaklanan kunt travmayı değerlendirmektir. Balistik limit testi, balistik performansın sınırını yani başarılı veya başarısız olma performansını değerlendirmeyi amaçlamaktadır (Xu, 2016).



Şekil 2.14. Balistik test düzeneğinin şematik gösterimi (US Department of Justice, 2008).

2.5.1 Perforasyon (delinme) testi

Balistik korumada lifin enerji sönmleme yeteneği plaka üzerindeki darbe etkisini oldukça etkilemektedir. Perforasyon testi, bir projektinin çarpması sırasında hedefi tamamen delip geçmesi ile tanımlanır. Perforasyon testinde, çarpma hızı (V_{50}) ve hedefi deldikten sonraki artık hız (V_r – residual velocity) ile ölçülebilir. Böylece, mermi enerji kaybındaki değişim, aşağıdaki denklemde gösterildiği gibi, bu iki hızdan hesaplanabilir. Farklı ağırlıktaki panellerin mermi enerji kayıplarını karşılaştırmak için kumaş panelin alan yoğunluğuna bölünen toplam enerji kaybı göstergesi de kullanılır.

Balistik limitin üzerindeki hızlar için sönmlenen enerji;

$$\Delta E = \frac{1}{2} m (v_i^2 - v_r^2) \quad \text{Joule (J)}$$

Denklemden ΔE : Balistik malzemenin sönümlediği enerjiyi, m : Merminin kütlesi, V_i : Merminin çarpma hızını, V_r : Merminin hedefi terk ettiği andaki hızı göstermektedir.

Her bir balistik malzemenin belirli bir balistik darbeye maruz kalması halinde bütün yapı göz önünde bulundurularak sergilediği spesifik enerji absorblama (SEA) değerleri hesaplanmaktadır. SEA değerinde malzemenin bütün yoğunluğu baz alınmaktadır (Çay ve ark., 2007).

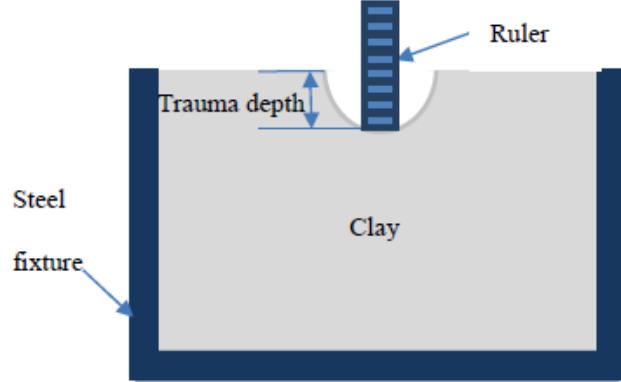
$$SEA = \left(\frac{\Delta E}{m} \right) \quad (\text{J/g})$$

Spesifik Enerji Soğurumu (SEA) = ΔE (Darbenin, projektinin vb.) toplam kinetik enerjisi / m (Yapının toplam kütlesi) (J/g)

2.5.2 Balistik limit altı (non-perforation) test

Delinmenin gerçekleşmediği durumlarda uygulanan bu testin amacı gerçek durumlarda balistik malzemenin balistik direncini anlamak için kullanılır. Normalde testte, yağ bazlı kilden yapılan ve insan vücudunu simüle etmek için kullanılan destek malzemesinin (cam macun vb.) yüzeyine bir balistik panel yerleştirilir. Atış sonrası balistik etkiden sonra, koruyucu plakanın enine sapması nedeniyle destek malzemesinin yüzeyinde bir boşluk oluşmaktadır. Bu oluşan arka travma (back face signature) balistik koruyucu malzemeyi kullanan kişiye etki eden darbenin bir göstergesidir ve kullanıcıya zarar verir. Bir balistik plakanın üzerinde oluşan kunt travması, genellikle destek malzemesi üzerinde darbenin etkisi ile oluşan boşluğun derinliği ile değerlendirilmektedir. Oluşan girintinin derinliği, Şekil 2.16'te gösterildiği gibi, destek malzemesinin ön tarafından itibaren girintinin bitimine kadar ölçülür. Yapılacak ölçümler ve değerlendirmeler, ABD Ulusal Adalet Enstitüsü (NIJ) standardında kapsamlı bir şekilde tanımlanmıştır. NIJ 0101.06 standartlarına göre ise bir personel koruması için balistik koruyucu yeleğin

darbe sonucu arka kısmında oluşturacağı maksimum travma 44 mm. olarak belirtilmiştir.



Şekil 2.15. Darbe sonrası destek malzemesi üzerinde oluşan travmayı ölçme metodu (Xu, 2016).

Tablo 2.12. NIJ-STD-0101.06 standartında belirtilen balistik koruyucular için koruma seviyeleri (US Department of Justice, 2008)

Koruma Seviyesi	Kalibre ve Mermi Tipi	Mermi Ağırlığı (g)	Mermi Hızı (m/s)	Travma Derinliği (max)
IIA (5 m mesafeden)	9 mm Tam metal kaplama yuvarlak uç mermi (FMJ RN)	8,0	373±9,1	44 mm
	40 S&W Tam metal kaplama yuvarlak uç mermi (FMJ)	11,7	352±9,1	
II (5 m mesafeden)	9 mm Tam metal kaplı yuvarlak uç mermi (FMJ RN)	8,0	398±9,1	44 mm
	357 Magnum, metal kaplı yumuşak uçlu mermi (JSP)	10,2	436±9,1	
IIIA (5 m mesafeden)	357 SIG Tam metal kaplama yuvarlak uç mermi (FMJ FN)	8,0	448±9,1	44 mm
	44 Magnum (semi jacketed hollow point) (SJHP)	15,6	436±9,1	
III (15 m mesafeden)	7,62 mm Tam metal kaplama mermi (FMJ)	9,6	847±9,1	44 mm
IV (15 m mesafeden)	30 mm zırh delici mermi (AP)	10,8	878±9,1	44 mm

Balistik limitin altındaki hızlar için sönmölenen enerji projektlin enerjisine eşittir;

$$E = \frac{1}{2} m(v^2) \quad \text{Joule (J)}$$

Atış sonucunda her bir yapıda tehlike tipine bağlı olarak katlarda meydana gelen bozulmalara göre sergilediği spesifik enerji absorblama (SEA) değerleri ise aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır (Çay ve ark., 2007).

$$\text{Spesifik Enerji Absorbu (SEA)} = \frac{\text{Darbenin kinetik enerjisi}}{\text{Bozunan yapının kütlesi}} \quad (\text{J/g})$$

Bozunan katın yoğunluğu = (Bozunan kat sayısı x Kumaş yoğunluğu)
(g/m²)

2.5.3 Balistik Limit Testi

Merminin kinetik enerjisindeki kayıp; balistik yapıyı oluşturan lifin özellikleri, elyafdaki dokumanın yapısı, mermi geometrisi vb. gibi birçok parametre ile açıklanabilir. Merminin kütlesi m , kalan hızı V_r ve V_{50} balistik limit hız olmak üzere hedeften mermiye olan enerji transferi aşağıdaki denklem ile ifade edilmektedir (Springler ve Kollar, 2003)

$$\Delta E = \frac{1}{2} m(v^2 - v_r^2) = \frac{1}{2} m v_{50}^2 \quad \text{Joule (J)}$$

Tanım olarak balistik limit; bir hedef – mermi ikilisi için hedefte tam penetrasyonun meydana geldiği ve mermi çıkış hızının (mermi kalan hızı) en küçük olduğu, maksimum mermi hızıdır. Dokuma elyaf yapılarında balistik limit sınırına kadar enerji absorbe edilir. Mermi hızının, sistem balistik limitini geçmeye başladığı andan itibaren dokuma elyaf yapının enerji absorpsiyonu diğer bir ifadeyle de merminin darbe esnasında oluşturduğu şok dalgası yayılma hızı süratle azalır. Şok dalgası vuruş noktasından itibaren çok az bir mesafeye yayılabilir (Lee et al., 2001).

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmanın amacı; Tam Faktöriyel Deney Tasarımı ile planlanan Kayma Gerilimi Altında Yoğunlaşan Sıvı (STF) ve Termoset Reçine işlenmiş, günümüz teknolojisinde balistik koruyucu plaka imalatında kullanılan yüksek performanslı kumaşlardan (Aramid ve -Yüksek Molekül Ağırlıklı Polietilen (UHMWPE) kompoze edilerek hazırlanan plakaları incelemek, darbe dayanımlarını test ve analiz etmektir.

Balistik plaka üretiminde uluslararası ulaşılması istenen en büyük Stratejik Hedef; en az ağırlık ve üretim maliyeti ile en iyi balistik dayanımı elde etmektir.

Balistik plakalarda maliyet ve ağırlığın artması, kullanılan balistik kumaşın katman sayısı ve yoğunluğu ile doğru orantılıdır. Çalışmanın birinci hedefi Tam Faktöriyel Deney Tasarımı'na uygun formüle edilmiş planlı standart örnekleri hazırlamaktır. İkinci hedefi ise STF ve Termoset Reçinelerin, Aramid ve UHMWPE yüksek performanslı kumaşlara tatbik edilmesi ile Deney Tasarımı'na uygun formüle edilerek hazırlanan örnekler üzerinde uygulanan darbe testlerine müteakip nasıl daha az katmanla daha hafif ve maliyeti düşük optimum balistik koruyucu plaka üretilebileceği hakkında görüş bildirmektir.

3.1 Materyal

Bu çalışmada kullanılan malzemeler, yapılan literatür araştırmaları sonucuna göre projektinin yaratmış olduğu darbe etkisini en iyi absorbe edebilen malzemelerin özellikleri dikkate alınarak seçilmiştir.

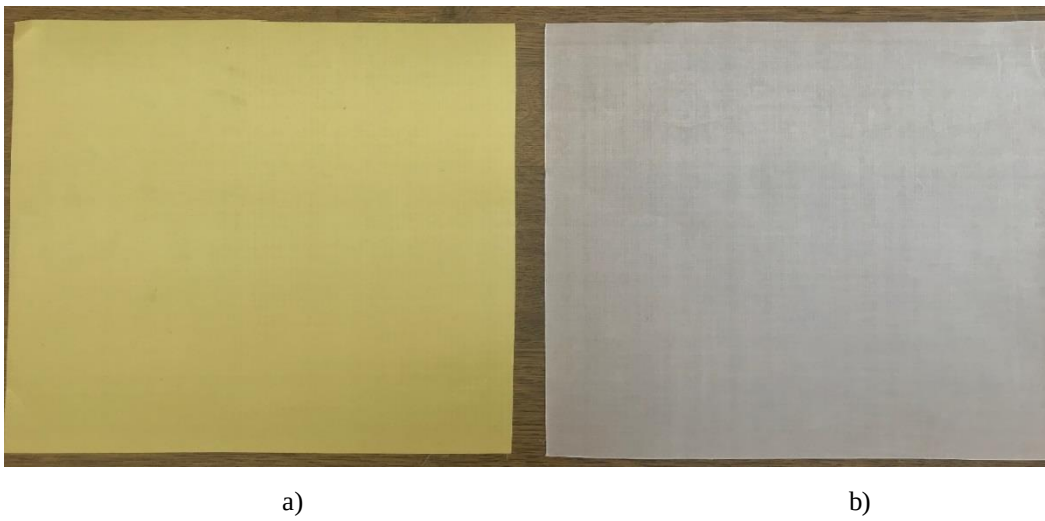
Usman ve arkadaşlarının (2020) tek yönlü, dimi, bezayağı dokuma ve saten dokuma kumaşlar üzerinde yaptıkları çalışma sonucunda, tek yönlü (Unidirectional – UD) kompozit yapının gerilme mukavemeti, geleneksel ve çift eksenli (biaxial) dokuma kompozit yapılardan daha yüksek olduğunun ve benzer şekilde, UD kompozitin diğerlerine kıyasla daha yüksek bir darbe mukavemeti sergilediği görülmüştür.

Stopforth ve Adali (2019) değişik yüzey yoğunluklarına sahip Kevlar kumaşlar üzerinde 9 mm. Parabellum mermi ile balistik test uygulamışlardır. 160-200-400 g/m² gramaja sahip Kevlar kumaşlardan en iyi darbe dayanımını yüzey yoğunluğu 200 g/m² olan numunenin sergilediğı belirtilmiştir. Yine elyaf oryantasyonu üzerine yapılan bir çalışmada en iyi enerji absorblayan dizilimin 0°/90° dizilime sahip kompozitin gösterdiği ifade edilmiştir (Sikarwar ve ark., 2017).

Baharvandi ve arkadaşları (2014) farklı parçacık boyutlarında ve konsantrasyonlarda Twaron marka aramid kumaş üzerine STF uygulamış ve numuneleri QS (quasistatic) delinme testine tabi tutmuşlardır. İnceleme sonucunda 40.1 J enerji absorblaması ile en iyi dayanımı %35 STF konsantresine sahip 12 nm silika parçalarından oluşan numune sergilemiştir.

- **Yüksek performanslı kumaşlar**

Literatür araştırması neticesinde balistik test ve darbe testi uygulanacak plaka üretiminde, Shanghai New Industry Limited Şirketinden ithal ifadesi yerine ‘edilen 2-kat (0°/90° diziliminde), non woven, 115 g/m² ağırlığında UHMWPE ve aynı özelliklerde 220 g/m² Kevlar marka aramid yüksek performanslı kumaşlar kullanılmıştır.

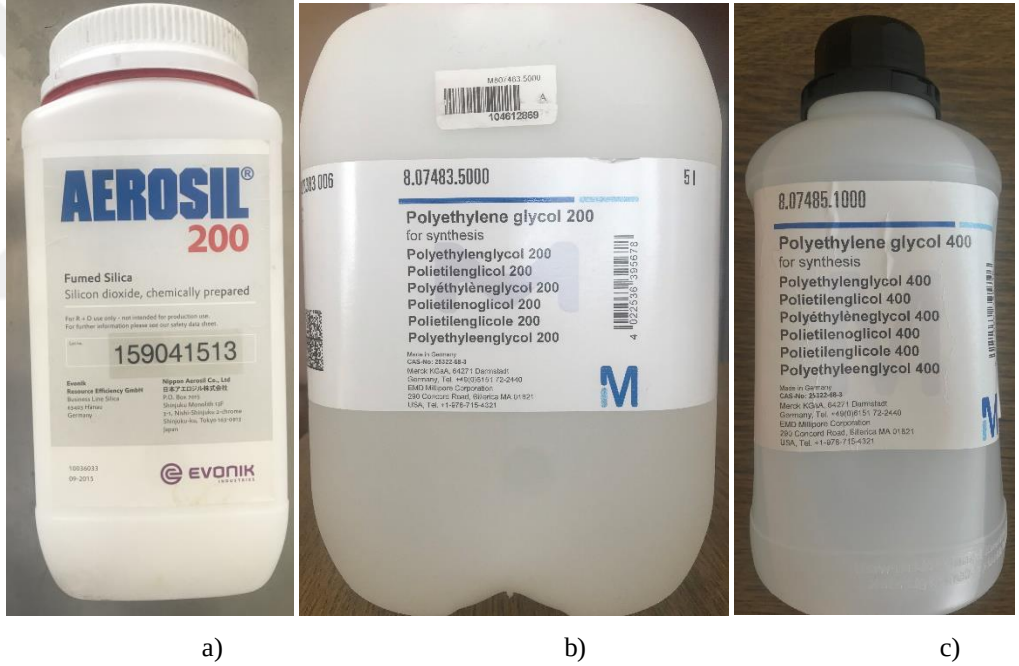


Şekil 3.1. Deneylerde kullanılan yüksek performanslı kumaşlar a) Kevlar, b) UHMWPE.

- **STF : Nano Silika / PEG karışımı**

Bir STF'nin üretilmesi için gereken bileşenler nano parçacıklar ve bir sıvı taşıyıcıdır. Bu kısımda, artan oranda silika (SiO_2) partiküllerinin (ağırlıkça %25, 35, 45) Polietilen Glikol $\text{HO}(\text{C}_2\text{H}_4\text{O})_n\text{H}$ ile karıştırılmasıyla çeşitli çözeltiler üretilmektedir.

STF hazırlığı için; $175 - 225 \text{ g/m}^2$ özgül yüzey alanına sahip 12 nm parçacık boyutlu EVONİK marka AEROSIL®200 silika, MERCK firmasından tedarik edilen 200 g/mol ve 400 g/mol molekül ağırlıklarına sahip PEG-200 ile PEG-400 Polietilen Glikoller ile seyreltici olarak Etanol kullanılmıştır.



Şekil 3.2. STF üretiminde kullanılacak malzemeler a) Aerosil 200, b) PEG-200, c) PEG-400.

- **Termoset reçine: Poliöl / İzosiyanat karışımı**

Termoset malzemenin hazırlanması için poliöl ve izosiyanat karışımı kullanılacaktır. Termoset üretiminde kullanılacak SEMPOX-1 ve SEMPOX-2 isimli Polyester Polioller SEMKİM Boya ve Kimyevi Maddeler San. Ve Tic. Ltd. Şti.'den, Metilenilenfenil Diizosiyanat (MDI) ile Polimerik Metilenilenfenil Diizosiyanat (PMDI) ise Evol Kimya Ltd. Şti.'den tedarik edilmiştir.



Şekil 3.3. Termoset üretiminde kullanılan polyester polioller.

- **Kalıplar**

STF ve termoset reçine işlenmiş numunelerin yüksek basınç altında preslenmesi için özel kalıp imal edilmiştir. Darbe testi için 15 cm çapında , NN cm derinliğinde LL malzemeden kalıp kullanılmıştır (Şekil 3.4).



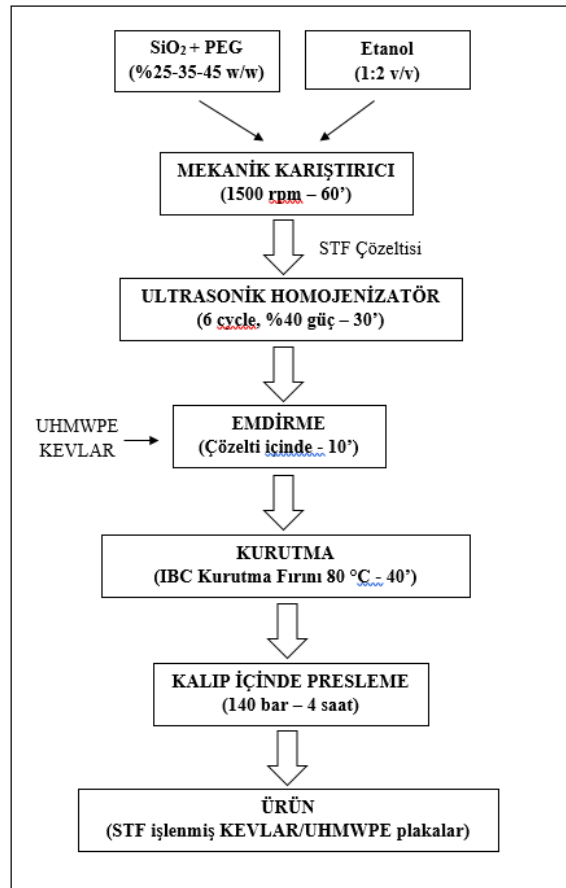
Şekil 3.4. Numune üretiminde kullanılan kalıp.

3.2 Kompozit Numunelerinin Üretimi

3.2.1 Kayma Gerilimi Altında Yoğunlaşan Sıvı (STF) emdirilmiş numunelerin üretimi

STF'li numunelerin çalışmasında ilk olarak rulo halinde temin edilen Kevlar/UHMWPE kumaşlar kalıp içerisine yerleştirmeye uygun olacak şekilde (15 cm. dairesel kalıp için 15 cm daire şeklinde; kare kalıp için 30*30 cm boyutlarında) kesilerek numunelerde kullanılacak toplam katman sayısı kadar Kevlar /UHMWPE kumaşlar herhangi bir işleme tabi tutulmadan önce virgülden sonra 2 basamak hassas terazide tartılarak kaydedilir.

STF işlenmiş plakaların üretimi aşağıdaki Üretim Akış Şeması Şekil 3.5'te gösterilen adımlar izlenerek gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.5. STF işlenmiş Balistik Plaka Üretim Akış Şeması.

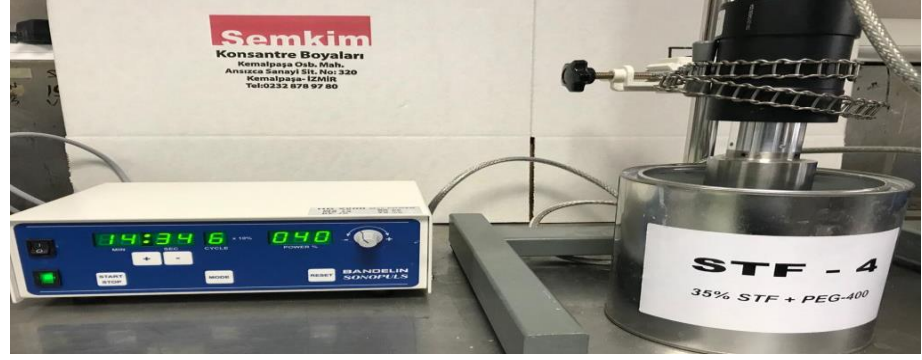
- **STF çözeltisinin hazırlanışı**

STF, ağırlıkça %25, 35 ve 45 oranlarında Aerosilin (SiO_2), PEG-200/400 ile karıştırılmasıyla elde edilir. Yeterli büyüklükteki kap içerisine belirlenen ağırlık oranlarında Aerosil ve PEG hassas terazide tartılarak eklenip, ardından seyreltme işlemi için 1:2 hacimsel oranda etanol ilave edilir. Kap içerisindeki Aerosil, PEG ve Etanol mekanik karıştırıcıda 1500 rpm de 60 dakika süre ile karıştırılmıştır (Şekil 3.6).



Şekil 3.6. STF çözeltisinin kap içerisinde mekanik karıştırıcı ile karıştırılması.

Mekanik karıştırıcıda 60 dakika süre ile karıştırılan STF çözeltisinin daha homojen bir karışıma ulaşması için, ± 2 güç ve 6 cycle ayarlarında Bandelin Sonoplus marka Ultra Sonic Homojenizatör ile 30 dakika işleme tabi tutulmuştur. Ultra Sonic Homojenizatör ile 30 dakika işleme tabi tutulduktan (Şekil 3.7) sonra STF çözeltisi emdirme işlemi için hazırdır.



Şekil 3.7. STF çözeltisinin 2 L kap içerisinde homojenize edilmesi.

- **Hazırlanan STF' nin kumaşlara emdirilmesi**

STF çözeltisinin hazırlamadan önce yerleştirileceği kalıba uygun olarak kesilerek hazırlanmış kumaşlar, etanol ile seyreltilmiş STF çözeltisinin içerisine daldırılarak 10 dakika boyunca emdirme işlemi uygulanır. Emdirme işlemine müteakip Kevlar/UHMWPE kumaşlar daha önceden 80 °C de ısıtılmış IBC Fırınının içerisine yerleştirilir ve 40 dakika boyunca kurutularak etanolün tamamen uçması sağlanmıştır. (Yeh ve ark, 2019) (Şekil 3.8).



a)



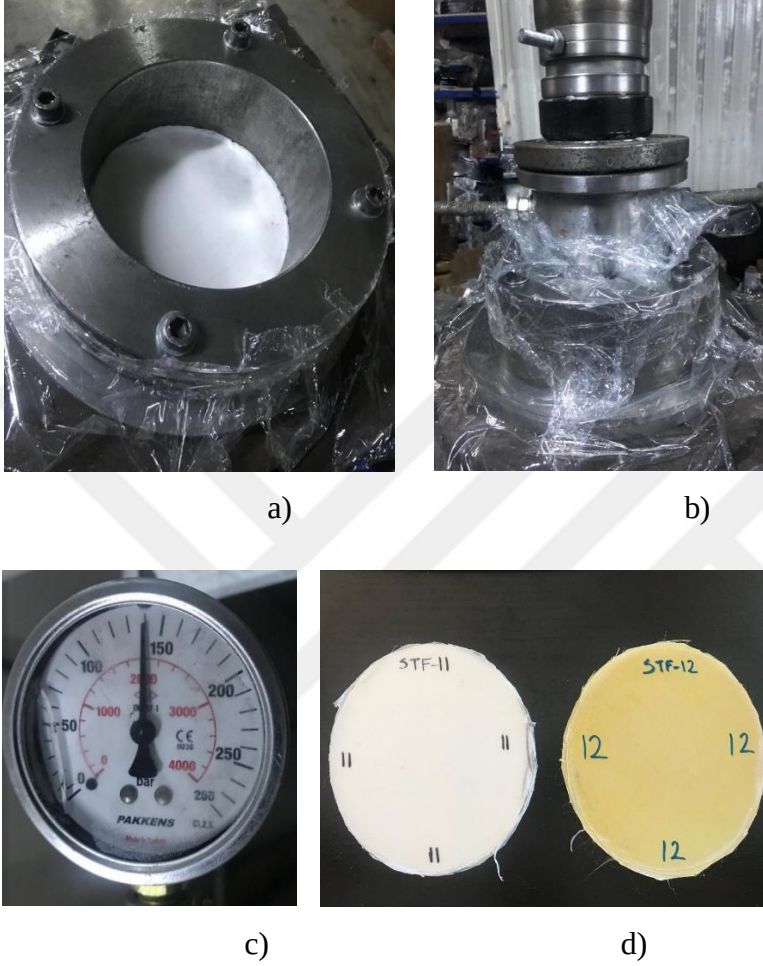
b)

Şekil 3.8. STF işlenmiş kumaşların kurutulması işlemi a) UHMWPE, b) KEVLAR.

- **STF işlenmiş kumaşların preslenmesi**

IBC Fırın içerisinde 40 dakika boyunca kurutulan kumaşlar tekrardan hassas terazide tartılarak toplam emdirilen STF miktarı kaydedilir. Kurutulan kumaşlar düzgün bir şekilde kalıp içerisine yerleştirilerek preslenir. Numuneler 140 Bar basınç altında 4 saat bekletilerek pres içinden dikkatli bir şekilde çıkartılmıştır.

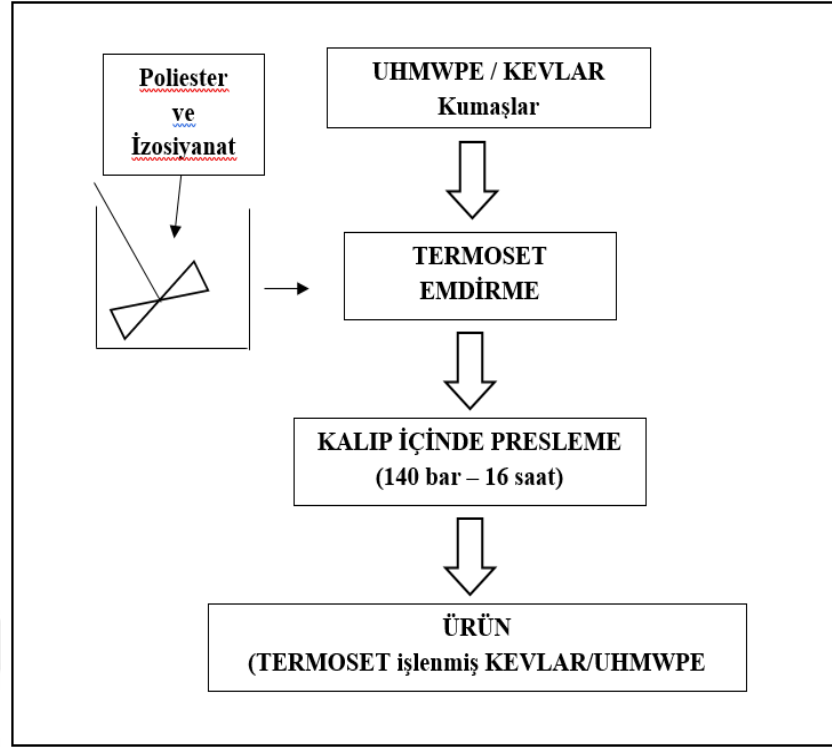
Kalıptan çıkarılan numune tekrar tartılarak pres öncesi bir farklılık olup olmadığı gözlemlenir. Numune ağırlığında bir farkın oluşmadığı görülmesi ile STF işlenmiş numune üretimi tamamlanır (Şekil 3.9).



Şekil 3.9. STF işlenmiş kumaşların Presleme işlemi ve üretilen numune örneği a) Kurutulan kumaşların kalıp içine yerleştirilmesi, b) Presleme işlemi, c) Basınç göstergesi, d) Dairesel kalıpta üretilen numuneler

3.2.2 Termoset reçine emdirilmiş numunelerin üretimi

Termoset işlenmiş plakaların üretimi ise aşağıdaki Üretim Akış Şeması Şekil 3.10 da gösterilen adımlar izlenerek gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.10. STF işlenmiş Balistik Plaka Üretim Akış Şeması.

STF’li numunelerin çalışmasında belirtildiği gibi Kevlar /UHMWPE kumaşlar kalıp içerine yerleştirmeye uygun olacak şekilde (15 cm. dairesel kalıp için 14,9 cm; kare kalıp için 30*30 cm boyutlarında) kesilir. Kesilen toplam Kevlar /UHMWPE kumaşlar herhangi bir işleme tabi tutulmadan önce virgülden sonra 2 basamak hassas terazide tartılarak kaydedilir.

- **Termoset reçinenin hazırlanışı**

Termoset malzemenin hazırlanması için polyester ve izosiyanat karışımı kullanılmıştır. Plastik bir kap içerisinde polyester ile izosiyanat 1:1 oranında karışımın rengi homojen olana kadar karıştırılır. İzosiyanat ile polyesterin karıştırılmasının ardından ekzotermik bir reaksiyon gerçekleştiği için karışımın ısınmaya başlamadan, yani reaksiyona girmeden evvel kumaşlara tatbik edilmesi önemlidir.

- **Hazırlanan termosetin kumaşlara emdirilmesi**

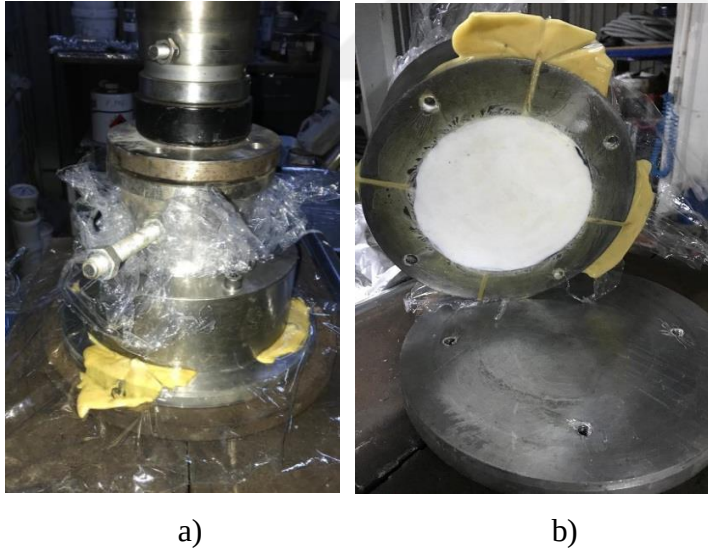
Karışım renginin homojen olmasının ardından, kumaşların sadece bir yüzüne geniş bir spatul yardımıyla kumaş üzerine yayılır. Bu yöntemin adı literatürde elle

yatırma yöntemi olarak bilinmektedir. Tüm kumaşlara tek tek aynı yöntem ile termoset malzeme aplike edilerek kalıp içerisine yerleştirilir. Termoset malzemenin reaksiyonu başlamadan tüm kumaşlar kalıba yerleştirilmiş olmalıdır.

- **Termoset işlenmiş kumaşların Preslenmesi**

Kalıp içerisine termoset ile işlenmiş yüksek performanslı kumaşlar düzgünce yerleştirildikten sonra 140 bar basınç altında 16 saat boyunca basınç altında bırakılır. Kumaşların kalıp içerisinde ilk basınca maruz kaldığı andan itibaren tüm fazlalık termoset reçine daha önceden kalıp üzerinde açılmış kanallardan dışarı atılır (Şekil 3.11). Bu sayede kumaşlara optimum miktarda termoset malzeme emdirilmektedir.

16 saat boyunca pres altında kalan kumaşlar kalıp içerisinden dikkatlice çıkarılarak virgülden sonra iki basamaklı teraziye tartılarak ne kadar termoset malzeme emdiği kaydedilir.



Şekil 3.11. Termoset işlenmiş kumaşların preslenmesi a) Fazla termoset reçinenin kalıptan dışarı atılması, b) Termosetli numunenin kalıptan çıkarılışı.

3.3 Analiz Metodları

3.3.1 Darbe testi

Termoset ve STF işlenmiş numuneler, yukarıda belirtilen üretim akış şemalarına göre, 15 cm çapındaki kalıp içerisinde, Deney Tasarımı tablosundaki

(Tablo 3.1, Tablo 3.2) standartlara ve sıraya uygun olarak toplam 12 adet STF' li, 8 adet Termosetli olmak üzere 20 adet işlenmiş numune üretilmiştir.

Tablo 3.1. Darbe Testi için hazırlanacak STF işlenmiş numunelerin Deney Tasarımı tablosu

Numune Adı	RunOrder	PtType	Blocks	Silica %	PEG	Kumaş
STF-1	1	1	1	45	400	UHMWPE
STF-2	2	1	1	35	200	UHMWPE
STF-3	3	1	1	25	400	UHMWPE
STF-4	4	1	1	35	400	KEVLAR
STF-5	5	1	1	35	200	KEVLAR
STF-6	6	1	1	25	400	KEVLAR
STF-7	7	1	1	25	200	UHMWPE
STF-8	8	1	1	35	400	UHMWPE
STF-9	9	1	1	45	400	KEVLAR
STF-10	10	1	1	25	200	KEVLAR
STF-11	11	1	1	45	200	UHMWPE
STF-12	12	1	1	45	200	KEVLAR

Tablo 3.2. Darbe Testi için hazırlanacak Termoset işlenmiş numunelerin Deney Tasarımı tablosu

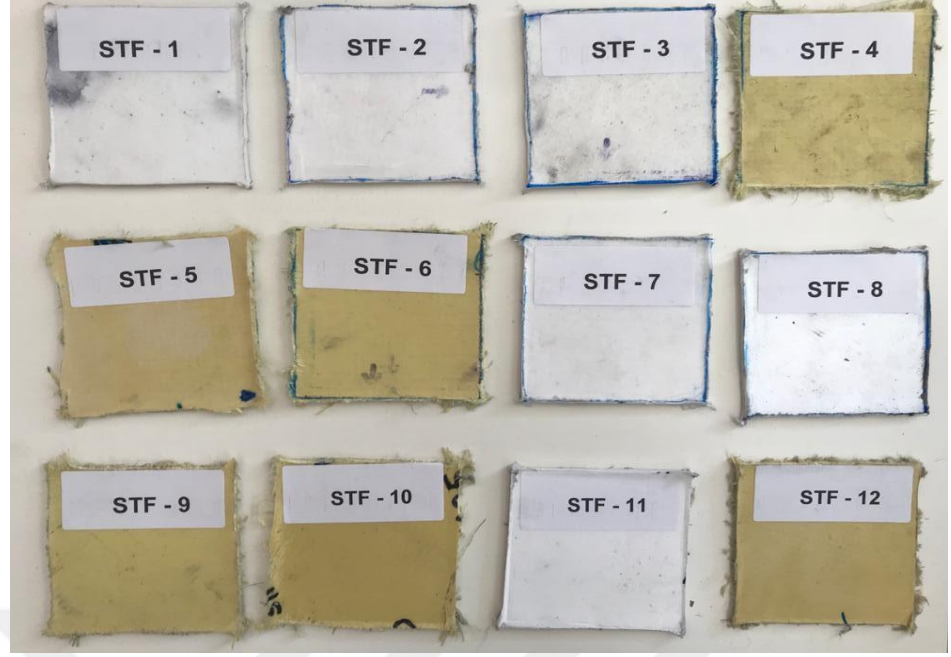
Numune Adı	RunOrder	PtType	Blocks	Poliester	İzosiyanat	Kumaş
TS-1	1	1	1	Sempox-1	PMDI	UHMWPE
TS-2	2	1	1	Sempox-2	PMDI	KEVLAR
TS-3	3	1	1	Sempox-1	MDI	KEVLAR
TS-4	4	1	1	Sempox-1	PMDI	KEVLAR
TS-5	5	1	1	Sempox-2	MDI	UHMWPE
TS-6	6	1	1	Sempox-2	PMDI	UHMWPE
TS-7	7	1	1	Sempox-2	MDI	KEVLAR
TS-8	8	1	1	Sempox-1	MDI	UHMWPE

Gürgen ve Kuşhan (2017) yapmış oldukları çalışmada, 9 mm Parabellum mermi ile yapılan tabanca atışlarında sadece 16 kat kumaşın mermiyi durdurabildiği görülmüştür. Bu sebeple Darbe testi için hazırlanan tüm numuneler 16 katman kullanılarak üretilmiştir (Şekil 3.12, Şekil 3.13). Test sonuçlarının etkisini daha iyi analiz edebilmek için ayrıca işlenmemiş halde aynı esaslarla preslenen UHMWPE ve Kevlar kumaşlardan da birer adet numune üretilmiştir (Şekil 3.14). 15 cm dairesel kalıp kullanılarak üretilen tüm numuneler darbe testine tabi tutulabilmek için 10*10 cm ölçülerinde kesilmiştir.

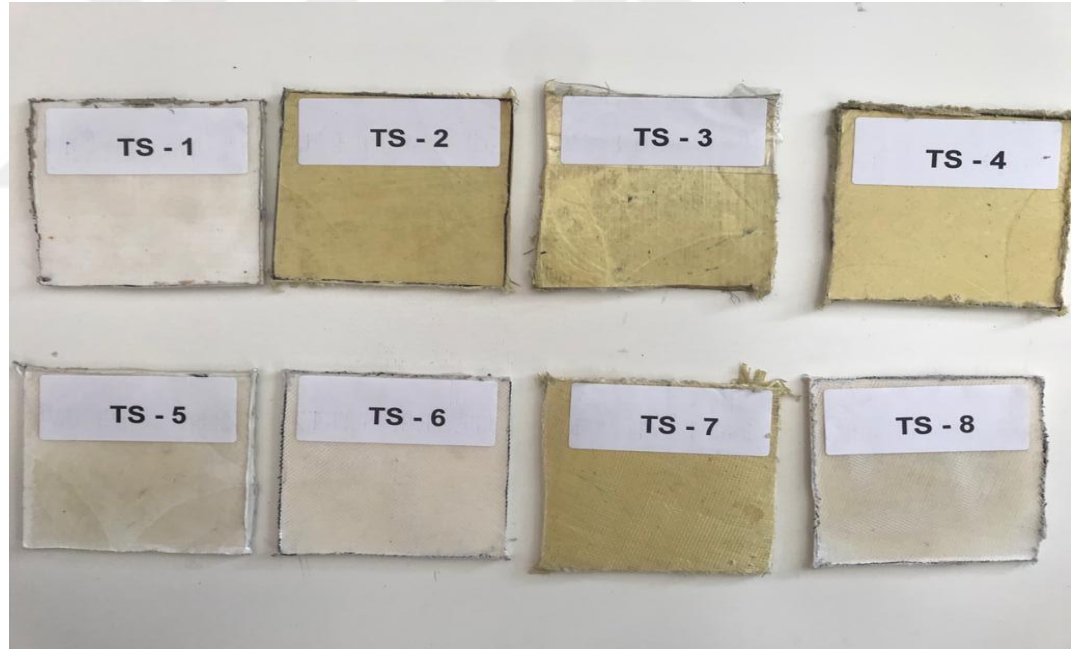
Bu çalışmada düşük hızlı darbe testleri için 9 Eylül Üniversitesi Makine Mühendisliği/İzmir- Kompozit Araştırma ve Test Laboratuvarı'ndaki **Yüksek**

Enerji Sistemli CEAST-Fractovis Plus 9350 darbe test cihazı (Şekil 3.15) kullanılmıştır.

CEAST-Fractovis Plus 9350 test cihazı ile düşük ve yüksek etkili enerjiler gerektiren testler **ASTM D3763** (An American Society for Testing of Materials (ASTM) standard metot for determination of the resistance of plastics, including films, to high-speed puncture over a broad range of test velocities using load and displacement sensors. Note: Puncture properties determined include maximum load, deflection to maximum load point, entegy to maximum load point, and total energy) **standardına uygun olarak** gerçekleştirilebilmektedir. 76 mmçapında dairesel Pneumatik kelepçe ile sıkıştırılmış numunelere darbe etkisi için kullanılan çarpma tertibatı, **22.30 mm uzunluğunda** olup, ucunda **yarı küresel** bir yapıya sahip **12.7 mm çapında bir darbe ucu** (Şekil 3.16) ile birlikte toplam ağırlığı **4926 gramdır** (Soykok ve ark., 2021). Çarpma tertibatı 22,4 kN piezoelektrik kuvvet dönüştürücünün maksimum yükleme kapasitesine bağlıdır. Testler sırasında numune üzerinde tekrarlanan darbeleri önlemek için test makinesinde geri tepme önleyici (anti-rebounding) sistemi etkinleştirilmiştir. Ağırlık düşürme test cihazı, ek kütle aracılığıyla 1800 J'ye kadar maksimum potansiyel enerji üretir ve bu ek kütle, çarpma tertibatının hızını 24 m/s'ye kadar arttırabilmektedir (Sabancı ve Karakuzu, 2013). Ayrıca cihaza bağlı bulunan iklimlendirme kabini yardımıyla darbe deneyleri -100 °C ile 150 °C arasında yapılabilmektedir. Numunelerin darbe davranışını derinlemesine analiz edebilmek için, cihaz numuneye çarpmadan hemen önce darbe hızını ölçen ve aynı zamanda veri toplamayı tetikleyen bir hız detektörü ile donatılmıştır ve testler temas kuvveti, temas süresi, sapma, deformasyon, absorbe edilen enerji değerleri gibi parametreler cihaza bağlı bulunan veri toplama sistemi (DAS) tarafından kaydedilmiştir.



Şekil 3.12. Darbe Testi için hazırlanmış STF'li numuneler.



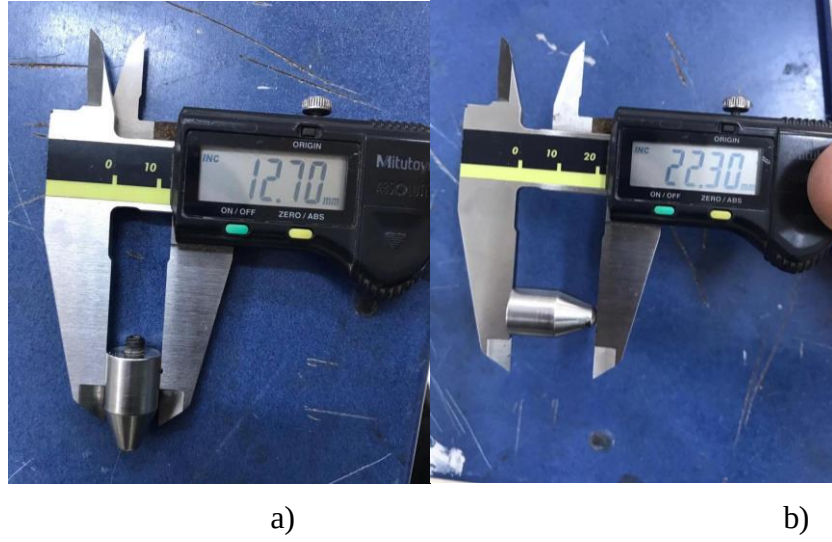
Şekil 3.13. Darbe Testi için hazırlanmış Termosetli numuneler.



Şekil 3.14. Darbe Testi için hazırlanmış işlem görmemiş numuneler.



Şekil 3.15. CEA-Test-Fractovis Plus darbe test cihazı.



a)

b)



c)

Şekil 3.16. Darbe Ucu a) Çapı, b) Boyu, c) Pneumatic Kıskaç ve Numuneye Temas Anı.

3.3.2 Darbe testi sonucunda elde edilen Kuvvet – Deformasyon Grafikleri

Bu çalışmadaki tüm darbe testleri oda sıcaklığında, yukarıda açıklanan **12.70 mm çapında ve 22.30 mm uzunluğundaki darbe ucu** ile **300 Joule enerji** uygulanarak yapılmıştır.

Özdemir ve arkadaşları (2018), yapmış oldukları benzer bir çalışmada, E-cam takviyeli termoplastik levhalar ile balsa ahşaptan oluşan sandviç yapıların düşük hızlı darbe tepkisini araştırılmış ve bu tip yeni yapıların darbe dayanımlarını

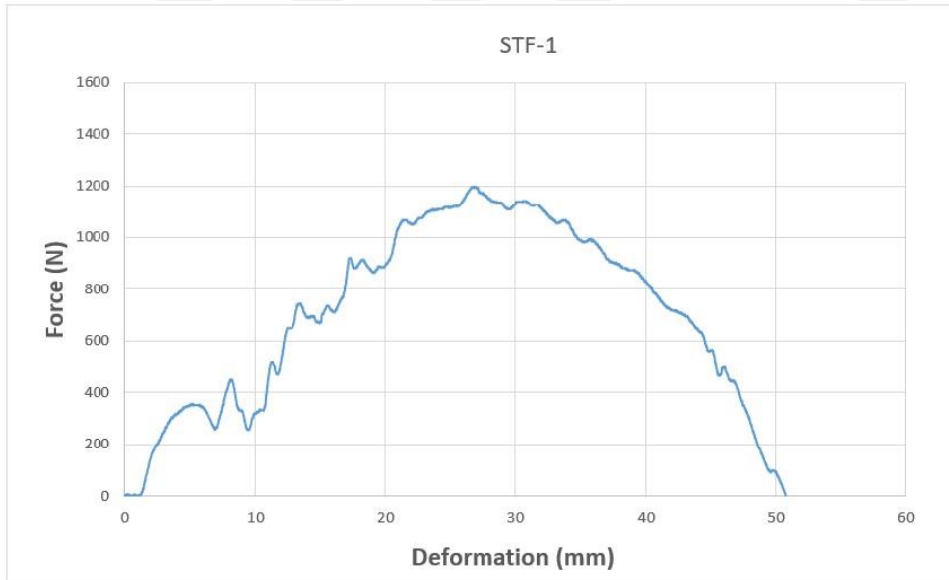
değerlendirmek için düşük hızlı darbe testlerinin yapıldığı ifade edilmiştir. Ayrıca yaptıkları çalışma sonucu, aynı darbe enerji seviyesinde uygulanan testlerden ortaya çıkan kuvvet- deformasyon grafiklerinin yorumlanması ile sağlıklı bir karşılaştırma yapılabileceği belirtilmiştir.

Belingardi ve arkadaşlarının (2008) yaptıkları benzer bir çalışma da ise güçlendirilmiş plakaların darbe test sonuçlarından yola çıkarak, absorbe edilen enerji ve maksimum temas kuvvetinin açıklanması ile malzemenin mekanik özelliklerinin yorumlanabileceği belirtilmiştir.

Yukarıda benzer çalışmalara istinaden, STF ve Termoset işlenmiş numunelerin üzerinde gerçekleştirilen darbe testi sonucunda aşağıda ortaya çıkan kuvvet- deformasyon grafiklerinden önemli katkılar ve sonuçlar çıkarılabilmektedir.

3.3.3 Darbe Test Sonucu oluşan Kuvvet – Deformasyon Grafikleri

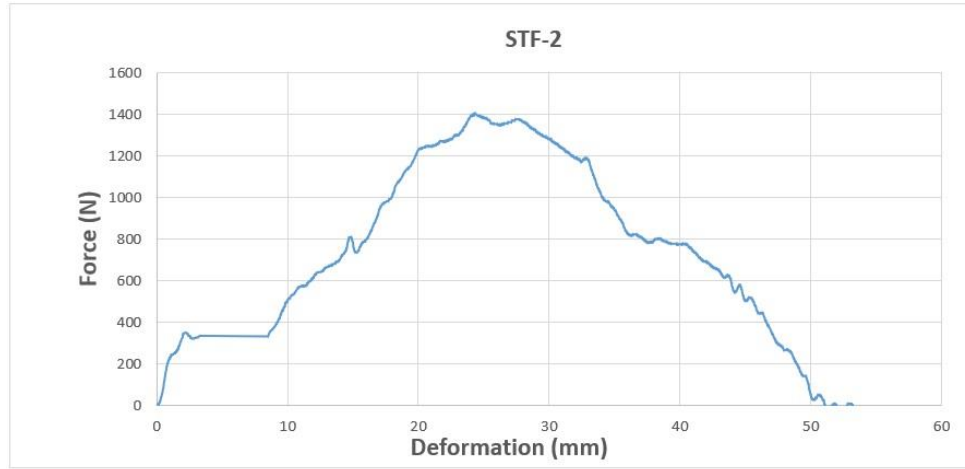
- **STF-1** (UHMWPE + PEG-400 + %45 STF)



Peak Force : 1196,2164 N

Şekil 3.17. STF-1 Numunesinin Kuvvet – Deformasyon Grafiği.

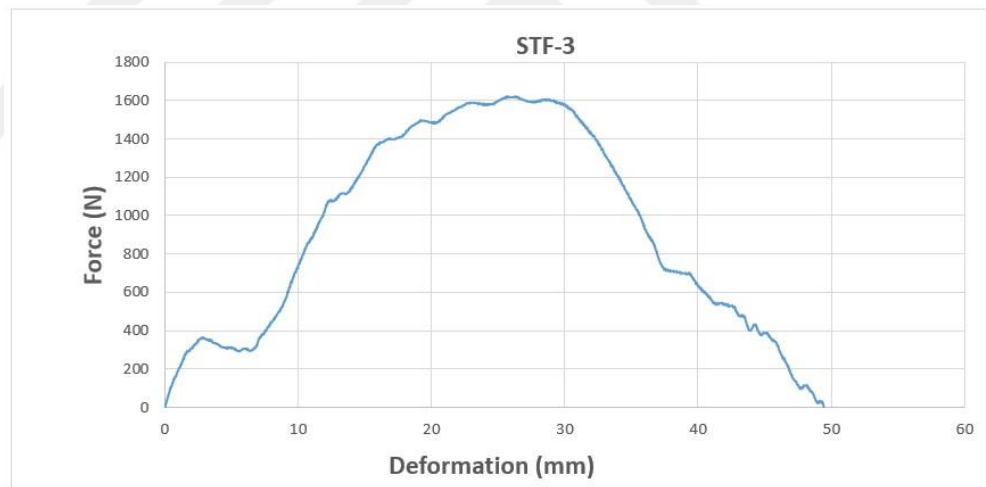
- **STF-2 (UHMWPE + PEG-200 + %35 STF)**



Peak Force : 2120,3078 N

Şekil 3.18. STF-2 Numunesinin Kuvvet – Deformasyon Grafiği.

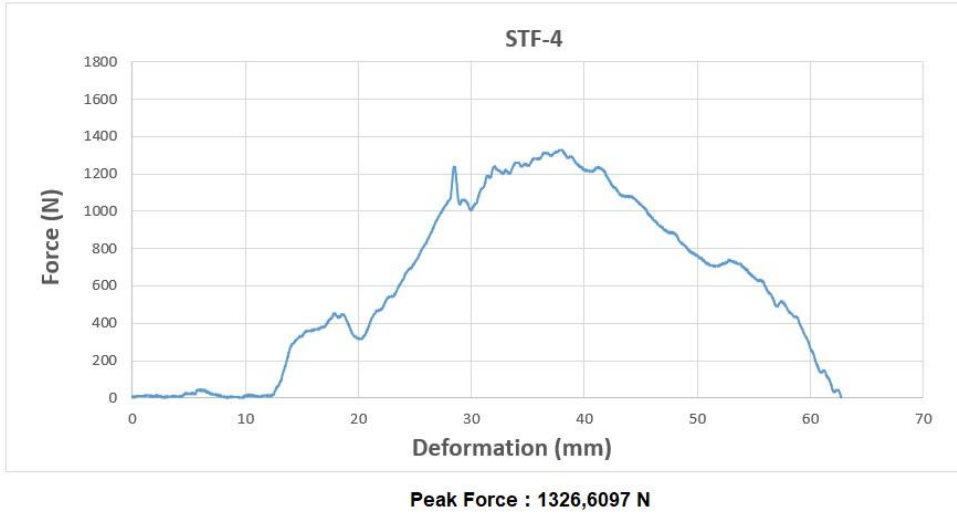
- **STF-3 (UHMWPE + PEG-400 + %25 STF)**



Peak Force : 1618,5772 N

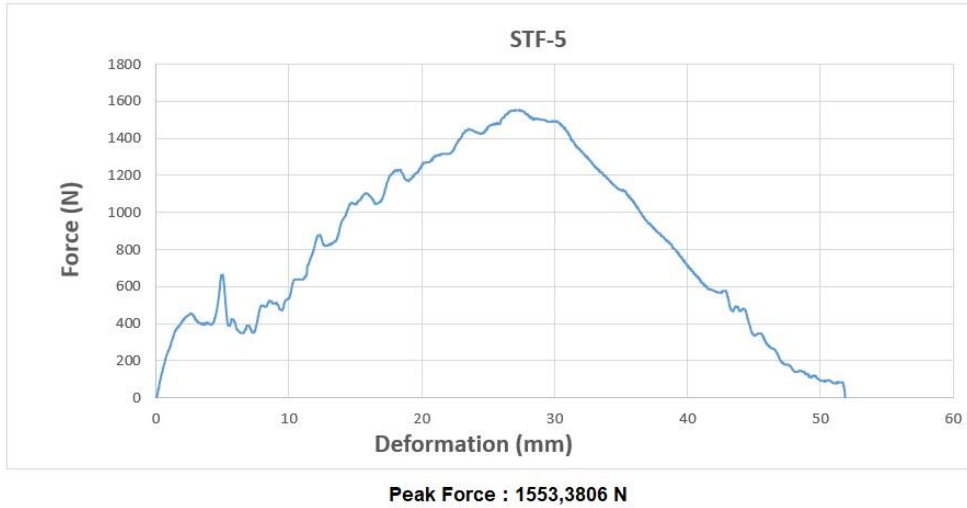
Şekil 3.19. STF-3 Numunesinin Kuvvet – Deformasyon Grafiği.

- **STF-4 (KEVLAR + PEG-400 + %35 STF)**



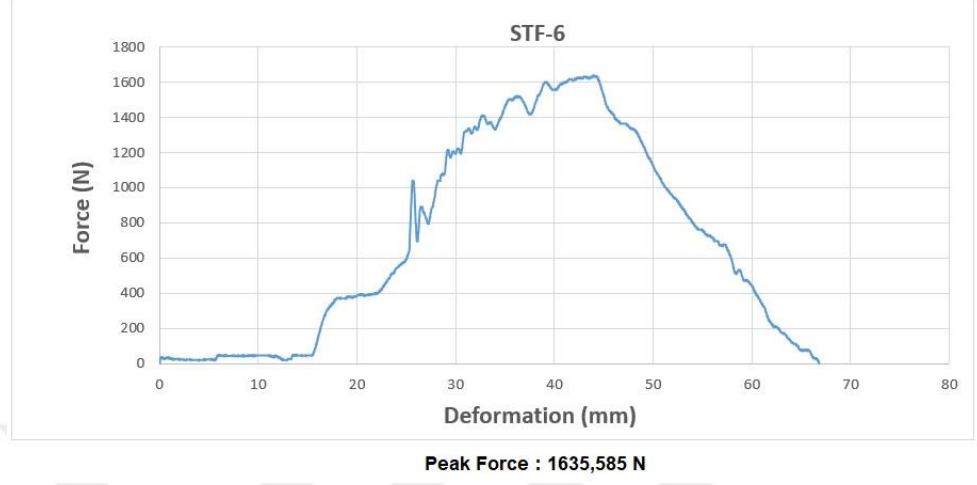
Şekil 3.20. STF-4 Numunesinin Kuvvet – Deformasyon Grafiği.

- **STF-5 (KEVLAR + PEG-200 + %35 STF)**



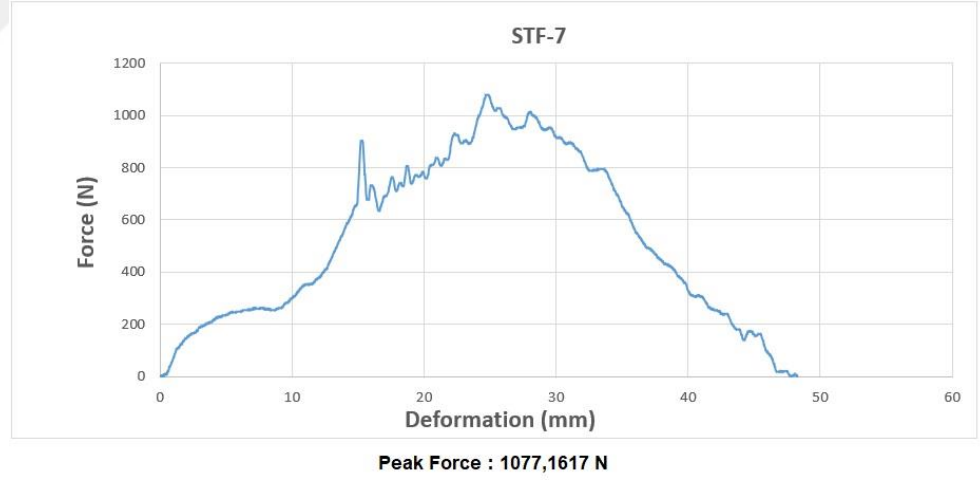
Şekil 3.21. STF-5 Numunesinin Kuvvet – Deformasyon Grafiği.

- **STF-6 (KEVLAR + PEG-400 + %25 STF)**



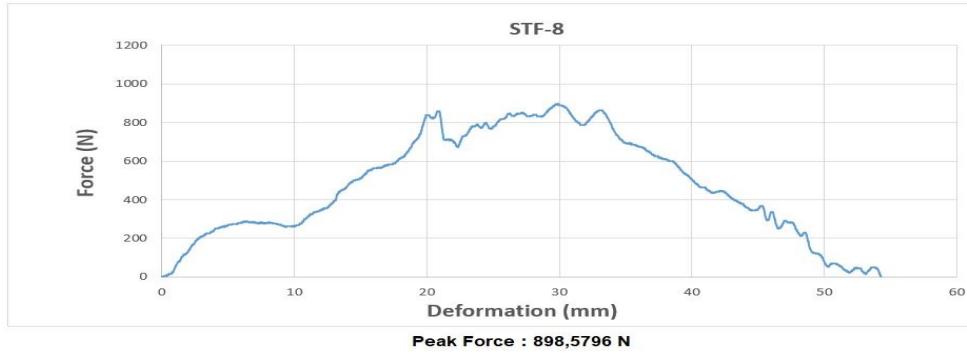
Şekil 3.22. STF-6 Numunesinin Kuvvet – Deformasyon Grafiği.

- **STF-7 (UHMWPE + PEG-200 + %25 STF)**



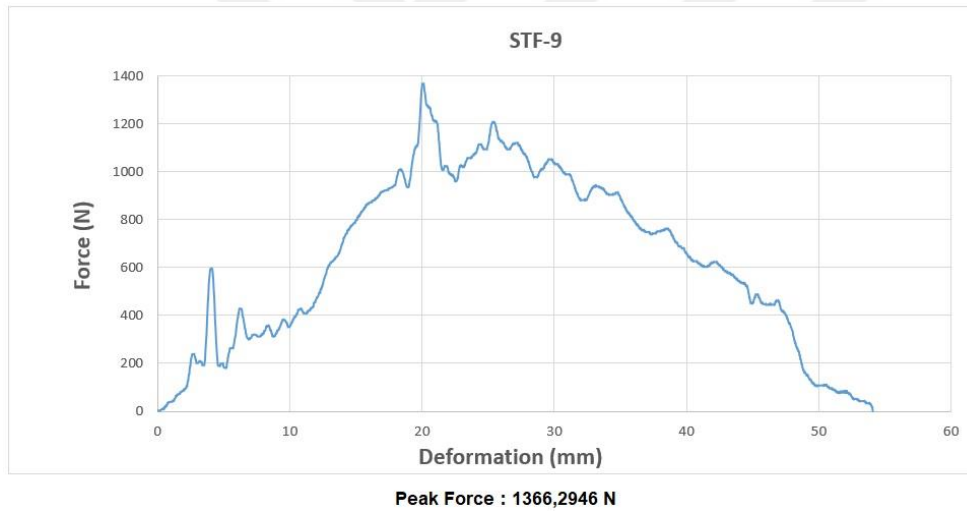
Şekil 3.23. STF-7 Numunesinin Kuvvet – Deformasyon Grafiği.

- **STF-8 (UHMWPE + PEG-400 + %35 STF)**



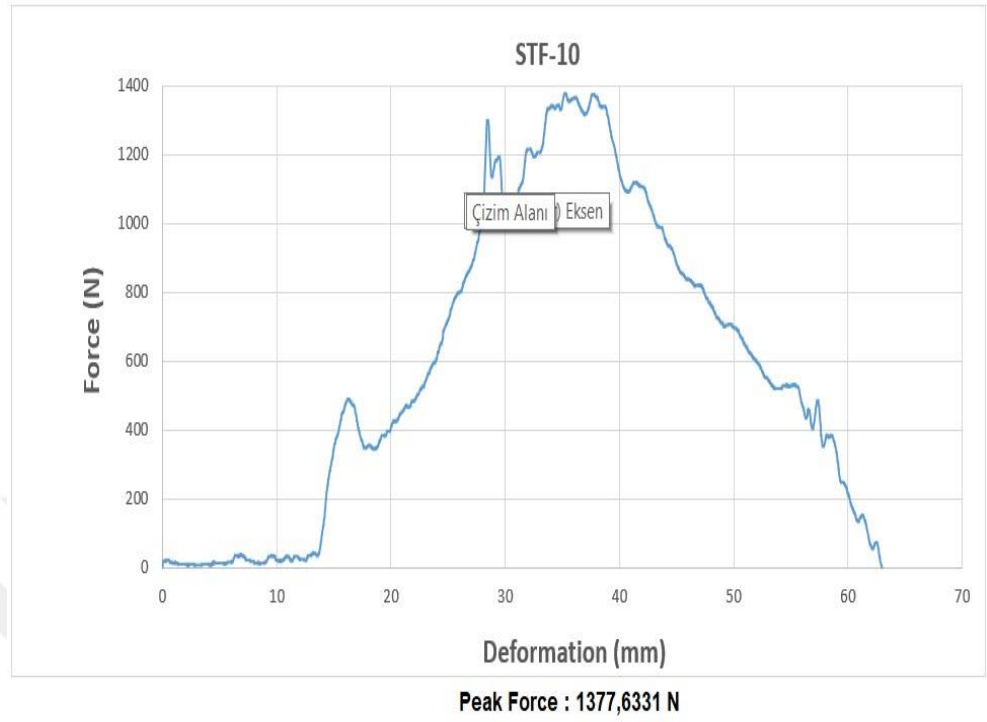
Şekil 3.24. STF-8 Numunesinin Kuvvet – Deformasyon Grafiği.

- **STF-9 (KEVLAR + PEG-400 + %45 STF)**



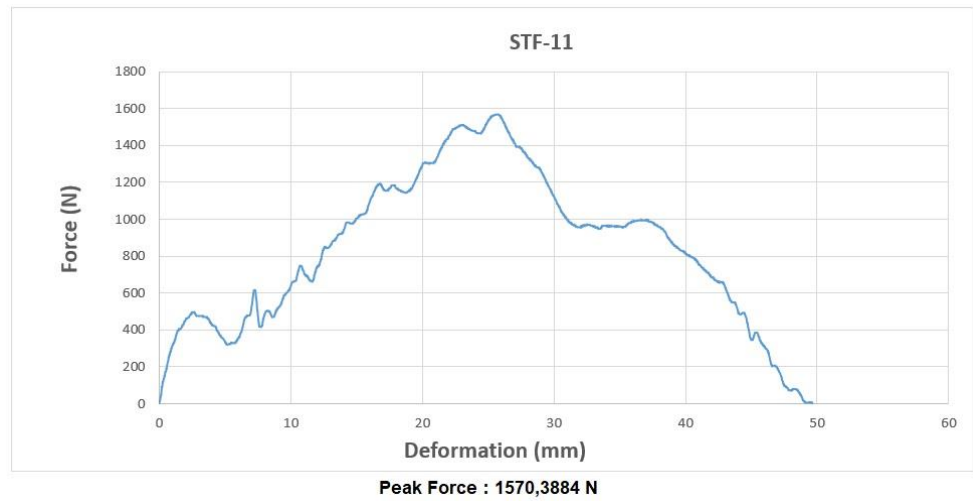
Şekil 3.25. STF-9 Numunesinin Kuvvet – Deformasyon Grafiği.

- **STF-10** (KEVLAR + PEG-200 + %25 STF)



Şekil 3.26. STF-10 Numunesinin Kuvvet – Deformasyon Grafiği.

- **STF-11** (UHMWPE + PEG-200 + %45 STF)



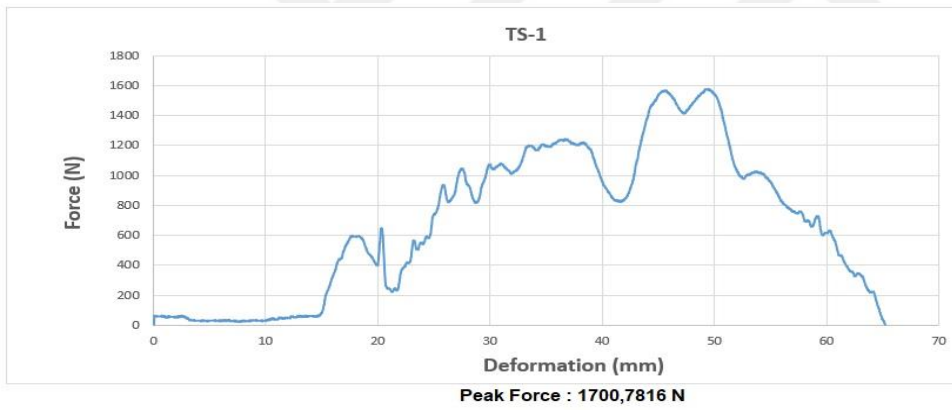
Şekil 3.27. STF-11 Numunesinin Kuvvet – Deformasyon Grafiği.

- **STF-12 (KEVLAR + PEG-200 + %45 STF)**



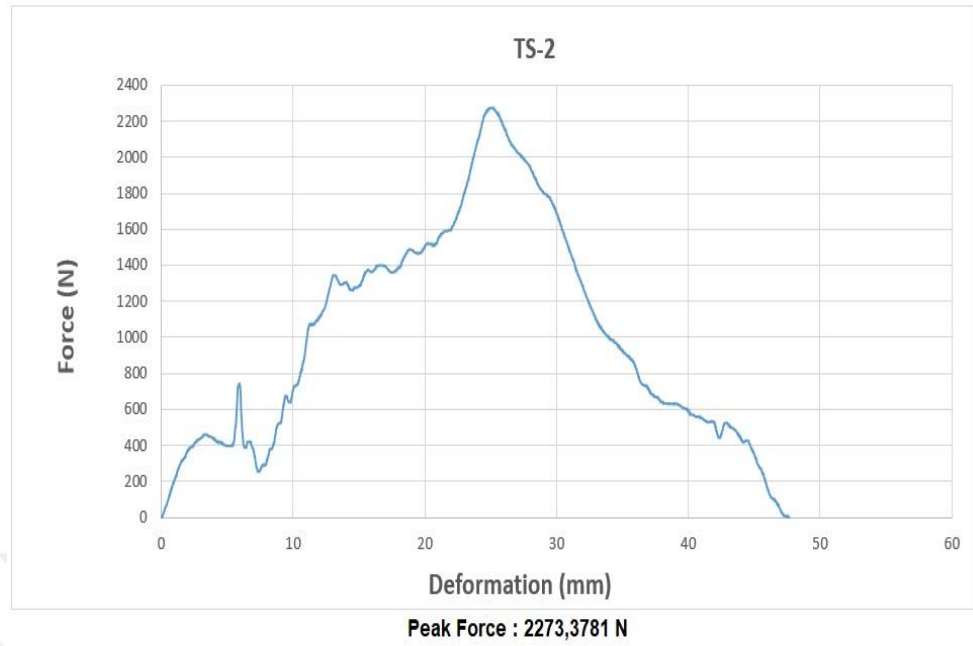
Şekil 3.28. STF-12 Numunesinin Kuvvet – Deformasyon Grafiği.

- **TS-1 (UHMWPE + P.MDI + SEMPOX-1)**



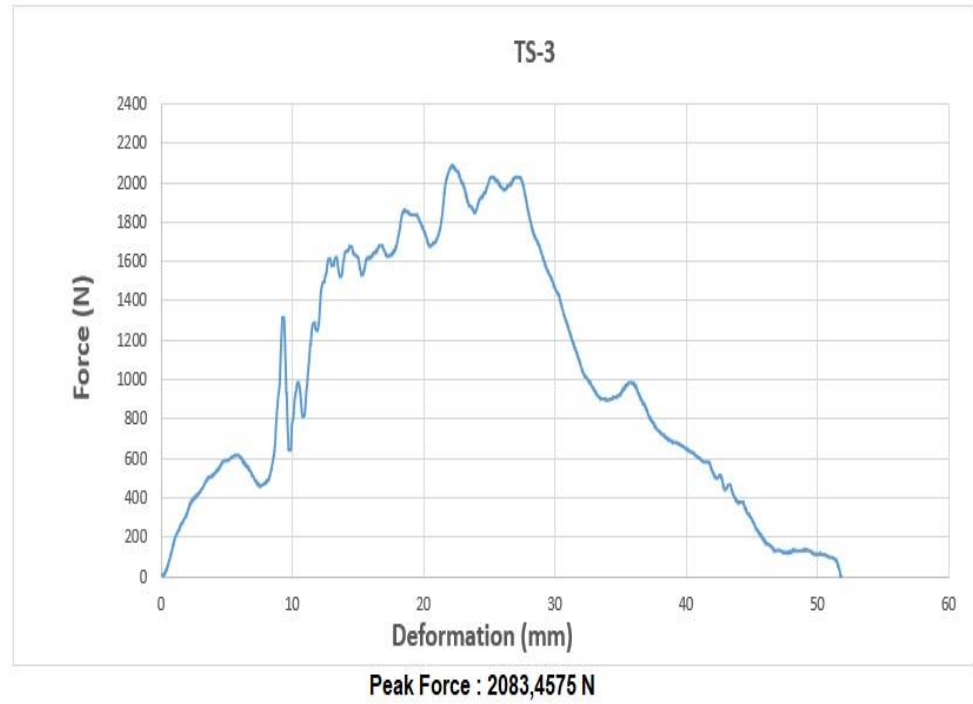
Şekil 3.29. TS-1 Numunesinin Kuvvet – Deformasyon Grafiği.

- **TS-2 (KEVLAR + P.MDI + SEMPOX-2)**



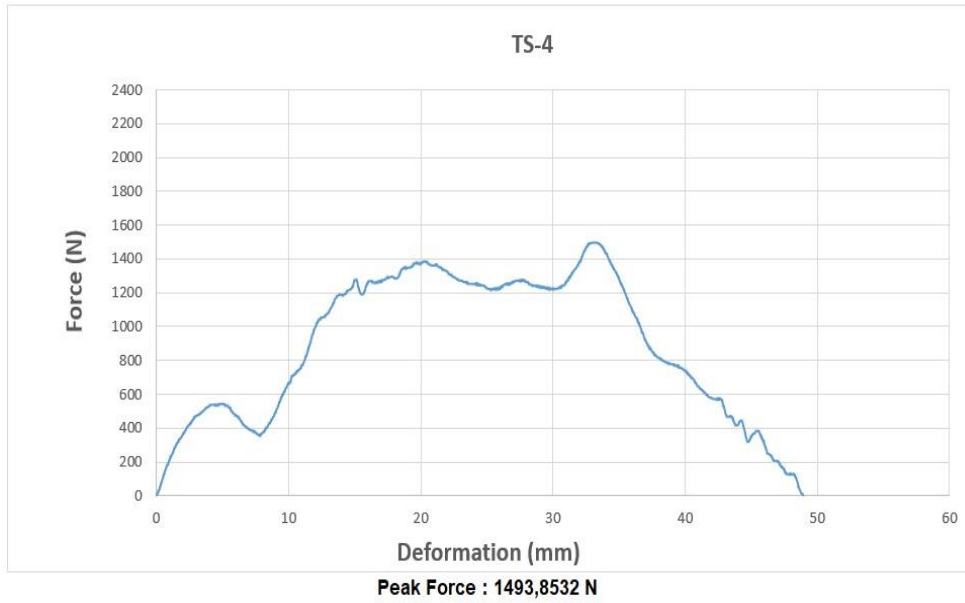
Şekil 3.30. TS-2 Numunesinin Kuvvet – Deformasyon Grafiği.

- **TS-3 (KEVLAR + MDI + SEMPOX-1)**



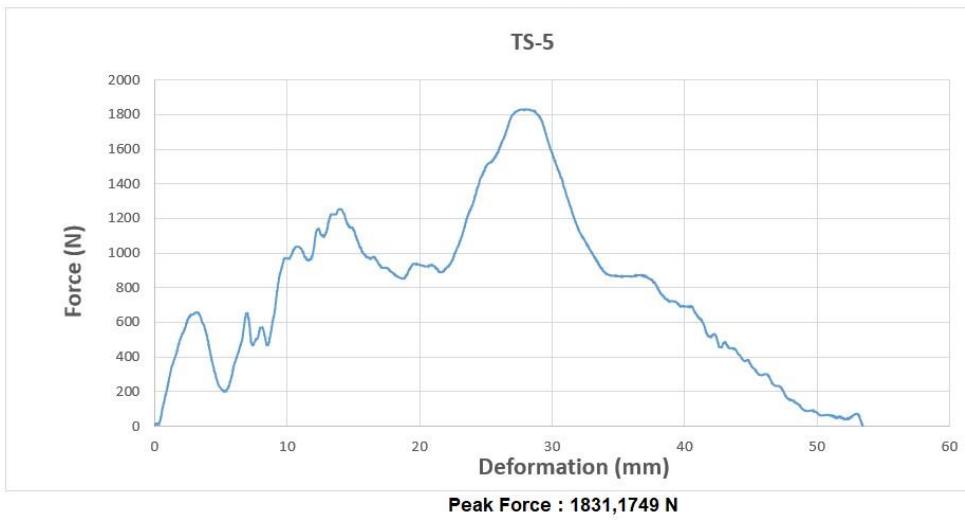
Şekil 3.31. TS-3 Numunesinin Kuvvet – Deformasyon Grafiği.

- TS-4 (KEVLAR + P.MDI + SEMPOX-1)



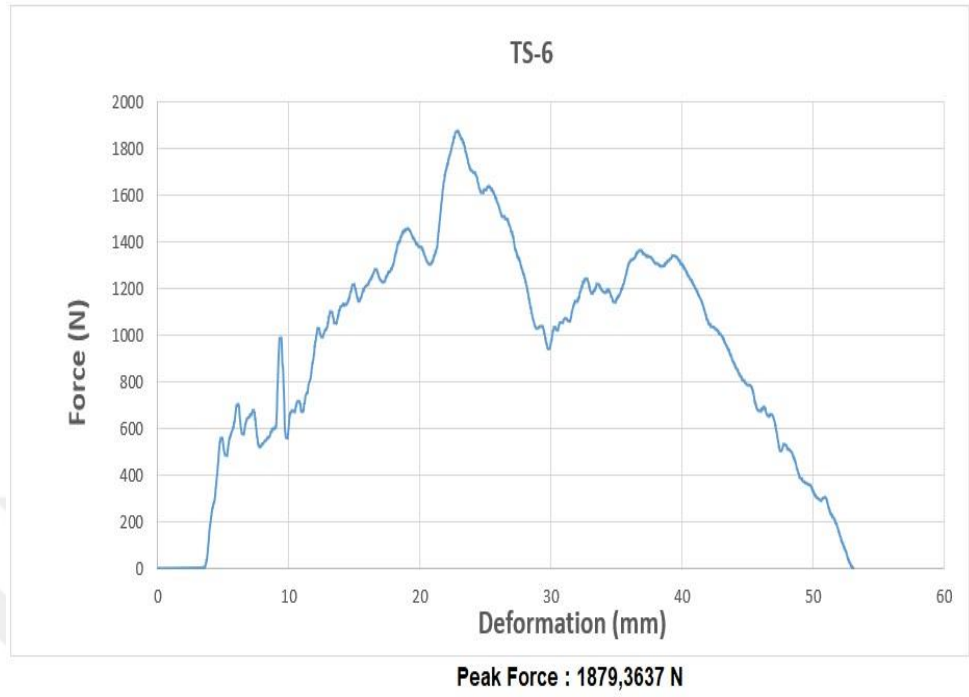
Şekil 3.32. TS-4 Numunesinin Kuvvet – Deformasyon Grafiği.

- TS-5 (UHMWPE + MDI + SEMPOX-2)



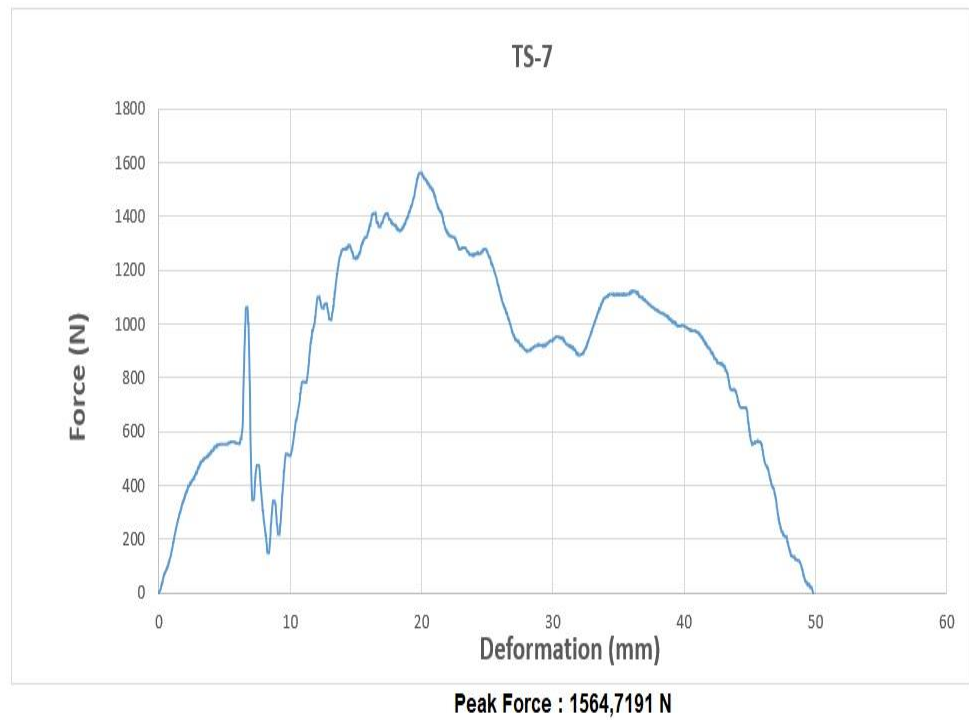
Şekil 3.33. TS-5 Numunesinin Kuvvet – Deformasyon Grafiği.

- **TS-6 (UHMWPE + P.MDI + SEMPOX-2)**



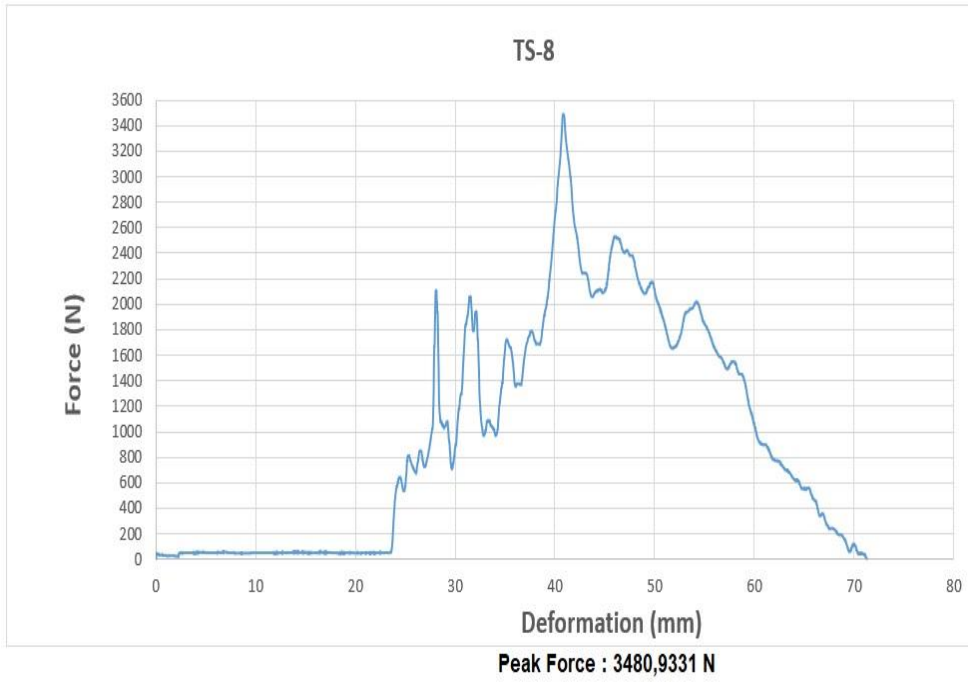
Şekil 3.34. TS-6 Numunesinin Kuvvet – Deformasyon Grafiği.

- **TS-7 (KEVLAR + MDI + SEMPOX-2)**



Şekil 3.35. TS-7 Numunesinin Kuvvet – Deformasyon Grafiği.

- **TS-8 (UHMWPE + MDI + SEMPOX-1)**



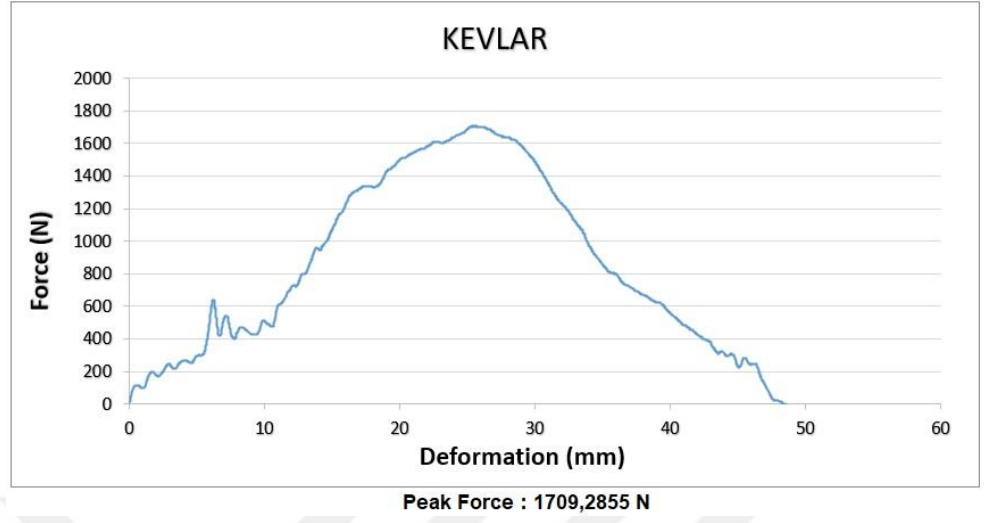
Şekil 3.36. TS-8 Numunesinin Kuvvet – Deformasyon Grafiği.

- **UHMWPE**



Şekil 3.37. UHMWPE Numunesinin Kuvvet – Deformasyon Grafiği.

- KEVLAR



Şekil 3.38. KEVLAR Numunesinin Kuvvet – Deformasyon Grafiği.

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

- **Tanımlar**

Deney sonuçlarını değerlendirmeden önce, geri tepme, penetrasyon, perforasyon ve özgül enerji absorbu tanımları iyi anlaşılmalıdır.

En yaygın olarak, geri tepme, çarpma olaylarının sonunda numunelerden gelen çarpma tertibatının geri tepmesi olarak bilinir. Penetrasyon olayı, çarpma tertibatının numunelere yapışması ve artık geri tepmemesidir. Perforasyon (delinme) ise çarpma tertibatının numunelere yapışması ve numunelerin diğer tarafına ulaşması olarak tanımlanmaktadır. Geri tepme durumunda, maksimum kuvvetten sonraki kısmında (unloading part), deformasyon eğrilerinin maksimum kuvvete ulaşmaya kadar (loading part) kısmına paralel olarak dönmesi gerekir (Sabancı ve Karakuzu, 2013).

Ancak penetrasyon durumunda, sapma eğrileri kuvvet kısmına paralel olarak dönmez. Maksimum kuvvete ulaştığı noktaya kadar düzgün bir yükselişi gösterir. Kuvvet en yüksek değere ulaştığında, yükte ani bir düşüş olur ve grafik çizgisi deformasyon eksenine sert ve dik bir doğru çizer. Bu da numunede delinme olduğunun göstergesidir (Hosur ve ark., 2005). Bu ifadelere istinaden yukarıdaki grafiklere bakıldığında hiçbir numunede delinmenin gerçekleşmediği gözlemlenmiştir.

Diğer önemli parametreler ise absorblanan enerji ile spesifik enerji soğurumu (SEA), bir diğer adı ile özgül enerji emilimidir. Priem ve arkadaşları (2014), örgülü kompozitlerin çarpmaya dayanıklılığını araştırdıkları çalışmalarında darbeye dayanıklılığın verimliliğini en iyi gösteren parametrelerden birinin özgül enerji emilimi olduğunu vurgulamışlar ve bu parametreyi absorbe edilen enerjinin kütleyle oranı veya tüketilen kütle başına emilen enerji olarak tanımlamışlardır. Aynı çalışmada toplam absorblanan enerjinin değerinin, kuvvet-deformasyon grafiğinin altında kalan alana eşit olduğu belirtilmiştir.

Başka bir çalışmada ise benzer bir tanım soğurulan enerjinin temas kuvveti-deformasyon eğrisinin altındaki alandan belirlenebileceğini ve absorbe edilen enerjinin, çarpma tertibatından numuneye aktarılan toplam enerji anlamına geldiği ifade edilmiştir. Ayrıca, emilen enerjiye bağlı olarak artan darbe enerjisi ile delaminasyon kısmen artar. Farklı darbe enerjilerinde elde edilen maksimum temas kuvveti, kompozit malzemelerin darbe yüklerine dayanımı olarak değerlendirilmektedir (Sabancı ve Karakuzu, 2013).

Al-Shamary ve arkadaşlarının (2016) sandviç kompozit yapılar üzerindeki düşük hızlı darbe etkilerini araştırdıkları çalışmalarında ise Priem ve Sabancı'nın tanımlarını doğrular şekilde soğurulan enerjinin, temas kuvveti-deformasyon grafiğinin altındaki alandan hesaplandığını belirtmiştir.

• **Sonuçlar**

Bu çalışmada STF ve Termoset ile işlenmiş UHMWPE / KEVLAR elyaf kompozitleri üzerinde sabit 300 Joule enerji seviyesinde darbe testleri yapılmıştır. Numunelerin darbe dayanımlarını anlamak için kuvvet-deformasyon grafikleri, özgül enerji emilimleri ve maksimum darbe tepkileri aşağıda değerlendirilmiştir.

CEAST-Fractovis Plus cihazı ile yapılan darbe testlerinde absorbe edilen enerji değerleri gibi parametrelerin cihaza bağlı bulunan veri toplama sistemi (DAS) tarafından sağlandığı yukarıda belirtilmişti. Bu veriler neticesinde CEAST-Fractovis Plus Darbe Test cihazında teste tabi tutulan toplam 22 numunenin sonuçları Tablo 4.1 teki gibidir;

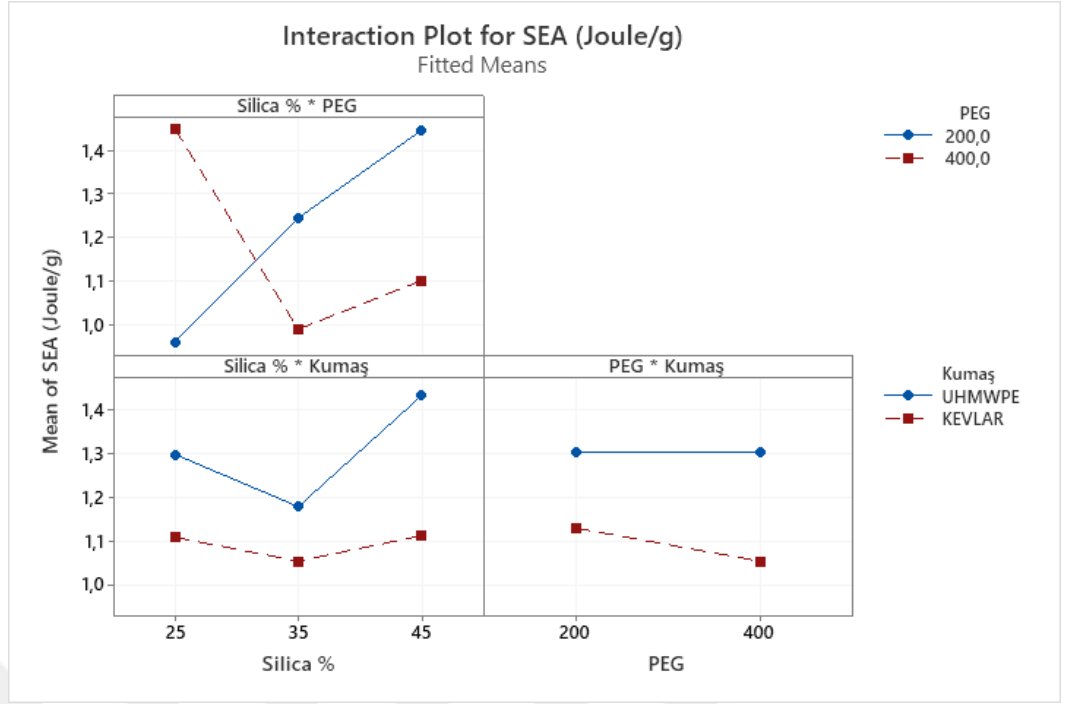
Tablo 4.1. Numunelerin Darbe Test Sonuçları

Numune	Elyaf	Kütle (gr.)	Peak Force (N)	Energy Absorbed (Joule)	SEA (Joule/g)	Emdirilen STF %
STF-1	UHMWPE	27,81	1196,2164	35,6599	1,282	10,01
STF-2	UHMWPE	28,05	1405,9795	39,0842	1,393	13,46
STF-3	UHMWPE	27,07	1618,5772	45,0975	1,666	9,10
STF-4	KEVLAR	38,33	1326,6097	38,8399	1,013	0,79
STF-5	KEVLAR	39,32	1553,3806	43,0556	1,095	3,66
STF-6	KEVLAR	38,12	1635,585	46,8615	1,229	1,59
STF-7	UHMWPE	27,03	1077,1617	25,1641	0,931	12,88
STF-8	UHMWPE	26,95	898,5796	25,9961	0,965	6,57
STF-9	KEVLAR	37,28	1366,2946	34,2571	0,919	2,97
STF-10	KEVLAR	37,56	1377,6331	37,1092	0,988	4,15
STF-11	UHMWPE	26,35	1570,3884	41,7274	1,584	7,84
STF-12	KEVLAR	36,31	1700,7816	47,4127	1,306	2,68
Numune	Elyaf	Kütle (gr.)	Peak Force (N)	Energy Absorbed (Joule)	SEA (Joule/g)	Emdirilen PU %
TS-1	UHMWPE	27,02	1573,223	45,0765	1,668	13,10
TS-2	KEVLAR	38,51	2273,3781	48,0333	1,247	6,54
TS-3	KEVLAR	42,01	2083,4575	51,6923	1,230	11,73
TS-4	KEVLAR	40,63	1493,8532	43,3045	1,066	10,02
TS-5	UHMWPE	27,71	1831,1749	42,2415	1,524	16,68
TS-6	UHMWPE	31,16	1879,3637	50,311	1,615	19,18
TS-7	KEVLAR	41,61	1564,7191	43,4955	1,045	9,18
TS-8	UHMWPE	29,63	3480,9331	68,5889	2,315	17,13
Numune		Kütle (gr.)	Peak Force (N)	Energy Absorbed (Joule)	SEA (Joule/g)	
UHMWPE		23,17	1332,2789	33,4031	1,442	
KEVLAR		34,82	1709,2855	41,3164	1,187	

-Mail deki yayında 2.8 bölümü alıntı, Tam faktöriyel Deney tasarımı Minitab 19 istatistiksel yazılım kullanılarak ikili etkileşimleri gösteren grafikler aşağıdaki gibidir,

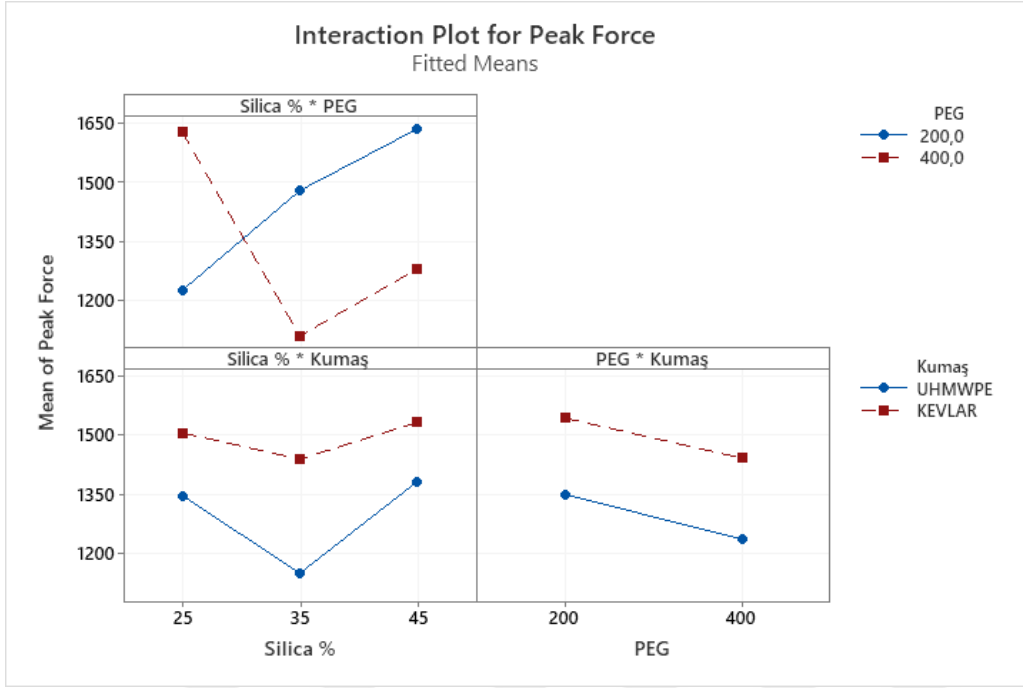
Mantıksal bir kıyaslama yapabilmek için, parametrelerin elde edilen sonuçlar üzerindeki etkisini bilmek önemlidir. Bu çalışmada parametrelerin etkilerini daha iyi anlaşılabilmesi için Minitab 19 istatistiksel yazılımı kullanılmıştır. Tam Faktöriyel Deney Tasarımı üzerine numune sonuçlarının girilmesi ile elde edilen veriler neticesinde elde edilen grafikler ve sonuçlar aşağıdaki gibidir;

- Şekil 4.1'deki grafikten anlaşılacağı üzere, PEG-200 kullanılarak oluşturulan STF' nin tatbik edildiği numunelerde en iyi özgül enerji emilimine %25 lik STF oranıyla elde edilebilirken, PEG-400 kullanılan STF' li numunelerde en iyi özgül enerji emilimine %45 lik STF oranı ile elde edilmiştir.



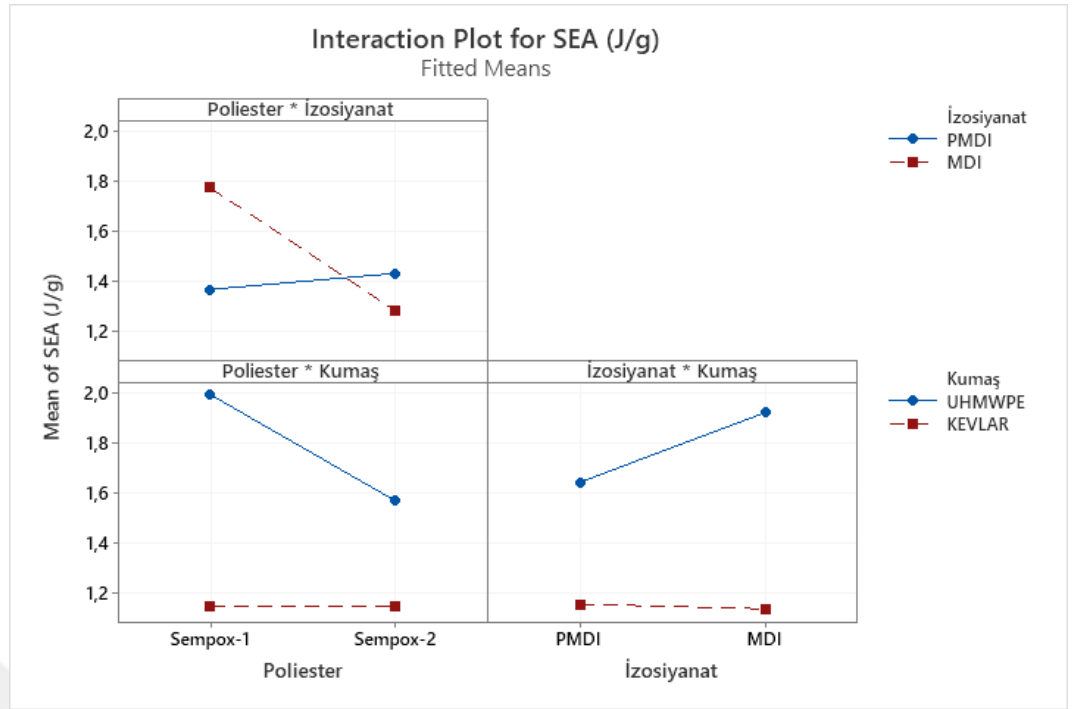
Şekil 4.1. PEG-200 ve PEG-400 İle Oluşturulan STF' lerin Özgül Enerji Emilimi Üzerindeki Etkileşimi

- Şekil 4.2'deki Darbe Dayanımı etkileşimini gösteren grafikte de Özgül enerji emilimine neredeyse birebir benzer bir sonuç anlaşılmaktadır. PEG-200 kullanılarak oluşturulan STF' nin tatbik edildiği numunelerde en iyi darbe dayanımı %25 lik STF oranıyla elde edilebilirken, PEG-400 kullanılan STF' li numunelerde en iyi darbe dayanımı %45 lik STF oranı ile elde edilmiştir.

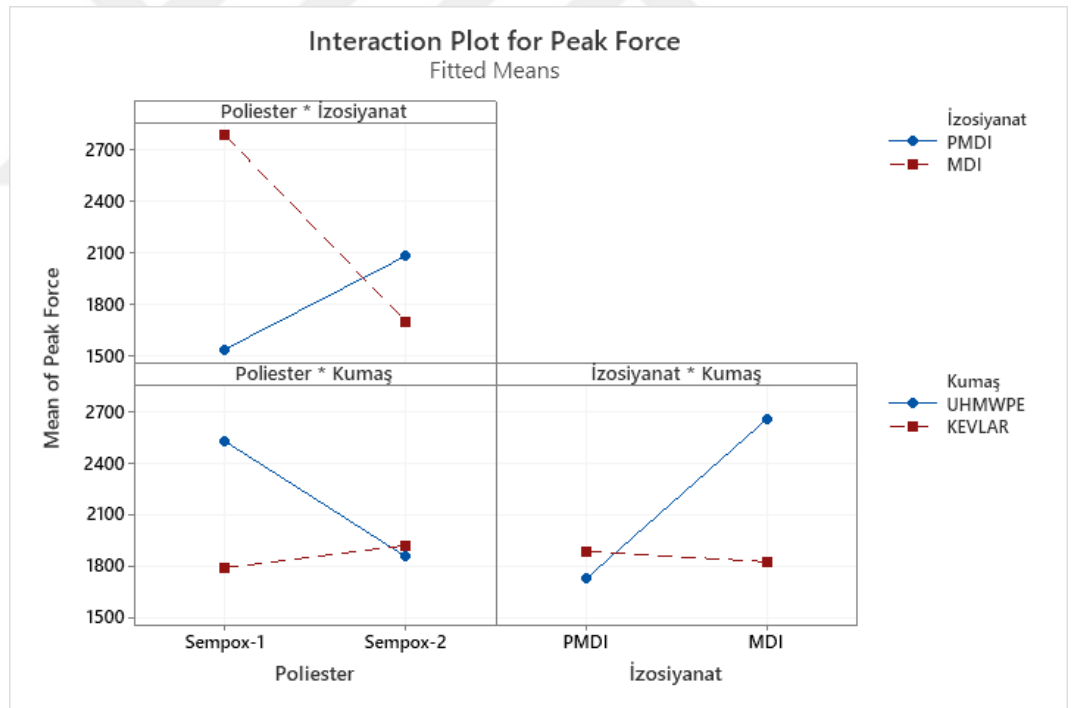


Şekil 4. 2. PEG-200 ve PEG-400 İle Oluşturulan STF' lerin Darbe Dayanımı Üzerindeki Etkileşimi

• Benzer grafikler Termoset Reçineler için incelendiğinde, Şekil 4.3' deki etkileşim grafiğinde en iyi özgül enerji Emilimi değerlerini, SEMPOX-1 poliester ve MDI kullanılarak hazırlanan numunelerden elde edildiğini gözlemlenmiştir. Şekil 4.4'teki Darbe Dayanımı etkileşimini gösteren grafikten de yine benzer bir sonuca varılarak, en iyi darbe dayanımının SEMPOX-1 poliester ve MDI kullanılarak hazırlanan numunelerden elde edildiği anlaşılmaktadır.

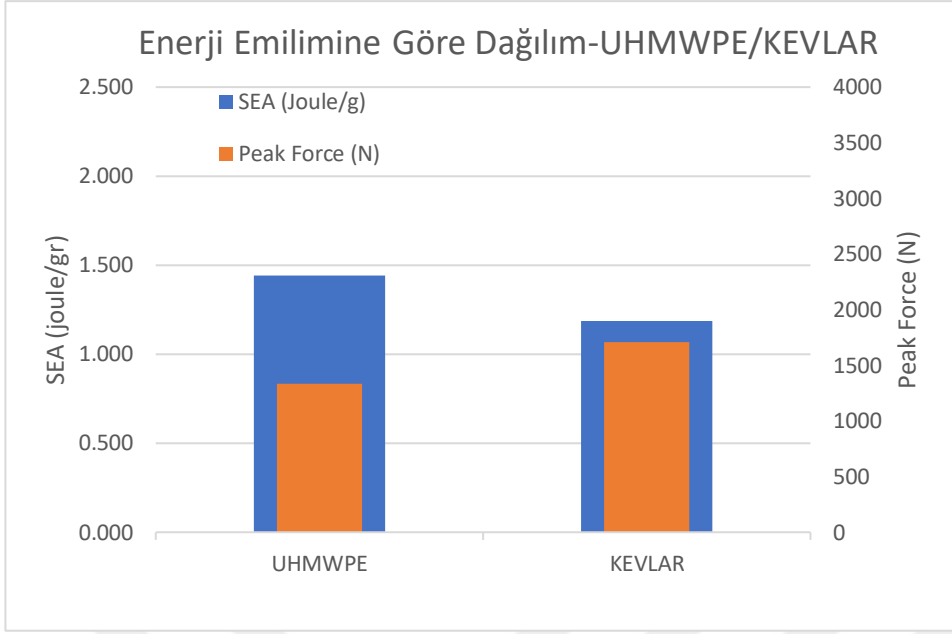


Şekil 4.3. Termoset Reçinelerin Özgöl Enerji Emilimi Üzerindeki Etkileşimi



Şekil 4.4 Termoset Reçinelerin Darbe Dayanımı Üzerindeki Etkileşimi

- Tüm eğriler kapalı formdadır. Başka bir deyişle, çarpma tertibatı üst yüz tabakasından geri döndüğü, perforasyona hiçbir grafikte rastlanılmadığı ve geri tepme durumunun oluştuğu (Ataş and Sevim, 2010),

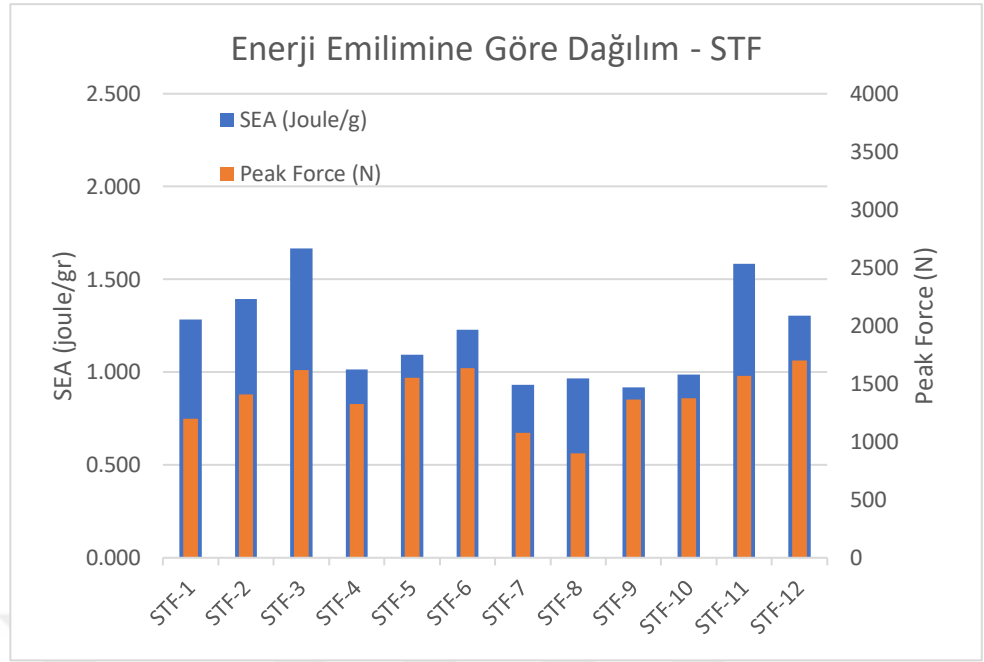


Şekil 4.5. UHMWPE -KEVLAR Numunelerinin Özgül Enerji Emilimi (SEA) -Kuvvet Grafiği.

• Şekil 4.5'te görüldüğü üzere, herhangi bir işlem görmemiş ve aynı katman sayısına sahip UHMWPE ve KEVLAR numuneleri değerlendirildiğinde, UHMWPE numunesinin Özgül Enerji Emiliminin, KEVLAR numunesine kıyasla %21,5 daha fazla olduğu,

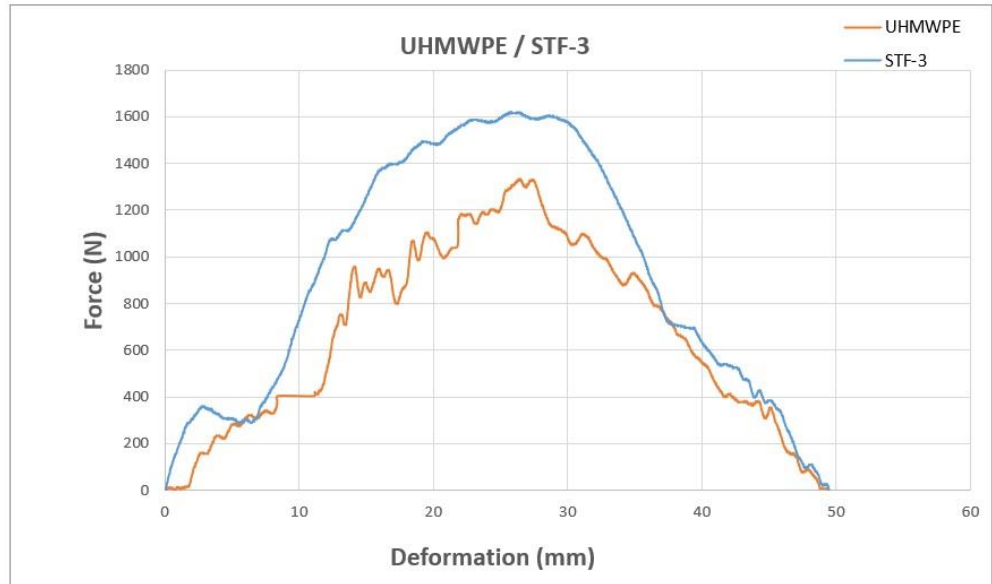
• STF sıvısının, aramid bir elyaf türü olan KEVLAR'a nazaran polietilen bir yapı olan UHMWPE kumaş tarafından daha fazla miktarda emilebilir olduğu ve bunun STF işlenmiş UHMWPE numunelerinin özgül enerji emilimlerini ve darbe dayanımlarını KEVLAR ile işlenmiş numunelere göre daha yüksek olmasına sebep olduğu,

• Şekil 4.6'da görüldüğü üzere, STF emdirilerek üretilen UHMWPE numuneleri içerisinde, işlem görmemiş UHMWPE numuneye kıyasla sadece STF-1 ve STF-11 numunelerinin darbe dayanımlarının ve özgül enerji emilimlerinin (SEA) arttığı, geri kalan STF-2,3,7,8 numaralı numunelerde STF'nin malzemenin mekanik özellikleri üzerinde negatif bir etki yarattığı,



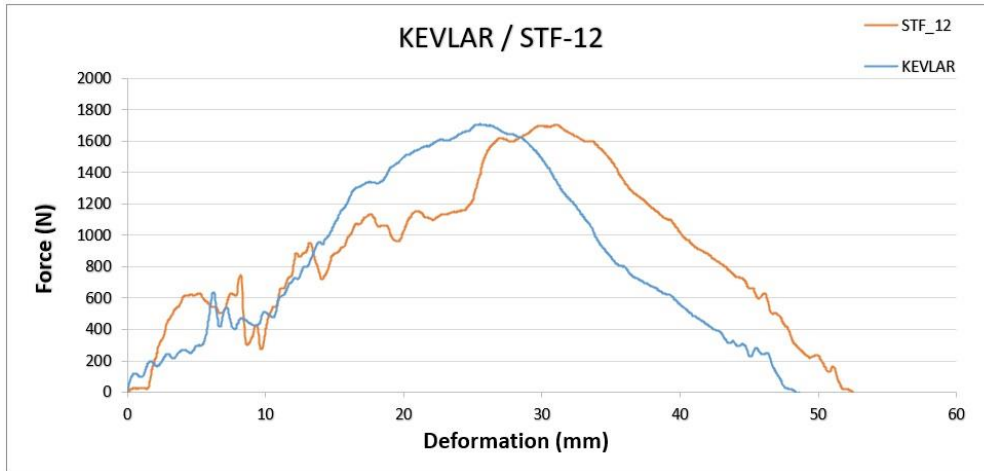
Şekil 4.6. STF İşlenmiş Numunelerinin Özgül Enerji Emilimi (SEA) -Kuvvet Grafiği.

- STF ile işlenmiş UHMWPE numuneleri arasında en iyi sonuçların elde edildiği STF-3 numunesini, işlem görmemiş UHMWPE numunesi ile karşılaştırıldığında, Şekil 4.7’de görüldüğü üzere malzemenin darbe dayanımını %21,48, özgül enerji emilimini ise %15,53 oranında arttırdığı,



Şekil 4.7. UHMWPE / STF-3 Numunelerinin Kuvvet – Deformasyon Grafiği.

- Yine STF emdirilmiş KEVLAR numuneleri arasında en iyi mekanik sonuçları olan STF-12 numunesini işlem görmemiş KEVLAR numunesi ile kıyasladığımızda, Şekil 4.8’de görüldüğü üzere, STF’nin malzeme üzerinde darbe dayanımını az miktarda düşürdüğünü ancak özgül enerji emilimini %10 oranında arttırdığı,

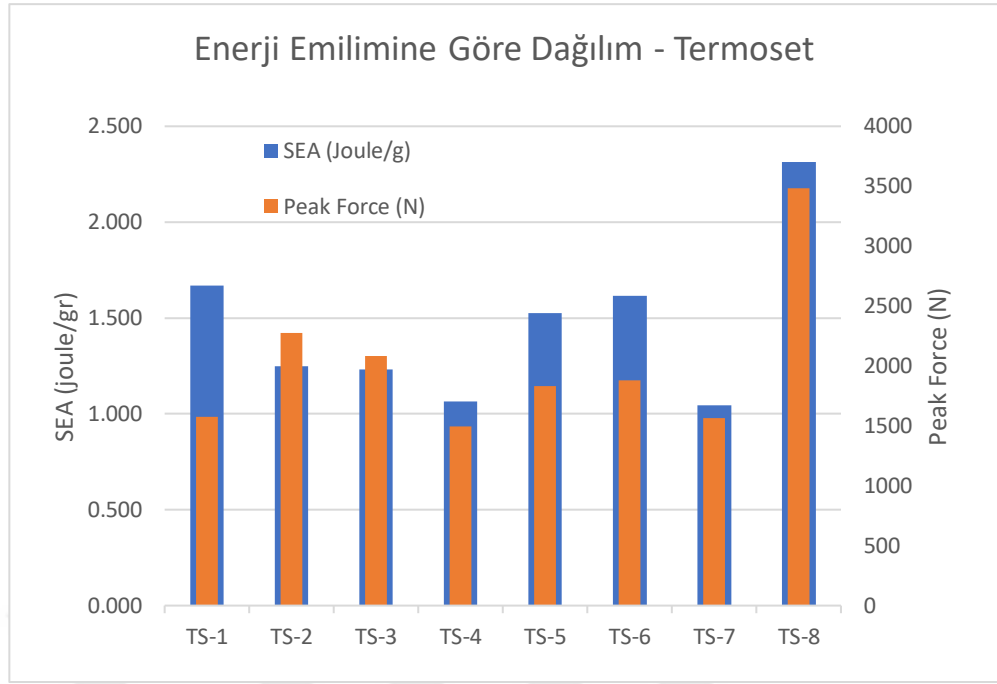


Şekil 4.8. KEVLAR / STF-12 Numunelerinin Kuvvet – Deformasyon Grafiği.

- Termoset reçinenin, STF’ye göre, kumaşlar üzerinde daha rijit bir yapı oluşturduğu gözlemlenmiş olup, oluşan bu rijit fakat epoksi reçineye kıyasla daha esnek yapının her iki kumaş üzerinde de STF emdirilmiş numunelere nazaran darbe dayanımını ve enerji absorpsiyonunu önemli ölçüde arttırdığı,

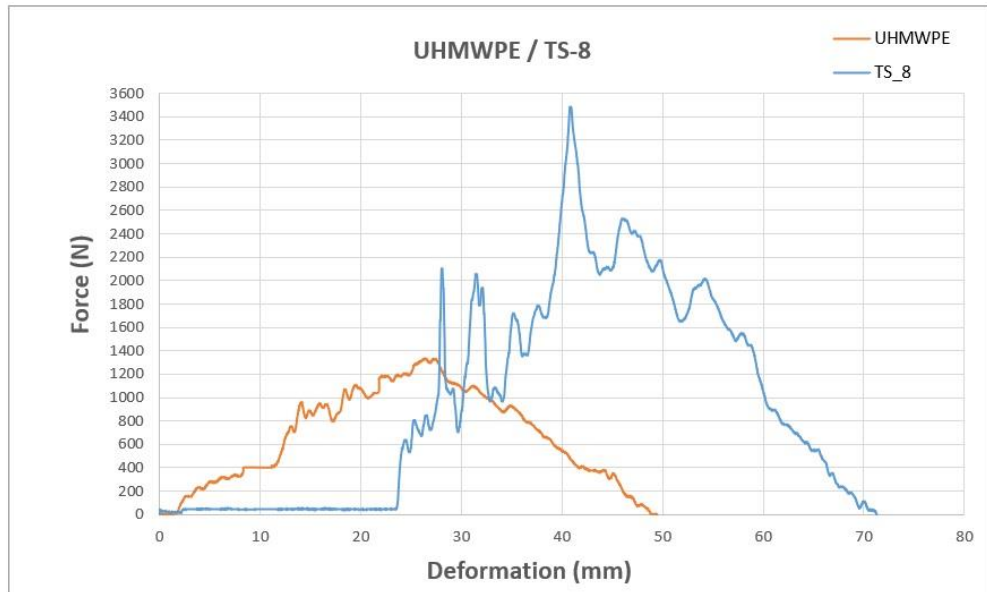
- Ayrıca termoset reçinenin hangi miktarda emildiği ve hangi formülasyonda üretildiğine bakılmaksızın her koşulda hiç işlem görmemiş UHMWPE ve KEVLAR kumaşlara kıyasla numunelerin mekanik özelliklerini arttırdığı,

- Termoset reçinenin, üretilen UHMWPE numunelerinde (TS-1,5,6,8); aynı esaslarla üretilen KEVLAR numunelerine (TS-2,3,4,7) kıyasla özgül enerji emilimini belirgin ölçüde yükselttiği (Şekil 4.9),



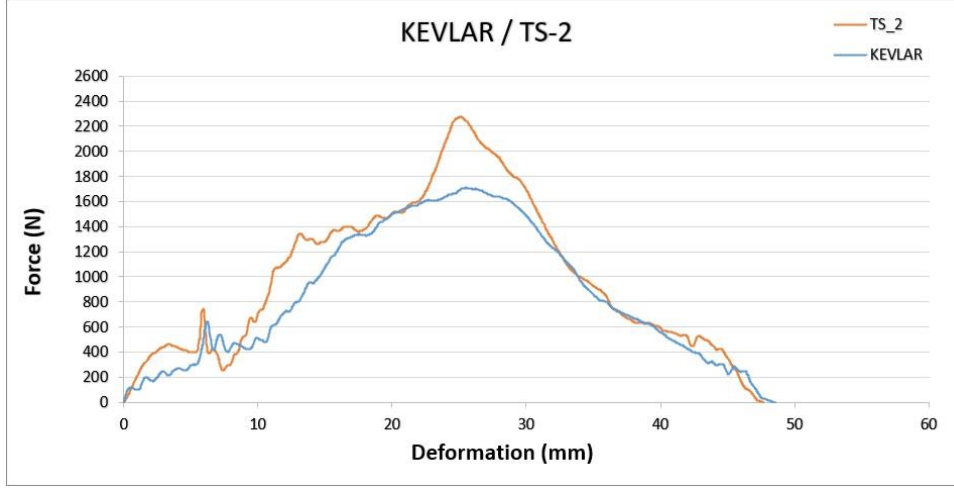
Şekil 4.9. Termoset İşlenmiş Numunelerinin Özgül Enerji Emilimi (SEA) -Kuvvet Grafiği.

• Termoset reçine ile üretilen UHMWPE numuneleri arasında en iyi performansa sahip TS-8 numunesi değerlerine bakıldığında, termoset reçinenin, Şekil 4.10'da görüldüğü üzere işlem görmemiş UHMWPE numunesine oranla, malzemenin **darbe dayanımını %161,28, özgül enerji emilimini ise %60,54** gibi yüksek oranlarda arttırdığı,



Şekil 4.10. UHMWPE / TS-8 Numunelerinin Kuvvet – Deformasyon Grafiği.

- Aynı kıyaslama KEVLAR ile üretilmiş numuneler için yapılacak olursa, Termoset reçine ile üretilen KEVLAR numuneleri arasında en iyi performansa sahip TS-2 numunesi değerlerine bakıldığında, Şekil 4.11’de görüldüğü üzere işlem görmemiş KEVLAR numunesine oranla, malzemenin **darbe dayanımını %33, özgül enerji emilimini ise %5** oranında arttırdığı,



Şekil 4.11. KEVLAR / TS-2 Numunelerinin Kuvvet – Deformasyon Grafiği.

Sonuç; Darbe testleri neticesinde, SEMPOX-1 + MDI termoset malzeme ile işlenerek üretilmiş bir UHMWPE balistik plakanın, hiç işlem görmemiş bir elyaftan üretilen balistik plakaya nazaran çok daha etkili mekanik performans sergileyeceği, ayrıca UHMWPE kumaşların oldukça pahalı bir malzeme olduğu göz önünde bulundurulduğunda, istenen NIJ seviyesinde bir balistik plakanın termoset reçine takviyesi ile daha az UHMWPE kumaş kullanılarak üretilebileceği ve bununda üretim maliyetini çok önemli bir ölçüde azaltacağı sonucu elde edilmiştir.

KAYNAKLAR

- Akca, E. and Gursel, A.,** 2015, A review on the matrix toughness of thermoplastic materials. *Period Eng Nat Sci*, 3(2), 2303–4521 pp.
- Akovağ, G.,** 2001, Handbook of composite fabrication, iSmithers Rapra Publishing, 40; 71 pp.
- Alagirusamy, R. and Das, A.,** 2014, Conversion Of Fibre To Yarn: An Overview, *Textiles and Fashion : Materials, Design and Technology*, Indian Institute of Technology Delhi, New Delhi -India, Chapter 8, 166-167 pp.
- Al-Shamary, A.K.J., Ozdemir, O., and Karakuzu, R.,** 2016, Low-velocity impact response of sandwich composites with different foam core configurations, *Journal of Sandwich Structures and Materials*, 18(6): 754–768 pp.
- Asija, N., Chouhan, H., Gebremeskel, S.A. and Bhatnagar, N.,** 2018, Impact response of Shear Thickening Fluid (STF) treated ultra-high molecular weight polyethylene composites – the study of the effect of STF treatment method, *Indian Institute of Technology Delhi Mechanical Engineering Department, Thin-Walled Structures Volume 126*, India, 16-25 pp.
- Ataş, C. and Sevim, C.,** 2010, On the impact response of sandwich composites with cores of balsa wood and PVC foam, *Composite Structures* 93, 40–48 pp.
- Ávila, A.F., Oliveirab, A.M., Leão, S.G. and Martinsb, M.G.,** 2018, Aramid fabric/nano-size dual-phase shear thickening fluid composites response to ballistic impact, *Composites Part A* 112, 468-474 pp.
- Baharvandi, H.M.R, Khaksari, P., Alebouyeh, M., Alizadeh, M., Khojasteh, J. and Kordani, J.,** 2014, Investigating the quasi-static puncture resistance of p-aramid nanocomposite impregnated with the shear thickening fluid, *Journal of Reinforced Plastics and Composites* 33, 2064-2072 pp.
- Bednarczyk, B. A.,** 2003, An inelastic micro/macro theory for hybrid smart/metal composites., *Composites Part B, Engineering*, 34(2), 175–197 pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Belingardi G., Cavatorta M.P., and Paolino D.S.,** 2008, Repeated impact response of hand lay-up and vacuum infusion thick glass reinforced laminates, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 35(7): 609-619 pp.
- Bhatnagar, A.,** 2006, *Lightweight ballistic composites*, ABD-CRC Press, Woodhead Publishing Ltd., 1st edition, Cambridge, 429 pp.
- Bhuiyan, M.A., Hosur, M.V. and Jeelani, S.,** 2009, Low-velocity impact response of sandwich composites with nanophased foam core and biaxial braided face sheets. *Composites Part B (40)*: 561–571 pp.
- Briscoe, B.J. and Motamedi, F.,** 1990, Role of interfacial friction and lubrication in yarn and fabric mechanics, *Textile Research Journal*, 60, 697-708 pp.
- Bunsell, A. R., and Renard, J.,** 2005, *Fundamentals of fibre reinforced composite materials*. CRC Press 9 pp.
- Callister, W.D.,** 2007, *Composite Materials Science And Engineering*, John Wiley And Sons, Inc, vii the ed. USA ,Chapter 16, Sec,16.8-16.13, 597-607 pp.
- Campos, R., Bechtold, T. and Rohrer, C.,** 2003, Fiber friction in yarn a fundamental property of fibers, *Textile Research Journal*, 73, 716-721 pp.
- Candan, C.,** 2005, *Zırh Teknolojilerindeki Gelişmeler*, Zırh Teknolojileri Semineri, Arge ve Teknoloji Daire Başkanlığı, Milli Savunma Bakanlığı, Ankara
- Cavallaro, P.,** 2011, *Soft Body Armor: An Overview of Materials, Manufacturing, Testing, and Ballistic Impact Dynamics*, NUWC-NPT Technical Report 12,057 11-20 pp.
- Cheeseman, B.A. and Bogetti, T.A.,** 2003, Balistic Impact into Fabric and Compliant Composite Laminates. *Composite Structure* 61, 161-173 pp.
- Cheremisinoff, N.P. and Cheremisinoff, P.N.,** 1995, *Fiberglass Reinforced Plastics*, 39–65 pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Chocron, S., Figueroa, E., King, N., Kirchdoerfer, T., E. Nicholls, A., Sagebiel, E., Weiss, C., J. Freitas, C.,** 2010, Modeling and validation of full fabric targets under ballistic impact, Elsevier Composites Science and Technology 70, 2012-2022 pp.
- Chung, DL.,** 2017, Polymer-matrix composites: structure and processing. In: Carbon Composites, Deborah: Elsevier; 161–217 pp.
- Composites Turkey,** 2014, Kompozit Sanayicileri Derneği, Sayı: 8, 32 s.
- Congress of the U.S. Office of Technology Assessment,** 1988, Advanced materials by design polymer matrix composites, Building materials, DIANE Publishing, ISBN: 9781428922396, Volume 22, Part 46, Chapter 3.
- Çay, A., Süpüren, G., Kanat, Z.E., Gülümser, T. ve Tarakçıoğlu, I.,** (2007), Balistik Lifler (Bölüm 1), Tekstil ve Konfeksiyon, Sayı: 4, 232- 236 s.
- Çerkez, İ.,** 2007, Kolloidal Silika Dispersyonunun Polietilen Kumaşların Balistik Performansına Etkisi, T.C. Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Bursa, 30 s.
- Deluca, E., Prifti, J., Betheney, W. and Chou, S.C.,** 1998, Ballistic impact damage of S2-glass reinforced plastic structural armor, Composites Science and echnology, 58, 1453-1461 pp.
- Dorworth, L.C., Gardiner, G.L., and Mellema, G.M.,** 2019, Composite Technology Overview Essentials of Advanced Composite Fabrication & Repair, Chapter 1, 26-35 pp.
- Faur-Csukat, G.,** 2006, A Study on the Ballistic Performance of Composites, Macromolecular Symposia, 239:217–226 pp.
- Friedrich, K., Zhang, Z. and Schlarb, A. K.,** 2005, Effects of various fillers on the sliding wear of polymer composites, Composites Science and Technology, 65(15), 2329–2343 pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Gellert, E.P., Cimpoeru, S.J. and Woodward, R.L.**, 2000, A study of the effect of the target thickness on the ballistic perforation of glass-fibre reinforced plastic composites, Elsevier International Journal of Impact Engineering, 24, 445-456 pp.
- Gower, H.L., Cronin, D.S. and Plumtree, A.**, 2008, Ballistic impact response of laminated composite panels, Elsevier International Journal of Impact Engineering, 35, 1000-1008 pp.
- Grujicic, M., Pandurangan, B., Koudela, K.L. and Cheeseman, B.A.**, 2006, A computational analysis of the ballistic performance of light-weight hybrid composite armors, Elsevier Applied Surface Science, 253, 730-745 pp.
- Gu, Y. And Ran, Q.**, 2011, Polybenzoxazine/Fiber Composites, Handbook of Benzoxazine Resins, Chapter 28, 481 – 494 pp.
- Gürgen, S. and Kuşhan, M.C.**, 2017, The Ballistic Performance Of Aramid Based Fabrics Impregnated With Multiphase Shear Thickening Fluids, Polymer Testing, 296–306 pp.
- Gürgen, S. and Kuşhan, M.C.**, 2017, The Stab Resistance Of Fabrics Impregnated With Shear Thickening Fluids Including Various Particle Size Of Additives, Composites Part A, 50–60 pp.
- Hale, J.**, 2014, Boeing 787 from the Ground Up, QTR_04 06, https://www.boeing.com/commercial/aeromagazine/articles/qtr_4_06/article_04_2.html, (Erişim tarihi: 19 Haziran 2022)
- Haris, A., Lee, H.P., Tay, T.E. and Tan, V.B.C.**, 2015, Shear Thickening Fluid Impregnated Ballistic Fabric Composites For Shock Wave Mitigation, International Journal of Impact Engineering, 143-151 pp.
- Haris, A., Lee, H.P., Tay, T.E. and Tan, V.B.C.**, 2015, Shear thickening fluid impregnated ballistic fabric composites for shock wave mitigation, International Journal of Impact Engineering 80, 143-151 pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Hasanzadeha, M., Mottaghitalebi, V., Rezaei, M. and Babaei, H.,** 2017, Numerical and experimental investigations into the response of STF-treated fabric composites undergoing ballistic impact, *Thin-Walled Structures* 119, 700-706 pp.
- Hassan, T.A., Rangari, V.K. and Jeelani, S.,** 2010, Synthesis, processing and characterization of shear thickening fluid (STF) impregnated fabric composites, *Materials Science and Engineering A* 527, Tuskegee University, USA, 2892–2899 pp.
- Hearle, J.W.,** 2001, High performance fibres, Woodhead Publishing Limited, Cambridge, England, 49 pp.
- Hiermaier, S.J., Riedel, W., Hayhurst, C.J., Clegg, R.A. and Wentzel, C.M.,** 1999, Advanced material models for hypervelocity impact simulations AMMHIS, European Space Agency Contract Report, EMI-Report No. E43/99
- Hosur, M.V., Abdullah, M. and Jeelani, S.,** 2005, Manufacturing and low-velocity impact characterization of foam filled 3-D integrated core sandwich composites with hybrid face sheets, *Composite Structures* 69, 167-181 pp.
- Houghton, J.M., Schiffman, B.A., Kalman, D.P., Wetzel, E.D. and Wagner,** 2007, Hypodermic Needle Puncture Of Shear Thickening Fluid (Stf)-Treated Fabrics, Department of Chemical Engineering and Center for Composite Materials, University of Delaware, U.S. Army Research Laboratory.
- Huang, H. and Talreja, R.,** 2006, Numerical simulation of matrix micro-cracking in short fiber reinforced polymer composites, Initiation and propagation. *Composites Science and Technology*, 66(15), 2743–2757 pp.
- Jacobs, M.J.N. and Van Dingenen J.L.J.,** 2001, Ballistic protection mechanisms in personal armor, *Journal of Materials Science*, 36(13), 3137-3142 pp.
- Jovicic J., Zavalaniog A. and Ko, F.,** 2000, Modeling of the ballistic behavior of gradient design composite armors, *Elsevier Composites Part A*, 773-784 pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Jovicic, J.M.**, 2003, “Numerical Modeling And Analysis Of Static And Ballistic Behavior Of Multi-Layered/Multiphase Composite Materials Using Detailed Microstructural Discretization”, Drexel University, Pennsylvania, 181 pp.
- Kalender, M.**, 2018, Kompozit malzeme nedir? Kompozit malzeme nerelerde kullanılır?, Teknik Kütüphane, <https://malzemebilimi.net/kompozit-malzemenin-kullanim-alanlari.html>, (Erişim Tarihi: 19 Haziran 2022)
- Karahan, M.**, 2008, Comparison of ballistic performance and energy absorption capabilities of woven and unidirectional aramid fabrics. Textile Research Journal, 78, 718-730 pp.
- Karakan, G.**, 2008, Balistik yapılarda balistik performansa etkiyen parametrelerin incelenmesi, Tekstil Teknolojileri, 51-58 pp.
- Khodadadi, A., Liaghat, G.H., Sabet, A.R., Hadavinia, H., Aboutorabi, A., Razmkhah, O., Akbari M. and Tahmasebi, M.**, 2019, Experimental And Numerical Analysis Of Penetration into Kevlar Fabric Impregnated With Shear Thickening Fluid; Journal of Thermoplastic Composite Materials.
- Kılıç, N.**, 2014, Development of Multi-Layer Ballistic Armor Panel with Simulation and Ballistic Tests. Marmara University, Department of Mechanical Engineering. Ph. D. Thesis.
- Kocer, H.B.**, 2007, Laminated and hybrid soft armor systems for ballistic applications, Auburn Universtiy, Master of Science, Alabama, 99 pp.
- Kowalski, L., Duszczek, J. and Katgerman, L.**, 1999, Thermal conductivity of metal powder polymer feedstock for powder injection moulding, Journal of Materials Science, 34(1), 1–5 pp.
- Kumar, K. And Davim, J.P.**, 2018, Composites and Advanced Materials for Industrial Applications, Advances in Chemical and Materials Engineering (ACME) Book Series, United States of America, Preface pp.
- Kumar, S., Gupta, D.S., Singh, I. and Sharma, A.**, 2009, Behavior of Kevlar/Epoxy composite plates under ballistic impact, Journal of Reinforced Plastics and Composites, September, 2048-2064 pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Larsson, F. and Svensson, L.,** 2002, Carbon, Polyethylene and PBO Hybrid Fibre Composites for Structural Lightweight Armour, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Volume 33, Issue 2, 221-231 pp.
- Lee, B.L., Walsh, T.F., Won, S.T., Patts, H.M., Song, J.W. and Mayer, A.H.,** 2001, Penetration failure mechanisms of armor-grade fiber composites under impact, Journal of Composite Materials, 35, 1605-1633 pp.
- Lee, Y.S., Wetzel, E.D., and Wagner, N.J.,** 2003, The ballistic impact characteristics of Kevlar® woven fabrics impregnated with a colloidal shear thickening fluid. Journal of materials science, 2825-2833 pp.
- Liu, S., Wang, J., Wang, Y. and Wang, Y.,** 2010, Improving The Ballistic Performance of Ultra High Molecular Weight Polyethylene Fiber Reinforced Composites Using Conch Particles, Materials & Design, 31(4), 1711-1715 pp.
- Majumdar, A., Butola, B.S. and Srivastava A.,** 2013, An analysis of deformation and energy absorption modes of shear thickening fluid treated Kevlar fabrics as soft body armour materials, Materials and Design 51, India, 148-153 pp.
- Majzoobi, G.H. and Zaheri, F.M.,** 2017, Numerical and Experimental Study of Ballistic Response of Kevlar Fabric and Kevlar/Epoxy Composite, International Journal of Engineering Transactions B: Applications Vol. 30 No.5, 791-799 pp.
- Maranzano, B.J. and Wagner, N.J.,** 2001, The effects of particle size on reversible shear thickening of concentrated colloidal dispersions, The Journal of chemical physics, 114(23), 10514 10527 pp.
- Mark, E.J.,** 1999, Polymer Data Handbook., Oxford University Prss, 2st edition, Oxford, 1102 pp.
- Mines, R.A.W., Roach, A.M. and Jones N.,** 1999, High Velocity Perforation Behavior Of Polymer Composite Laminates, Inter. J. Impact. Eng., 22, 561–588 pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Mkaddem, A., Demirci, I., and El Mansori, M.,** 2008, A micro–macro combined approach using FEM for modelling of machining of FRP composites: Cutting forces analysis. *Composites Science and Technology*, 68(15), 3123–3127 pp.
- Mohan, K., Yip T.H. and Idapalapati, S.,** 2011, Impact response of aluminum foam core sandwich structures. *Material Science Engineering A-Struct*, 529, 94–101 pp.
- Mondal, M.,** 2013, Polypropylene and natural rubber based thermoplastic vulcanizates by electron induced reactive processing, Technische University at Dresden, Germany, 2013.
- Naik, N.K. and Doshi, A.V.,** 2008, Ballistic impact behaviour of thick composites: Parametric studies, *Composite Structures*, 82 ,447-464 pp.
- Naik, N.K. and Doshi, A.V.,** 2008, Ballistic impact behaviour of thick composites: Parametric studies, *Composite Structures*, 82 ,447-464 pp.
- Ning, H., Janowski, G. M., Vaidya, U. K. and Husman, G.,** 2007, Thermoplastic sandwich structure design and manufacturing for the body panel of mass transit vehicle, *Composite Structures*, 80(1), 82–91 pp.
- Ozdemir, O. and Oztoprak, N.,** 2017, An investigation into the effects of fabric reinforcements in the bonding surface on failure response and transverse impact behavior of adhesively bonded dissimilar joints, *Composites Part B* 126, 72-80 pp.
- Ozdemir, O. ve Kandas, H.,** 2018, Cam Lifi Takviyeli Polipropilen Kompozitlerde Kalınlığın Ve Sıcaklığın Darbe Davranışına Etkileri, *TMMOB Tekstil Mühendisleri Odası Tekstil ve Mühendis Dergisi*, Cilt 25(110): 103-112 s.
- Ozdemir, O., Karakuzu, R. and Al-Shamary, A.K.J.,** 2015, Core-thickness effect on the impact response of sandwich composites with poly(vinyl chloride) and poly(ethylene terephthalate) foam cores, *Journal of Composite Materials*, Vol. 49(11): 1315–1329 pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Ozdemir, O., Oztoprak, N. ve Kandas, H.,** 2018, Single and repeated impact behaviors of bio-sandwich structures consisting of thermoplastic face sheets and different balsa core thicknesses, Composites Part B, Elsevier 149, 49–57 pp.
- Painter, P.C., and Coleman, M.M.,** 1997, Fundamentals of Polymer Science: An Introductory Text, Technomic Pub., 412-415 pp.
- Park, J.H., Ha, S.K. and Kang, K.W.,** 2008, Impact damage resistance of sandwich structure subjected to low velocity impact, J Mater Process Technology, 201, 425–430 pp.
- Parnas, L., Balya, B., Billur E. ve Şenel, F.,** 2005, İleri kompozit zırh geliştirme çalışmaları, Zırh Teknolojileri Semineri 10-11 Mart, MSB ARGE ve Teknoloji D.Bşk.lığı, Ankara, 11-25 s.
- Petel, O.E., Ouellet , S.,Loiseau, J.,Frost D.L and Higgins, A.J.,** 2015, A comparison of the ballistic performance of shear thickening fluids based on particle strength and volume fraction, International Journal of Impact Engineering 85, 83-96 pp.
- Pinto, F. and Meo, M.,** 2017, Design and Manufacturing of a Novel Shear Thickening Fluid Composite (STFC) with Enhanced out-of-Plane Properties and Damage Suppression, Appl Compos Mater, 24,643–660 pp.
- Powell, D.A. and Zohdi, T.I.,** 2009, Attachment mode performance of network-modeled ballistic fabric shielding, Composites Part B: Engineering, 40(6), 451-460 pp.
- Price, D.,** 2012, Shear-Thickening Fluid, The College of Wooster Wooster Physics Department, USA
- Priem, C., Othman, R., Rozycki, P. and Guillon, D.,** 2014, Experimental investigation of the crash energy absorption of 2.5 D-braided thermoplastic composite tubes Composite Structures, Elsevier, 116: 814-826 pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Sabancı, E. and Karakuzu, R.,** 2013, Effect Of Embedded Delaminations On Impact Behavior Of Laminated Composites, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 19(7): 303-309 pp.
- Sabir, T.,** 2018, Fibers used for high-performance Apparel, Materials Development and Applications, Woodhead Publishing Series in Textiles, Elsevier, 7-32 pp.
- Saheb D.N and Jog J.P.,** 1999, Natural fiber polymer composites: a review. Advances in Polymer Technology. 18(4), 351-363 pp.
- Salehi-Khojin, A., Mahinfalah, M. and Bashirzadeh, R.,** 2007, Temperature effects on Kevlar/hybrid and carbon fiber composite sandwiches under impact loading, Composite Structures 78, 197–196 pp.
- Sathishkumar, T., Satheeshkumar, S. And Naveen, J.,** 2014, Glass fiber-reinforced polymer composites - a review, J. Reinf. Plast. Compos., vol. 33, no. 13, 1258–1275 pp.
- Saw, S. K. and Datta, C.,** 2009, Thermo mechanical properties of jute/bagasse hybrid fibre reinforced epoxy thermoset composites, BioResources, 4(4), 1455–1475 pp.
- Sawal, N. and Akil H.M.,** 2011, Effect of core thicknesses on impact performance of thermoplastic honeycomb core sandwich structure under low-velocity impact loading, Composite Science Technology, 471–472; 461–465 pp.
- Schubel, P.M., Luo, J. and Daniel, I.M.,** 2005, Low velocity impact behavior of composite sandwich panels, Composites Part A, (36): 1389–1396 pp.
- Sikarwar, R.S., Velmurugan, R. and Gupta, N.K.,** 2017 Effect of velocity and fibres on impact performance of composite laminates – Analytical and experimental approach, International Journal of Crashworthiness, 22:6, 589-601 pp.
- Soy, U.,** 2009, Metal Matrix Composite Materials, Technical Education Faculty of Sakarya University, Metal Education Department, Lecture Notes, Sakarya

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Soykok, I.F., Tas, H., Ozdemir, O. and Kandas, H.,** 2021, Effect of drop weight impact on the torsional-loading behavior of filament wound and prepreg-wrapped composite tubes, *Polymers and Polymer Composites*, Vol. 29(6): 617–628 pp.
- Sösen, E., Gündüz, G. ve İmren, E.,** 2016, Balistik Panel Ve Koruyucu Zırh Üretiminde Kullanılan Lif ve Kompozit Malzemeler, *Bartın Orman Fakültesi Dergisi*, 18(2): 194-204 s.
- Springler, G.S. and Kollar, L.P.,** 2003, *Mechanics of Composite Structures*, Cambridge University Press, 3rd edition, Cambridge, 494 pp.
- Srivastava, A., Majumdar, A. and Butola, B.S.,** 2011, Improving the impact resistance performance of Kevlar fabrics using silica based shear thickening fluid *Materials, Science and Engineering A* 529, 224-229 pp..
- Staab, G.H.,** 1999, *Laminar Composites Book, Part: Introduction to Composite Materials*, 1-16 pp..
- Stopforth, R. and Adali, S.,** 2019, Experimental study of bullet-proofing capabilities of Kevlar, of different weights and number of layers, with 9mm projectiles, *Defence Technology* 15, 186-192 pp.
- Şerbescu, A., Kypros, P., and Țăranu, N.,** 2006, The Efficiency of Basalt Fibres in Strengthening the Reinforced Concrete Beams, *The Bulletin of the Polytechnic Institute of Jassy, Construction, Architecture Section*, 52(3-4), 47–58 pp.
- Tabiei, A. and Nilakantan, G.,** 2008, Ballistic Impact of Dry Woven Fabric Composites: A Review, *Applied Mechanics Reviews*, 61, 1-12 pp.
- Tan, V.B.C, LIM, C.T. and Cheong, C.H.,** 2003, Perforation of highstrength fabric by projectiles of geometry, *Int. Journal of Impact Eng.*, v:28, 207-222 pp.
- Tan, W. and Falzon, B.G.,** 2016, Modelling the crush behaviour of thermoplastic composites, *Compos Sci Technol*, 134:57–71 pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Tarakçıoğlu, I., Gülümser, T., Başal, G., Duran, D., Ilgaz ve S. Mecit, D.,** 2007, Teknik tekstiller ve kullanım alanları. Tekstil ve Konfeksiyon Cilt 2, 154-161 s.
- Taranu, N.,** 2009, Composite materials-course notes, The University of Sheffield Printing Office
- Tay, T. E., Tan, V. B., and Liu, G.,** 2006, A new integrated micro–macro approach to damage and fracture of composites, Materials Science and Engineering B, 132(1), 138–142 pp.
- Turan, M.,** 2003, Tabakalı kompozit malzemelerde yüksek hızlı darbe hasarı, Mühendis ve Makine, 48 (575), 51-57 s.
- US Department of Justice.** NIJ Standard 0101.06, Ballistic Resistance of Personal Body Armor; US Department of Justice, 2008, Washington, DC, USA
- Uslu, M.,** 2007, Docol 22MNB5 Çeliğinin Balistik Özelliklerinin İncelenmesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 13 s.
- Usman, A., Asra, T., Yasir, N., Khubab, S., Zubair, K. and Muhammad, U.,** 2020, Comparison of Mechanical Behavior of Biaxial, Unidirectional and Standard Woven Fabric Reinforced Composites, Fibers and Polymers, Vol.21, No.6, 1308-1315 pp.
- Vaidya, U.K., Hosur, M.V. and Earl, D.,** 2000, Impact response of integrated hollow core sandwich composite panels, Composites Part A, 31, 761–772 pp.
- Valença, S.L., Griza, S., Oliveria, V.G., Sussuchi, E.M. and Cunha, F.G.C.,** 2015, Evaluation of the mechanical behavior of epoxy composite reinforced with Kevlar plain fabric and glass/Kevlar hybrid fabric, Composites: Part B 70, 1-8 pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Vasiliev, V.V. ve Morozov, E.**, 2001, Mechanics and analysis of composite materials: Elsevier Publ.
- Wu, X., Yang, Z., Kuang, W., Tang, Z. and Guo, B.**, 2017, Coating polyrhodanine onto boron nitride nanosheets for thermally conductive elastomer composites, Composites. Part A, Applied Science and Manufacturing, 94; 77–85 pp.
- Xu, Y.**, 2016, Stabbing Resistance of Soft Ballistic Body Armour Impregnated with Shear Thickening Fluid, Manchester University the Faculty of Science and Engineering, PhD Thesis, 33-89 pp.
- Yalçın, E.B., Günay, V. and Marsoğlu, M.**, 2012, Impact Behaviour Of Composite Materials By Using Low And High Speed Impact Tests, Advanced Materials Research Vol 445, 189-194 pp.
- Yeh, S., Lin, J.J., Zhuang, H.Y., Chen, Y.C., Chang, H.C, Zheng, J.Y., Yang, L.Y., Lee, K.C., Chen, Y.L. and Rwei, S.P.**, 2019. Light Shear Thickening Fluid (Stf)/Kevlar Composites With Improved Ballistic Impact Strength, Journal of Polymer Research , 26-155 pp.
- Yumak, N., Pekbey, Y. ve Aslantaş, K.**, 2013, Zırh Tasarımında Kullanılan Kompozit Malzemelerin Deformasyon Karakteristiğinin Araştırılması, Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi, 10(4), 1-21s.
- Zhu, G., Goldsmith W. and Dharan C.H.K.**, 1992, Penetration of laminated Kevlar by projectiles- I. Experimental investigation, Inter. J. Solids Struct., 399– 420 pp.

TEŞEKKÜR

Bu yüksek lisans tezimde ve tüm yüksek lisans çalışmam boyunca benden desteğini esirgemeyen, özellikle kıymetli görüşlerinden yararlandığım ve her zaman yardımcı olan değerli danışmanım Sayın Prof. Dr. Bikem ÖVEZ' e,

Araştırmalarımnda, birlikte yürüttüğümüz projelerde ve icra edilen tüm deneylerde her zaman yardımcı ve destek olan değerli devre arkadaşım Baturhan TATAR' a,

Sundukları çalışma ve deney ortamı ile her türlü maddi-manevi desteklerini ve yardımlarını esirgemeyen tüm SEMKİM Boya ve Kimya A.Ş. ailesine ve Yönetim Kurulu Başkanı Sayın Ahmet SEMİZ' e,

Laboratuvar ve ekipman desteğinde yardımlarını esirgemeyen Sayın Doç. Dr. Canan URAZ' a ve tezimin son safhalarında değerli emeğini esirgemeyen Sayın Prof. Dr. Musatafa DEMİRCİOĞLU' na,

Her zaman yanımda olan, yüksek lisans çalışmalarımnda desteğini esirgemeyen çok değerli eşim Bahar SARIÇALI' ya teşekkürü bir borç bilirim.

31/ 08 / 2022

ÖZGEÇMİŞ

ÖĞRENİM DURUMU

- Ege Üniversitesi Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Yüksek Lisans 2018 – 2022
- Kara Harp Okulu Makine Mühendisliği 2004- 2008
- Maltepe Askeri Lisesi 2000- 2004

İŞ TECRÜBESİ

- SEMKİM Boya ve Kimyevi Mad. San. Tic. Ltd. Şti./ Dış Ticaret Md.
Mart 2018 – ...
- Türk Silahlı Kuvvetleri – Kara Kuvvetleri K.lığı / Subay
Ağustos 2008- Temmuz 2016

YABANCI DİL & BİLGİSAYAR PROGRAMLARI

İngilizce, Microsoft Office programları, ERP, Netsis, Akınsoft